

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н. Л. Духова»

Акционерное общество «Русатом Автоматизированные системы
управления»

Региональная сеть «Образование и подготовка специалистов в области
ядерных технологий (STAR-NET)»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АЭС И ТЭС

МАТЕРИАЛЫ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Республика Беларусь, г. Минск, 27-28 апреля 2021 года)

INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS FOR NPP AND TPP

PROCEEDINGS OF
II INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE

(Republic of Belarus, Minsk, April 27-28, 2021)

Минск БГУИР 2021

УДК 681.5:621.311.2
ББК 31.37+31.47
А22

А22 **Автоматизированные** системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС = Instrumentation and control systems for NPP and TPP : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (Республика Беларусь, г. Минск, 27-28 апреля 2021 года). – Минск : БГУИР, 2021 – 295 с.
ISBN 978-985-543-620-2.

В сборнике опубликованы результаты научных исследований и разработок в области проектирования, производства и эксплуатации автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных и тепловых электростанций, реализации процесса обучения и подготовки специалистов для ядерной энергетики.

Сборник рассчитан на ученых, инженеров, работающих в областях научных исследований, разработки, производства, реализации и эксплуатации систем управления технологическими процессами АЭС и ТЭС, а также на работников атомных и тепловых электростанций и студентов, обучающихся по специальностям, связанным с системами управления.

УДК 681.5:621.311.2
ББК 31.37+31.47

ISBN 978-985-543-620-2

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2021

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Богуш Вадим Анатольевич – сопредседатель оргкомитета, ректор учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР), доктор физико-математических наук, профессор, г. Минск, Республика Беларусь.

Лопарев Сергей Юрьевич – сопредседатель оргкомитета, директор федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»), доктор экономических наук, г. Москва, Российская Федерация.

Бутко Андрей Борисович – сопредседатель оргкомитета, генеральный директор акционерного общества «Русатом Автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ»), г. Москва, Российская Федерация.

Рыбак Виктор Александрович – заместитель председателя оргкомитета, проректор по учебной работе БГУИР, кандидат технических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Осипов Анатолий Николаевич – проректор по научной работе БГУИР, кандидат технических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Дробот Сергей Викторович – декан факультета инфокоммуникаций БГУИР, кандидат технических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Короткевич Александр Васильевич – декан факультета радиотехники и электроники БГУИР, кандидат технических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Сацук Сергей Михайлович – заведующий кафедрой электроники БГУИР, кандидат технических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Рыбак Виктор Александрович – сопредседатель программного комитета, проректор по учебной работе БГУИР, кандидат технических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Кишкин Владимир Львович – сопредседатель программного комитета, первый заместитель главного конструктора ФГУП «ВНИИА», доктор технических наук, г. Москва, Российская Федерация.

Сацук Сергей Михайлович – заместитель председателя программного комитета, заведующий кафедрой электроники БГУИР, кандидат технических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Бондарь Анатолий Михайлович – главный инженер Государственного предприятия «Белорусская АЭС», г. Островец, Республика Беларусь.

Горюнов Алексей Германович – заведующий кафедрой – руководитель Отделения ядерно-топливного цикла на правах кафедры Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор технических наук, доцент, г. Томск, Российская Федерация.

Иванов Владимир Юрьевич – директор физико-технологического института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, кандидат физико-математических наук, доцент, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

Карницкий Николай Борисович – заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета, доктор технических наук, профессор, г. Минск, Республика Беларусь.

Кожемякин Валерий Александрович – директор научно-производственного унитарного предприятия «АТОМТЕХ» открытого акционерного общества «МНИПИ», кандидат технических наук, г. Минск, Республика Беларусь.

Королев Сергей Андреевич – зам. заведующего кафедрой «Автоматика» Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт», кандидат технических наук, доцент, г. Москва, Российская Федерация.

Косилов Андрей Николаевич – исполнительный директор региональной сети "Образование и подготовка специалистов в области ядерных технологий (STAR-NET), профессор Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт», кандидат технических наук.

Крюк Юлиана Евгеньевна – директор государственного научного технического учреждения «Центр по ядерной и радиационной безопасности», кандидат биологических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Кузьмин Андрей Владимирович – генеральный директор Государственного научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, кандидат физико-математических наук, г. Минск, Республика Беларусь.

Лотов Валерий Николаевич – главный научный сотрудник филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», кандидат технических наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Луговская Ольга Михайловна – начальник департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, кандидат физико-математических наук, г. Минск, Республика Беларусь.

Сивоконь Владимир Петрович – советник генерального директора АО «РАСУ», председатель секции АСУ НТС №1 ГК «Росатом», кандидат технических наук, г. Москва, Российская Федерация.

Тимошенко Андрей Игоревич – заведующий кафедрой ядерной физики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

Хробостов Александр Евгеньевич – директор института ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева, кандидат технических наук, доцент, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

СОДЕРЖАНИЕ

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ, ЭВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ТПТС	
Кишкин В.Л., Нарич А.Д. _____	13
ОСОБЕННОСТИ РЕЗЕРВНОГО УПРАВЛЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОГО ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА БЕЛОРУССКОЙ АЭС	
Григорьев М.С., Маслова К.А., Сергеева И.Н. _____	16
КОНТРОЛЬ МОЩНОСТИ, РЕАКТИВНОСТИ И ПЕРИОДА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПОСРЕДСТВОМ ОТОБРАЖЕНИЯ БАЛАНСА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ	
Юферов А.Г. _____	13
КВАЛИФИКАЦИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ	
Агафонов С.А., Кузнецов А.Н., Останин С.М. _____	27
ОПЫТ ФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭНЕРГОБЛОКА №1 БЕЛОРУССКОЙ АЭС	
Калинушкин А.Е., Ковель А.И. Мильто Н.В., Мусихин А.М., Семченков Ю.М. _____	33
СОВРЕМЕННАЯ ТИПОВАЯ АРХИТЕКТУРА АСУ ТП АЭС НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ТПТС ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ВНИИА»	
Артемьев К.П., Галицын Ю.С., Гриценко С.Ю., Нарич А.Д., Новиков А.Н., Аспидов К.М., Борзенко А.А., Первов А.В. _____	40
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС	
Герасимчук О.А., Крюков А.В., Приходченко А.Н., Сарылов О.В. _____	47
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТПТС	
Гриценко С.Ю., Моисеев М.И., Коровина О.А., Кожевников А.Ю., Жмайлов В.В. _____	52
РАЗВИТИЕ СИСТЕМНОЙ ШИНЫ EN АСУ ТП НА БАЗЕ ТПТС	
Кишкин В.Л., Тихонов Ю.Н., Новиков А.А., Конопатов А.А., Борзенко А.А. _____	55
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ТПТС	
Мейлахс А.Л., Иванова А.А. _____	59
УПРАВЛЯЕМЫЕ ETHERNET КОММУТАТОРЫ КРЕЙТОВОГО ИСПОЛНЕНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ОБОРУДОВАНИЯ ТПТС-НТ	
Бурцев П.А., Новиков А.Н. _____	64
ВЕРИФИКАЦИЯ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСБ АЭС ПОСРЕДСТВОМ САПР GET-R1	
Селиверстов Е.С., Галицын Ю.С., Иванова А.А. _____	68
ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА БАЗЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ТПТС-СБ В АСПЕКТЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАЛАДКИ И ПРОВЕРОК	
Селиверстов Е.С., Гриценко С.Ю., Новиков А.Н. _____	72
ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ТПТС С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ ОБЪЕКТА.	
Белоносов М.А., Черепанов Г.В., Огнева М.А. _____	77
АДАПТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ПРИБОРАХ СО СВЕРХНИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ	
Панферов Д.В. _____	81
ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ САР ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПАРОВЫХ КОТЛОВ	
Кулаков Г. Т., Карницкий Н. Б., Кравченко В. В. _____	87
ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА БАЗЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ТПТС	
Иванова А.А., Мейлахс А.Л., Толоконский А.О. _____	92

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ КАМПАНИИ ЭНЕРГБЛОКА АЭС ВВЭР-1200 Путилин В.Н. _____	95
МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕЗНАЧИМЫХ СИГНАЛОВ ТРЕВОГИ Богомолов С.Л., Анохин А.Н. _____	98
МЕТОД РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ «ДРЕБЕЗЖАЩИХ» СИГНАЛОВ ТРЕВОГИ НА АЭС Богомолов С.Л., Анохин А.Н. _____	101
РОБОТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ Травенко Н.Г., Краснобородько А.А. _____	105
ВЫБОР МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АЭС В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ Аколович А.В., Крюк Ю.Е. _____	109
НОВЫЕ ТИПЫ ДОЗИМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ Богдан М.А., Карайкоза Т.М. _____	113
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОМЕТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ NaI(Tl) ДЕТЕКТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ I В ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЕ Загороднюк А.А. _____	118
СОВРЕМЕННОЕ ЭТАЛОННОЕ ПОВЕРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ Гузов В.Д., Зайцев В.Д., Кожемякин В.А., Лукашевич Р.В., Николаев В.А., Раскоша В.Л., Сеньковский К.Г. _____	125
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ИГНАЛИНСКОЙ, РОВЕНСКОЙ, ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС Новик А.Н., Кучинский П.В., Хилько Г.И., Кречотень О.В. _____	127
МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЦИНТИЛЛЯТОРА CLYC(Ce) Лагуцкий И.А., Антонов В.И., Комар Д.И. _____	132
ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС В ПРЕДЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД Ничипорчук А.О., Кожемякин В.А., Екидин А.А., Васильев А.В., Васянович М.Е., Назаров Е.И., Пышкина М.Д. _____	136
КОМПЛЕКТОВАНИЕ ПЕРЕДВИЖНОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ НА РАДИОАКТИВНО-ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ Кожемякин В.А., Прибылев С.В. _____	138
ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ РАБОТЫ НОВОГО МУЛЬТИСФЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А., Назаров Е.И., Гуринович В.И., Комар Д.И., Кожемякин В.А. _____	140
ЭФФЕКТИВНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЦЕССЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ Егоров Д.И., Измайлов А.В. _____	146
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ Акимов Н.Н., Кольцов В.А., Павлин А.Ю. _____	151

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ	
Коновалов И.А., Баринов А.А., Чесноков А.А., Хробостов А.Е., Макаров М.А. _____	156
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРЕ И ОБУЧЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	
Громько И. Л., Галушко В. Н. _____	158
АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ АВАРИЙНО-ОПАСНОЙ СИТУАЦИИ НА ДЕТАНДЕРЕ	
Бранцевич П. Ю. _____	164
КРОСС-ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММ MSU-NTR И SERPENT ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СИСТЕМАМ ВТГР	
Кругликов А.Е., Щуровская М.В., Волков Ю.Н., Невиница В.А., Фомиченко П.А. _____	171
АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ИЗ ТЕКСТОВ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ	
Аршанский А.Р., Бегларян Н.М., Чикунова М.В., Мищенко И.О., Максимов И.В. _____	173
КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГИДРОДИНАМИКИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ	
Чесноков А.А., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Коновалов И.А., Макаров М.А. _____	176
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС	
Гизов В.О., Малышев В.В., Парфенчиков И.С. _____	178
ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РОССИЙСКИХ АСУ ТП АЭС	
Паппе И.Н., Володин В.С. _____	182
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ КИПЯЩЕГО СТЕНДА	
Бондарь П.С. _____	189
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ АСУ ТП АЭС	
Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г., Семенов К.В., Менгазетдинов Н.Э., Жарко Е.Ф. _____	193
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ WRF ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА БЕЛАЭС	
Шамына А.Ю., Лабоха А.К. _____	198
АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ АВАРИЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	
Дробот С.В., Русакович В.Н., Сацук С.М. _____	204
ОСНОВЫ ТЕОРИИ АТОМА ВОДОРОДА ДЛЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА КВАНТОВО-ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ	
Кобяк И.П. _____	207
ДАТЧИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ PSoC ТЕХНОЛОГИИ	
Надеждин И.С., Горюнов А.Г. _____	213
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УРОВНЕМЕРА С ФУНКЦИЕЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО САМОКОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ЭФФЕКТА	
Калашников А.А. _____	216
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ТВСА	
Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Пронин А.Н., РЯЗАНОВ А.В., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е. _____	222
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НАПОРНОЙ КАМЕРЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	
Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Рязанов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н. _____	228

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИОПОМЕХ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Титович Н.А. _____	233
СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОГО ПИТАНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ МОДУЛЕЙ Жмойдяк А.П., Янович А.И. _____	239
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ SIMCENTER 3D И SIMCENTER TESTLAB Кожевников С.В., Пименов С. А. _____	244
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ Листопад Н.И., Лавшук О.А. _____	250
АЛГОРИТМЫ УМЕНЬШЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ТОЧЕК, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТРЕНДОВ ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СВУ АСУ ТП АЭС Гаркавченко Д.А., Захарин И.В., Куликов А.М. _____	254
УЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА Ловшенко И.Ю., Стемпичкий В.Р. _____	257
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ОТРАСЛИ Велькин В.И., Щеклеин С.Е., Иванов В. Ю., Климова В.А., Ташлыков О.Л. _____	263
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ Ковалёнок Д.Г. _____	268
ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ СИСТЕМАМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ НА БАЗЕ ПТК ТПТС-НТ Королев С.А., Ташчы Ю.И., Толоконский А.О. _____	274
ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ БЕЛАРУСИ Карницкий Н.Б., Качан С.А., Буров А.Л. _____	276
ОБУЧАЮЩИЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ МЕСТНОСТИ Комар Д.И., Коновалов Е.А., Кожемякин В.А., Прибылев С.В. _____	280
ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА Качан С.М., Мингалеев С.Ф. _____	285
ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ СЕЛЕКЦИЯ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ Соколов В.Б. _____	290

CONTENTS

CREATION HISTORY, EVOLUTION AND DEVELOPMENT OF PROGRAMMNO-TECHNICAL PLATFORM TPTS V.L. Kishkin, A.D. Naritc_____	13
MAIN FEATURES OF STANDBY CONTROL AND MONITORING OF BELORUSSIAN NPP OPERATING PERSONNAL M.S. Grigorev, K.A. Maslova, I.N. Sergeeva_____	16
CONTROL OF POWER, REACTIVITY AND PERIOD OF A NUCLEAR REACTOR BY DISPLAY BALANCE OF RELATIVE SPEEDS OF PROCESSES A.G. Yuferov_____	23
QUALIFICATION, VERIFICATION AND VALIDATION S.A. Agafonov, A.N. Kuznetsov, S.M. Ostanin_____	27
EXPERIENCE OF PHYSICAL TESTS OF THE IN-CORE MONITORING SYSTEM DURING COMMISSIONING OF POWER UNIT NO. 1 OF THE BELARUSIAN NPP A.E. Kalinushkin, A.I. Kovel, N.V. Milto, A.M. Musikhin, Y.M. Semchenkov_____	33
MODERN TYPICAL ARCHITECTURE OF NPP I&C BASED ON TPTS TECHNOLOGY PRODUCED BY FSUE "VNIIA" K.P. Artemev, Y.S. Galitsyn, S.Y. Gritsenko, A.D. Naritc, A.N. Novikov, K.M. Aspidov, A.A. Borzenko, A.V. Pervov_____	40
ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT OF NUCLEAR POWER PLANT UNIT O.A. Gerasimchuk, A.V. Kryukov, A.N. Prikhodchenko, O.V. Sarylov_____	47
THE METROLOGICAL PROVISION FOR DEVELOPMENT AND APPLICATION OF TPTS PLATFORMS S.Y. Gritsenko, M.I. Moiseev, O.A. Korovina, A.Y. Kozhevnikov, V.V. Zhmailov_____	52
EN SYSTEM BUS EVOLUTION IN TPTS BASED I&C SYSTEMS V.L. Kishkin, Y.N.Tikhonov, A.A.Novikov, A.A.Konopatov, A.A.Borzenko_____	55
SOLVING PROBLEMS OF AUTOMATIC CONTROL IN THE TPTS TECHNOLOGY A.L. Meilakhs, A.A. Ivanova_____	59
3U MANAGED ETHERNET SWITCH FOR TPTS-NT PLATFORM P.A. Burtzew, A.N. Novikov_____	64
VERIFICATION OF NPP SAFETY CONTROL SYSTEM APPLICATION SOFTWARE USING GET-R1 CAD E.S. Seliverstov, Y.S. Galitsyn, A.A. Ivanova_____	68
FEATURES OF THE EQUIPMENT OF THE INSTRUMENTATION AND CONTROL SAFETY SYSTEM BASED ON THE COMPLEX OF AUTOMATION TOOLS TPTS-SB IN ASPECT OF COMMISSIONING AND CHECKS E.S. Seliverstov, S.Y. Gritsenko, A.N. Novikov_____	72
INTEGRATION OF CONTROL AND CONTROL SYSTEMS BASED ON TPTS WITH THE ELECTRICAL PART OF THE FACILITY. M.A. Belonosov, G.V. Cherepanov, M.A. Ogneva_____	77
ADAPTIVE DIGITAL FILTERING OF PULSE NOISE IN ULTRA-LOW POWER CONSUMPTION DEVICES D.V. Panferov_____	81
ESTIMATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION OF INVARIANT ACS OF SUPERHEATED STEAM TEMPERATURE OF STEAM BOILERS H.T. Kulakou, M.B. Karnitski, U.U. Krauchanka_____	87
SOLVING PROBLEMS OF AUROMATIC CONTROL IN THE TPTS TECHNOLOGY A.A. Ivanova, A.L. Meilahs, A.O. Tolokonskiy_____	92
WAYS TO IMPROVE THE FUEL CAMPAIGN NPP POWER UNIT VVER-1200 V.N. Putilin_____	95

METHOD OF PRELIMINARY ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL ALARMS TO DETECT POTENTIALLY INSIGNIFICANT ALARMS S.L. Bogomolov, A.N. Anokhin	98
METHOD FOR CALCULATING THE VALUE OF HYSTERESIS FOR SUPPRESSING «FLEETING» ALARM SIGNALS AT NPP S.L. Bogomolov, A.N. Anokhin	101
ROBOTIC DEVICES IN THE PHYSICAL PROTECTION SYSTEM N. G. Travenko, A. A. Krasnoborodko	105
SELECTION OF A METHOD FOR ANALYSIS OF RELIABILITY OF AUTOMATED PROCESS COMPUTER SYSTEMS NPP IN THE FRAMEWORK OF AN INDEPENDENT SAFETY ASSESSMENT A.V. Akolovich, Y.E. Kruk	109
NEW TYPES OF CONTINUOUS AND PULSED PHOTON RADIATION DOSIMETERS FOR NUCLEAR TECHNOLOGY M.A. Bohdan, T.M. Karaikoza	113
DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF A WHOLE BODY COUNTER BASED ON NaI(Tl) DETECTOR WHEN MEASURING THE ¹³¹ I CONTENT IN THE THYROID GLAND A.A. Zaharadniuk	118
MODERN REFERENCE TESTING EQUIPMENT FOR GRADUATING DOSIMETRIC DEVICES V.D. Huzov, V.D. Zaitsev, V.A. Kozhemyakin, R.V. Lukashevich, V.A. Nikolayev, V.L. Raskosha, K.G. Senkovsky	125
AUTOMATED RADIATION MONITORING SYSTEM IN ZONES OF INFLUENCE OF IGNALINE, RIVNE, CHERNOBYL NPP A.N. Novik, P.V. Kuchinsky, G.I. Khilko, O.V. Krekoten	127
METHOD OF SEPARATION OF NEUTRON AND GAMMA-RADIATION PULSES USING THE CLYC(Ce) SCINTILLATOR I.A. Lagutskiy, V.I. Antonov, D.I. Komar	132
EXPERIENCE OF RADIATION MONITORING IN THE AREA OF SITING THE BELARUSIAN NPP DURING THE PRE-OPERATION PERIOD A.O. Nichyparchuk, V.A. Kozhemyakin, A.A. Ekidin, A.V. Vasiliev, M.E. Vasyanovich, E.I. Nazarov, M.D. Pyshkina	136
EQUIPMENT OF A MOBILE RADIOMETRIC LABORATORY WITH MEASURING EQUIPMENT FOR EXPRESS CONTROL IN RADIOACTIVELY CONTAMINATED AREAS V.A. Kozhemyakin, S.V. Pribylev	138
VALIDATION AND VERIFICATION OF THE NEW MULTISPHERE SPECTROMETER OPERATION M.D. Pyshkina, A.V. Vasilyev, A.A. Ekidin, E.I. Nazarov, V.I. Gurinovich, D.I. Komar, V.A. Kozhemyakin	140
EFFECTIVE PHYSICAL PROTECTION OF NUCLEAR MATERIALS AND RADIOACTIVE SUBSTANCES DURING TRANSPORTATION D.I. Egorov, A.V. Izmaylov	146
INFORMATION SYSTEM FOR DECISION SUPPORT IN ENSURING THE CYBERSECURITY OF UPPER-LEVEL SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANTS N.N. Akimov, V.A. Koltsov, A.J. Pavlin	151
STUDIES OF NUMERICAL ESTIMATE OF CHARACTERISTICS OF TURBULENCE OF REACTOR FLOWS WITH APPLICATION OF MATRIX CONDUCTOMETRY METHOD I.A. Konovalov, A.A. Barinov, A.A. Chesnokov, A.E. Khrobostov, M.A. Makarov	156

DIAGNOSIS OF INTER-ROLLER CIRCUITS IN THE TRANSFORMER AND TRAINING OF CONVENTIONAL NEURAL NETWORKS I. L. Hramyka, V. N. Galushko _____	158
ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS IN AN EMERGENCY SITUATION ON DETANDER P.J. Brancevich _____	164
CROSS-VERIFICATION OF MCU-HTR AND SERPENT CODES FOR HTGR SYSTEMS A.E.Kruglikov, M.V.Hurovskay, Y.N.Volkov, V.A.Neviniza, P.A.Fomichenko _____	171
AN ALGORITHM FOR REQUIREMENTS EXTRACTION IN TECHNICAL STANDARDS A.R. Arshanskiy, N.M. Beglaryan, M.V. Chikunova, I.O. Mishchenko, I.V. Maksimov _____	173
CORRELATION VELOCITY MEASUREMENTS IN RESEARCHES OF HYDRODYNAMIC OF TURBULENT FLOWS WITH APPLICATION OF MATRIX CONDUCTOMETRY A.A. Chesnokov, A.E. Khrobostov, A.A. Barinov, I.A. Konovalov, M.A. Makarov _____	176
DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A NPP POWER UNIT V.O. Gizov, V.V. Malyshev, I.S. Parfenchikov _____	178
APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS AT DIFFERENT STAGES OF THE LIFE CYCLE OF RUSSIAN NPP I&C SYSTEM I.N. Pappe, V.S. Volodin _____	182
SOFTWARE FOR BOILING STAND THYRISTOR UNITS CONTROL ALGORITHMS P.S. Bondar _____	189
APPLICATION OF THE DIGITAL TWIN AT NPP I&C SYSTEM LIFE CYCLE A.G. Poletikin, V.G. Promyslov, K.V. Semenov, N.E. Mengazetdninov, E.F. Zharko _____	193
USING THE NUMERICAL WRF WEATHER FORECAST MODEL IN SIMULATION OF EMERGENCY SITUATIONS AT BELNPP A.Y. Shamyna, A.K.Labokha _____	198
ANALYSIS OF REQUIREMENTS FOR EMERGENCY POWER SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANTS S.V. Drobat, U.M. Rusakovich, S.M. Satsuk _____	204
FUNDAMENTALS OF THE THEORY OF A HYDROGEN ATOM FOR PROBLEMS SYNTHESIS OF QUANTUM ELECTRONIC CIRCUITS I.P. Kabiak _____	207
DIFFERENTIAL PRESSURE SENSOR BASED ON PS ₆ C TECHNOLOGY I.S. Nadezhdin, A.G. Goryunov _____	213
DEVELOPMENT OF INTELLIGENT FLUID LEVEL SENSOR WITH METROLOGICAL SELF-CHECK FUNCTION BASED ON THE CONCENTRATION EFFECT A.A. Kalashnikov _____	216
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COOLANT FLOW IN THE VVER REACTOR CORE WITH TVSA FUEL ASSEMBLIES S.M. Dmitriev, T.D. Demkina, D.V. Doronkov, D.S. Doronkova, A.N. Pronin, A.V. Pyazanov, D.N. Solntsev, A.E. Khrobostov _____	222
EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW MIXING PROCESSES OF THE COOLANT IN THE PRESSURE CHAMBER OF A NUCLEAR REACTOR S.M. Dmitriev, A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov, A.V. Ryazanov, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov, A.N. Pronin _____	228

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF RADIO INTERFERENCE ON THE DYNAMIC PARAMETERS OF LOGIC ELEMENTS N. A. Titovich	233
ROTATING UNITS WIRELESS POWER SYSTEM A. P. Zhmoidziak, A.I. Yanovich	239
SIMULATION MODELING OF SOFTWARE AND HARDWARE USING SIMCENTER 3D AND SIMCENTER TESTLAB S.V. Kozhevnikov, S.A. Pimenov	244
TECHNOLOGICAL AND THEORETICAL SOLUTIONS FOR DYNAMIC ROUTING N.I. Listopad, O.A. Lavshuk	250
ALGORITHMS FOR THE REDUCTION OF THE NUMBER OF POINTS REQUIRED TO REPRESENT HISTORICAL DATA TRENDS IN UPPER LEVEL SYSTEM OF I&C NPP D.A. Garkavchenko, A.M. Kulikov, I.V. Zaharin	254
THE INFLUENCE OF PROTONS IN THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ARSENIDE-GALLIUM FIELD EFFECT TRANSISTOR I.Y. Lovshenko, V.R. Stempitsky	257
TRAINING OF URFU STUDENTS ON SIMULATORS OF NUCLEAR POWER REACTORS V. I. Velkin, S. E. Shcheklein, V.Y. Ivanov, V. A. Klimova, O. L. Tashlykov	263
APPLICATION OF VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS D.G. Kovalenok	268
PRACTICE-ORIENTED APPROACH IN TRAINING OF CONTROL SYSTEMS AND CONTROL OF EXECUTIVE MECHANISMS ON THE BASIS OF PTK TPTS-NT S.A. Korolev, Y.I. Tasci, A.O. Tolokonskiy	274
TRAINING OF ENGINEERING PERSONNEL FOR THE BELARUSIAN ENERGY INDUSTRY M.B. Karnitski, S.A. Kachan, A.L. Burov	276
TRAINING SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR CARRYING OUT AREA RADIATION SURVEY D.I. Komar, E.A. Konovalov, V.A. Kozhemyakin, S.V. Pribylev	280
LABORATORY SETUP BASED ON THE ARDUINO PLATFORM FOR STUDYING THE CHARACTERISTICS OF THE GEIGER-MÜLLER COUNTER S.M. Kachan, S.F. Mingaleev	285
PSYCHOLOGICAL SELECTION IN HIGH SCHOOL U.B. Sakalou	290

УДК 681.5

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ, ЭВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ ТПТС

д.т.н. КИШКИН В.Л., к.т.н. НАРИЦ А.Д.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова» (Москва, Российская Федерация)

Аннотация. Доклад посвящен истории создания, развитию и применению программно-технической платформы ТПТС на АЭС и других энергетических объектах. Рассматриваются особенности и преимущества платформы, а также перспективы развития и применения.

CREATION HISTORY, EVOLUTION AND DEVELOPMENT OF PROGRAMMNO-TECHNICAL PLATFORM TPTS

D.Sc. VLADIMIR L. KISHKIN, PhD ALEXANDR D. NARITC

The Federal State Unitary Enterprise "All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov" (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The report is devoted creation history, development and application of programm-technical platform TPTS on the nuclear power plants and other power objects. Features and advantages of a platform, and also development and application prospect are considered.

Программно-техническая платформа ТПТС является основой для построения уровня автоматического управления АСУ ТП АЭС и других энергетических и промышленных объектов.

В 1993 году Росатом РФ поручил Всероссийскому научно-исследовательскому институту автоматики (ВНИИА) разработку и организацию программно-технических средств для создания современной конкурентоспособной АСУ ТП АЭС российского дизайна.

Существующие на тот момент в РФ разработки не отвечали современным международным требованиям, и ВНИИА произвел анализ современных иностранных платформ с целью их лицензионного производства. Были проанализированы ряд предложений авторитетных зарубежных фирм (в т.ч. Westinghouse, Merlin Gerin, Siemens и т.д.), и в результате был заключен лицензионный договор с фирмой Siemens на передачу технологии новейшей на тот момент разработки Teleperm MEA. Данная аппаратура была специально разработана для построения АСУ ТП энергетических объектов. В рамках данного договора российской стороне передавались права производить и продавать данные средства и системы на их основе. При этом была передана вся документация на аппаратные и программные средства.

Важнейшим аспектом Договора было право самостоятельно модернизировать и развивать данную аппаратуру. ВНИИА адаптировал конструкторскую и программную документацию на соответствие российским стандартам, освоил технологию производства, провел полный объем испытаний, подтвердивший возможность применения этих изделий для автоматизации технологических процессов на российских АЭС. Данная аппаратура получила российское обозначение ТПТС51. В Германии также были проведены испытания, подтвердившие полное соответствие аппаратуры ТПТС51 и Teleperm MEA по функционалу и качеству. В результате этих работ была подписана "декларация о соответствии" ТПТС51 и Teleperm MEA.

С 1999 года аппаратура ТПТС51 поставлялась на различные электростанции в России и за рубежом, в т.ч. и на объекты, сооружаемые фирмой "Siemens". Оснащение большого количества тепловых энергоблоков дало возможность организовать серийный выпуск аппаратуры, при этом были отработаны технологии производства и получена обширная референция применения по функционалу и качеству. В процессе этих работ инженеры ВНИИА осваивали новые технологии и концепции, положенные в основу создания автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Производство ТПТС сертифицировано германским сертификационным органом TUV на соответствие требованиям стандарта качества ISO 9001.

Значительный положительный опыт применения аппаратуры ТПТС51 на тепловых электростанциях открыл возможность ее использования в составе АСУТП атомных энергоблоков. Первым объектом применения стал 3-й энергоблок Калининской АЭС (2003 год). Этот проект стал важным событием, т.к. для АЭС с реакторами ВВЭР впервые была создана цифровая система управления. При этом были реализованы следующие достижения:

1) существенное сокращение объема оборудования (всего 80 функциональных стоек на всю нормальную эксплуатацию и 3 канала безопасности),

2) впервые в отечественной практике в управляющей системе безопасности применена цифровая техника

3) достигнута высокая степень унификации (единый комплекс средств применён в турбинном и реакторном отделении, трех каналах безопасности, а также во вспомогательных системах),

4) высокая степень автоматизации управления технологическими процессами, не реализуемая на аналоговых системах,

На примере третьего энергоблока Калининской АЭС проектные, наладочные и эксплуатирующие организации получили богатый опыт, освоив технологии работы с программируемой техникой, проектирования и сопровождения комплексов с применением графических САПР.

Вслед за Калининской АЭС последовали АЭС "Бушер" (Иран) и 2 энергоблока "Куданкулам (Индия). К настоящему времени высочайшая надежность аппаратуры ТПТС подтверждена более чем 20-летним опытом эксплуатации.

Несмотря на успешность первых проектов, существовало понимание, что для сохранения конкурентоспособности на мировом рынке необходимо постоянные модернизация и развитие аппаратуры. К этому подталкивали постоянно ужесточающиеся требования по безопасности, новые предложения зарубежных и отечественных фирм, а также бурно развивающаяся электроника. В связи с этим, с самого начала проводились работы по совершенствованию платформы ТПТС. Концепцией развития предусматривалось выполнение следующих целей:

- обеспечение конкурентоспособности (в т.ч. на мировых рынках)
- расширение областей применения
- повышение объемов выпуска, снижение трудоемкости производства
- упрощение эксплуатации, монтажных и пуско-наладочных работ
- повышение эффективности проектных работ
- повышение надежности и отказоустойчивости
- поддержка эксплуатации до 30 и более лет

Источниками развития являлись:

- опыт применения ТПТС на объектах атомной и тепловой энергетики;
- отзывы, замечания и предложения потребителей;
- передовые тенденции в области построения АСУ ТП;
- передовые решения мировых лидеров в области создания и производства аппаратуры;
- тенденции развития технологий производства электронной аппаратуры и элементной

базы.

При этом, неукоснительно соблюдалось выполнение следующих принципов:

1. Достижение нового качества при полном сохранении функциональных возможностей аппаратуры предыдущего поколения

2. Совместимость информационной среды (физический уровень, форматы телеграмм)

3. Постепенное введение апробированных и испытанных новых элементов системы

4. Развитие инструментальных средств с сохранением совместимости

5. Поддержка эксплуатации в течение жизненного цикла энергоблока

В рамках данной концепции последовательно были разработаны и внедрены четыре поколения аппаратуры ТПТС.

ТПТС-Е. Здесь была реализована радикальное улучшение информационной структуры, заключающееся в применении технологии Ethernet с сопутствующим повышением скорости передачи по системной шине в десятки тысяч раз. Разработаны средства регулирования

турбины (ЭЧСР), на что получен патент совместно с фирмой Siemens. Применено в проекте Ростов-2.

ТПТС-ЕМ. Дальнейшее повышение эффективности и функциональности, совершенствование САПР, разработка средств приоритетного управления исполнительными механизмами систем безопасности. Применено в проектах Ростов-3, Ростов-4, Белоярская-4, Калинин-4, Нововоронежская АЭС-2 (1,2). Заключен контракт на поставку на 3 и 4 энергоблока АЭС "Куданкулам" (Индия).

ТПТС-НТ. Радикально новая структура с разделением обработки на два уровня. Новая элементная база, повышение информационной мощности стоек, снижение потребляемой мощности, существенное повышение эффективности и диагностических возможностей. Применено в проектах Ленинградской АЭС-2 (1,2) и Белорусской АЭС, ряде тепловых электростанций. Планируется к поставке на Курскую АЭС-2. В настоящее время ведется поставка на 2 энергоблока АЭС Руппур (Бангладеш). Платформа ТПТС-НТ сертифицирована германским сертификационным органом TÜV.

ТПТС-СБ. Специальная линейка аппаратуры, предназначенная для построения управляющих систем безопасности АЭС (1,2). При разработке средств автоматизации ТПТС-СБ учтен опыт совместной работы с фирмой Siemens по аппаратуре Teleperm ME+ (модификация Teleperm XS, адаптированная для применения с ТПТС51). Аппаратура реализует выполнение всех современных мировых требований по безопасности, включая защиту от отказа по общей причине. На эту аппаратуру получен ряд патентов, ведется патентование в странах потенциального применения. В настоящее время в мире не существует аппаратуры, выполняющей в полной мере всех требований, что подчеркивает уникальность ТПТС-СБ. Платформа ТПТС-СБ сертифицирована германским сертификационным органом TÜV.

Помимо энергетики, платформа ТПТС активно внедряется в других отраслях. В частности, автоматизирован технологический процесс на одном из комбинатов ГК "Росатом" РФ, реализован ряд проектов в ПАО "Роснефть", ведется подготовка ряда новых контрактов.

Постоянно ведется дальнейшая работа по развитию платформы ТПТС. Так, линейка ТПТС-НТ развивается в направлении совершенствования компоновочных решений, повышению уровня унификации, сокращению габаритов аппаратуры, расширению функционала, реализации новых интерфейсов (в частности МЭК 61850, МЭК 60870), повышению устойчивости системной шины EN, поэтапный переход к применению российской элементной базы.

ТПТС-СБ развивается в направлении реализации новых требований проектных организаций, в частности, введения функций гальванического размножения аналоговых сигналов.

Расширяются возможности САПР. Так, впервые реализован сквозной цикл проектирования, включающий технологическое проектирование, динамическое отслеживание технологического процесса, моделирование прикладных программ, верификацию прикладного ПО безопасности и т.д.

Заключение

Программно-техническая платформа ТПТС является современным средством для создания АСУ ТП АЭС, а также других энергетических и промышленных объектов.

Применение и успешная эксплуатация ТПТС на 15 энергоблоках АЭС, более чем на 40 объектах тепловой энергетики, а также на объектах атомной и нефтяной промышленности подтверждает высокий научно-технический уровень, высокое качество и конкурентоспособность платформы ТПТС.

Постоянное совершенствование и развитие ТПТС обуславливает дальнейшее широкое применение платформы ТПТС для автоматизации АЭС и других энергетических и промышленных объектов.

УДК 62-519:004.5

**ОСОБЕННОСТИ РЕЗЕРВНОГО УПРАВЛЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННОГО ДЛЯ
ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

ГРИГОРЬЕВ М.С., МАСЛОВА К.А., СЕРГЕЕВА И.Н.

*ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»,**(Сосновый Бор Ленинградской области, Российская Федерация)*

Аннотация. В статье описаны основные особенности человеко-машинного интерфейса резервных средств контроля и управления оперативного персонала Белорусской АЭС, рассмотрены их функции в части предоставления информации и организации управления. Представлены примеры компоновок и назначение различных типов панелей резервного управления. Даны краткие сведения об объеме реализованного человеко-машинного интерфейса и автоматизации рассматриваемого проекта в целом.

Ключевые слова: автоматизированное рабочее место; блочный пункт управления; мозаичная панель; резервное управление; человеко-машинный интерфейс.

**MAIN FEATURES OF STANDBY CONTROL AND MONITORING OF BELORUSSIAN NPP
OPERATING PERSONNEL**

M. GRIGOREV, K. MASLOVA, I. SERGEEVA

*Federal State Unitary Enterprise Alexandrov Research Institute of Technology**(Sosnovy Bor, Russian Federation)*

Abstract. The article describes the main features of human-machine interface of standby control and monitoring devices of Belorussian NPP operating personnel, their functions regarding providing information and the organization of management are considered. Examples of configurations and assignment of various types of backup control panels are presented. Information about the scope of developed human-machine interface and automation of the project is supplied.

Keywords: automated workstation; main control room; mosaic panel; backup control; human-machine interface.

Введение

Проекты пунктов управления первых АЭС включали большое количество электромеханических приборов, табло и ключей, распределенных на большой площади панелей и пультов. Пункты управления первых серийных АЭС добавили в компоновку панелей активные мнемосхемы, отражающие состояние оборудования в динамике, и стали больше ориентироваться на технологическую структуру. Световая индикация в статических мнемознаках оборудования проектов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 «малой» серии, использование специальных люминесцентных панелей с фрагментами мнемосхемы для РБМК и совмещение мнемосхемы с приборами и средствами управления (ключами, кнопками) в проекте ВВЭР-1000 «большой» серии значительно повысили качество человеко-машинного интерфейса (ЧМИ).

С 70-х гг. началось консервативное внедрение компьютерных дисплеев как вспомогательного средства для отображения информации, не связанной с безопасностью, что привело к постепенному вытеснению традиционных аналоговых приборов и ключей из компоновки блочных пунктов управления (БПУ) и заменой их на компьютеризированные средства управления и отображения информации. В результате в некоторых проектах, например, фирмы Mitsubishi [1], от традиционных приборов и ключей отказались практически полностью.

В качестве основного средства управления технологическим процессом в проекте Белорусской АЭС (а также референтной для нее Ленинградской АЭС-2) также используются автоматизированные рабочие места (АРМ) с дисплейным способом управления. Однако традиционным пультам и панелям отводится важная роль. В данной статье, в основном, будут рассмотрены особенности резервирования контроля и управления с БПУ как основного места, обеспечивающего достижение основных целей эксплуатации АЭС: управляемой выработки электроэнергии и предотвращения выброса радиоактивности в окружающую среду [2].

О необходимости резервного управления

Особенностью деятельности оперативного персонала современных АЭС является отсутствие непосредственного контакта с управляемым технологическим оборудованием и удаленность от него, что, с учетом сложности объекта управления, требует передачи и обработки большого объема информации на блочный, резервный (РПУ), центральный (ЦПУ) и местные пункты управления.

Предусмотрены следующие места, предназначенные для автоматизированного дистанционного управления:

1. Дисплейные рабочие станции АРМ;
2. Панельные секции с малогабаритными мозаичными элементами управления и контроля (далее – «мозаичные панели»);
3. Технические средства контроля и управления, расположенные по месту (размещенные в непосредственной близости от оборудования).

Управление по месту, как правило, используется для оборудования, используемого в период технического обслуживания и ремонта и не предназначенного для оперативного управления, расположенного в местах с условиями окружающей среды и доступностью, обеспечивающими возможность управления персоналом по месту.

Необходимость управления с панелей обуславливается следующими факторами:

1. Согласно позиции Европейских ядерных регуляторов [3] по ограничениям по заявляемой надежности, высокая надежность программных средств не может быть доказана современными методами и к показателям надежности компьютерных систем выше 10^{-4} следует относиться с большой осторожностью, а значит требуется сочетание программируемых и непрограммируемых технических средств;

2. Отказ систем сбора и обработки данных (например, системы верхнего блочного уровня (СВБУ), обеспечивающей работу компьютеризированных АРМ) не должен приводить к угрозе безопасности или неоправданным экономическим потерям в работе станции [2];

3. Для удовлетворения нормативных требований [4] (по классам оборудования), управление системами безопасности (СБ) в зависимости от режима эксплуатации производится:

- автоматически при помощи управляющих систем безопасности (УСБ);
- дистанционно с мозаичных панелей при отказе иницилирующей части системы управления и защиты (СУЗ) и УСБ или при необходимости индивидуального управления отдельным оборудованием после истечения времени запрета на управление, возникающего при запуске соответствующей функции безопасности (ФБ);
- дистанционно с АРМ для регламентных работ (например, периодических испытаний, наладки) при нормальной эксплуатации (НЭ). При этом, команды от СВБУ проходят через модули приоритетного управления, на которые также подаются сигналы от панелей резервного управления и иницилирующей части СУЗ-УСБ по проводным связям, что гарантирует выполнение защитных команд с большим приоритетом.

Непосредственно отказ СВБУ не вызывает отклонений технологических параметров, но приводит к потере нерезервированных функций контроля и управления оборудованием. Рассмотрим организацию пунктов управления (на примере БПУ как основного места контроля и управления задачами выработки электроэнергии и обеспечения безопасности), чтобы выявить основные случаи, которые требуют использования резервных средств.

Об организации пунктов управления

БПУ предназначен для обеспечения эффективного и безопасного централизованного автоматизированного управления оборудованием систем НЭ (включая контроль эксплуатационных пределов и условий), СБ и специальными техническими средствами управления запроектными авариями (ЗПА) при НЭ и нарушениях нормальных условий эксплуатации (ННУЭ), включая проектные аварии [4].

В принятой организации АРМ, мозаичных панелей и экрана коллективного пользования (ЭКП), а также в объеме возможностей, представляемых системой контроля и управления, для всех режимов эксплуатации образуются основная, вспомогательная и резервная зоны контроля и управления. Компонировка БПУ представлена на рис. 1 (подробнее в [5]).

- Основная оперативная зона предназначена для:
- контроля и управления основным оборудованием реакторной установки (РУ) и турбинной установки (ТУ), предназначенным для надежной выработки электроэнергии;
 - контроля безопасности;
 - информационной поддержки персонала.
- Вспомогательная оперативная зона предназначена для:
- контроля и управления вспомогательным оборудованием РУ и ТУ;
 - контроля и управления средствами пожаротушения.

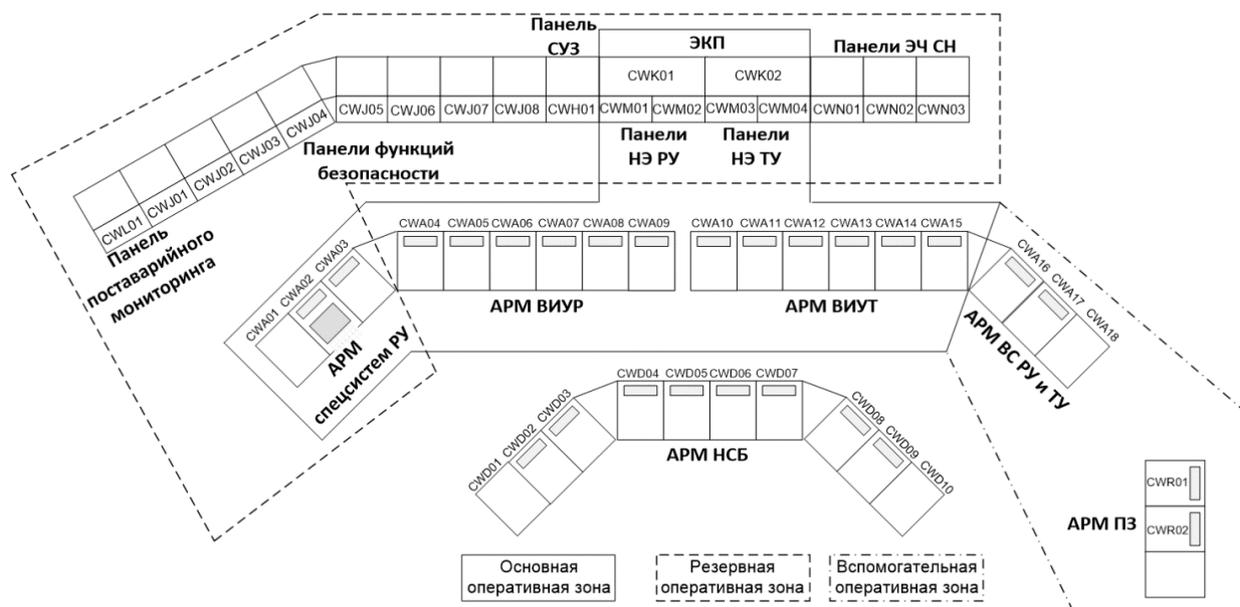


Рис. 1. Компоновка БПУ

- Резервная оперативная зона управления предназначена для:
- контроля и управления минимально необходимым объемом оборудования НЭ РУ, ТУ и электроснабжения собственных нужд при переводе энергоблока в состояние «Холодный останов» при полном отказе средств основной оперативной зоны управления и возникновении переходных режимов или невозможности восстановления СВБУ в течение установленного периода времени (как правило, 2 часов при условии поддержания стационарного режима и введении запрета на технологические переключения);
 - контроля выполнения защитных программ ФБ и их резервного дистанционного запуска при отказе автоматического запуска;
 - индивидуального управления оборудованием СБ, задействованного при работе ФБ, в связи с наличием приоритетов различных способов управления (низкий приоритет дистанционного автоматизированного управления с АРМ по сравнению с высоким приоритетом команд УСБ и команд от мозаичных панелей), а также исходя из организационно-технических ограничений при работе в условиях ННУЭ после завершения времени невмешательства, обеспечиваемого УСБ.

Резервная оперативная зона включает АРМ спецсистем, ЭКП и мозаичные панели.

Компоновка БПУ является несимметричной относительно центральной оси. Центральным элементом является ЭКП, состоящий из 8 экранов. Слева от ЭКП расположены панель управления ЗПА, панели управления СБ и ФБ (по 2 на канал безопасности с обеспечением физического и гальванического разделения каналов) и панель контроля положения групп органов регулирования СУЗ и нейтронно- физических параметров реакторной установки, справа – панели ЭЧ СН, под ЭКП – резервного управления оборудованием НЭ РУ и ТУ. Рассмотрим подробнее особенности организации и применения панелей резервного управления.

Организация мозаичных панелей

В основном панели применяются на блочном и резервном пунктах управления, однако также традиционно используются для управления выдачей электроэнергии в сеть с ЦПУ.

Для панелей используются следующие конструктивы:

- секции управления и контроля с размером вертикальной части - 800×1250мм, пультовой части - 800×625мм. Подобные секции используются для панелей СБ, СУЗ, ЗПА, электрической части (ЭЧ) собственных нужд (СН);

- секции управления и контроля «рояльного» типа с размером вертикальной части - 1000×250мм, пультовой части - 1000×625мм для размещения панелей НЭ (под ЭКП);

- секции управления и контроля с размером вертикальной части - 1700×1250мм, без пультовой части. Подобные секции используются для панелей ЦПУ.

В ячейки панелей устанавливаются малогабаритные (25х50мм, 25х100мм, 50х50мм, 50х100мм, 100х100 мм) табло, приборы и динамические элементы сигнализации и управления, таким образом, рабочее поле набирается как мозаика из небольших стандартных элементов. Часть мозаичных ячеек панелей заполняются мнемоническими символами («линиями» трубопроводов, изображениями оборудования и т.п.) и текстовыми надписями (надписи на табло представляют собой краткое текстовое сообщение, позволяющее идентифицировать событие или отклонение). Общий объем активных элементов контроля и управления, размещенных на панелях БПУ, РПУ и ЦПУ составляет более 6000 единиц. Подробная информация о количестве панелей и различных видов приборов, размещенных на панелях, на примере референтного 1 блока Ленинградской АЭС-2 представлена в таблице ниже.

Таблица. Общий объем элементов мозаичных панелей

Тип панели	Количество БПУ/РПУ					
	Панели	Табло	Приборы	Управление	Сигнализация	Итого
Панели ЗПА	1/0	51/-	100/-	57/-	22/-	230/-
Панели ФБ	8/8	536/484	251/251	930/890	40/40	1757/1665
Панель СУЗ	1/1	78/71	22/16	12/10	-/-	112/97
Панели НЭ	4/4	9/14	111/116	191/194	19/19	330/343
Панели ЭЧ СН	3/0	186/-	107/-	128/-	20/-	441/-
Итого БПУ/РПУ	17/13	860/569	591/383	1318/1094	101/59	2870/2105
Панели ЦПУ	6	482	241	424	23	1170
Всего	36	1911	1215	2846	183	6155

При этом следует отметить, что элементы управления также предоставляют информацию о состоянии (Закрыт/Остановлен/Отказ/Открыт/Пущен/и т.п. для исполнительных механизмов, а также дополнительные сигналы режима (ручной или автоматический) для группового управления) управляемого оборудования, а приборы отображают предусмотренные для параметра уставки. Для сравнения, на БПУ энергоблоков ВВЭР-1000 «большой» серии оперативный контур содержит около 300 показывающих приборов, 700 сигналов о положении арматуры, 1600 табло сигнализации [6]. Таким образом, несмотря на «резервный» статус, современные панели предоставляют значительный объем информации.

Секции резервного управления оборудованием НЭ РУ и ТУ (рис. 2) содержат минимально необходимое оборудование вспомогательных систем РУ, а также оборудование конденсатно-питательного тракта, байпаса турбины и свежего пара для управления переводом энергоблока в «Холодное состояние» при полном отказе «дисплейных» средств управления.

Секции управления ФБ (компоновка представлена на рис. 3) предназначены для:

- контроля запуска защитных программ ФБ;
- контроля выполнения защитных программ ФБ;
- контроля сигнализации о неисправности оборудования;
- дистанционного запуска защитных программ ФБ;
- управления оборудованием СБ при наличии постулируемого исходного события в случае отказа защитных программ ФБ и по истечении времени невмешательства;

- управления переводом энергоблока в состояние «Холодный останов» при отказе СВБУ.

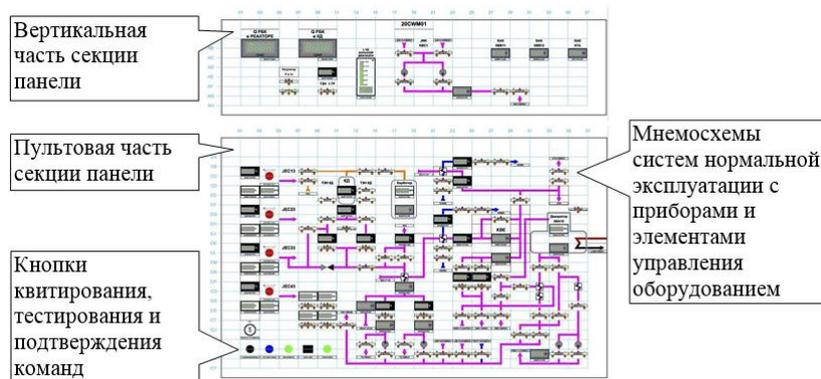


Рис. 2. Компоновка панели систем нормальной эксплуатации

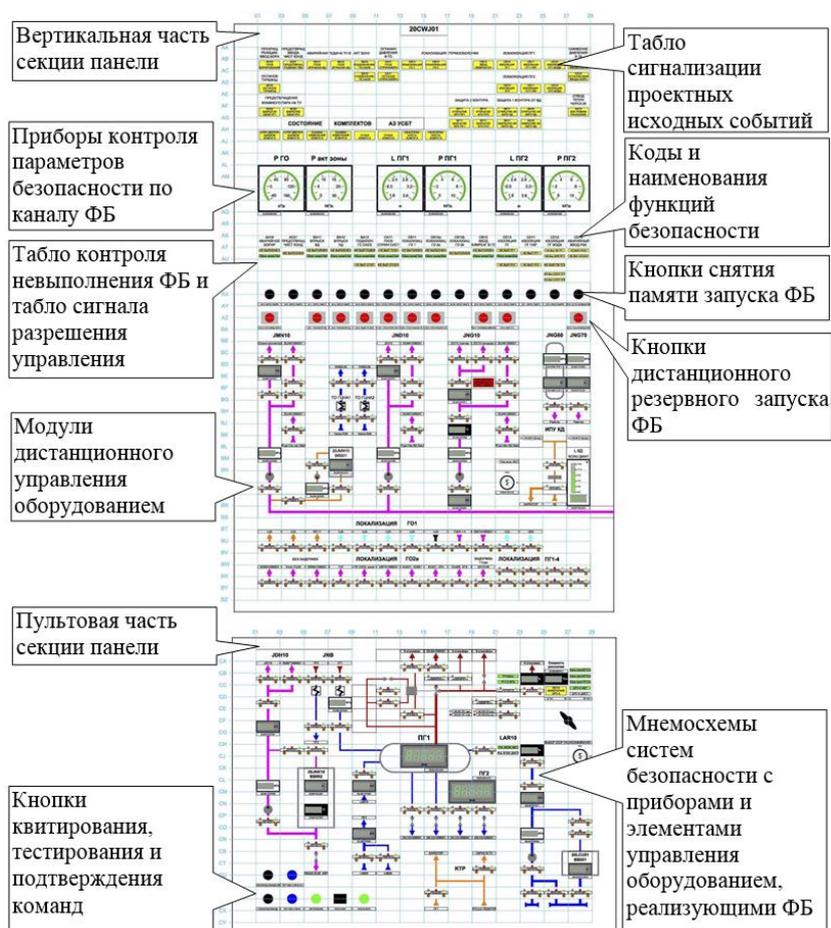


Рис. 3. Компоновка секции панели ФБ

Секция управления ЗПА предназначена для:

- контроля предельных значений водородной взрывобезопасности, активности воздуха в ГО;
- контроля параметров ловушки расплава и управления оборудованием поддержания условий отвода тепла от реактора и ловушки;
- контроля и снижения давления в реакторе при расплавлении активной зоны;
- управления пассивным отводом тепла от активной зоны и гермооболочки при обесточивании.

Секция системы управления и защиты реактора предназначена для:

- сигнализации о формировании условий срабатывания защиты реактора в каждом комплекте;
- индикации положения групп органов регулирования СУЗ;
- индикации нейтронно- физических параметров реакторной установки;
- оптико-акустической сигнализации контроля процесса перегрузки;
- инициализации аварийной защиты реактора;
- контроля готовности и периодической проверки функций СУЗ.

Расположение информации и органов управления на панелях выполняется с соблюдением эргономических требований и компоновкой информации по важности (сверху вниз) и по решаемой задаче с унификацией мозаичных элементов по виду, свойствам и принципам кодирования состояния и приоритета. Для кодирования используются комбинированный избыточный подход на основе изменения формы (размера), расположения, цвета, частоты мигания, а также звуковое и символьное (текстовое) кодирование. Предусмотрен как минимум двухступенчатый алгоритм ввода управляющих воздействий: одновременным нажатием кнопки выбора команды на мозаичном элементе и кнопки подтверждения, либо за счет использования ключей или кнопок с откидывающимися крышками. Выполнение подобных дополнительных действий (по заданию и подтверждению команд), непосредственно связанных с управлением технологическим процессом (т.е. «первичной» деятельностью), предотвращает ошибочные и/или непреднамеренные действия.

Снижение рассеивания внимания и утомляемости также достигается принципом «приглушенного экрана», который подразумевает использование пастельных цветов с низким контрастом для НЭ и применение ярких и контрастных цветов для визуализации отклонений.

Говоря о резервном управлении, также следует отметить необходимость организации РПУ, обеспечивающего возможность непрерывного контроля состояния реактора, его перевода в подкритическое состояние, расхолаживания и поддержания сколь угодно долгое время в подкритическом и расхолаженном состоянии, а также управления теплоотводом от бассейна выдержки при невозможности управления с БПУ [4], например, в результате пожара, затопления и других событий, вынуждающих оперативный персонал покинуть БПУ. Физическое разделение и проектные меры по автономности и пожарной безопасности исключают одновременную потерю БПУ и РПУ по общей причине, а решения, принятые в УСБ, обеспечивают контроль и управление с одного из постов при потере другого. При нормальном функционировании БПУ управление с РПУ заблокировано, а после выполнения процедуры перевода управления на РПУ исключается возможность прохождения ложных сигналов с БПУ. Распределение функций между автоматикой и оператором для РПУ аналогичны решениям, принятым для БПУ, а ЧМИ идентичен с точностью до отсутствующих в РПУ функций.

Заключение

Структура и состав аппаратно-реализованных мозаичных панелей, физически, гальванически и функционально отделенных от основного ЧМИ, реализованного на АРМ, позволяет контролировать состояние параметров безопасности и состояние оборудования, влияющего на основной технологический процесс и на безопасность блока, а также управлять оборудованием СБ при отказе их автоматического запуска или после истечения времени запрета на управление после запуска, на одном информационном поле при полном отказе средств дисплейного управления или переходе к проектным авариям.

Старая проблема громоздкости и унификации элементов панелей были решены с помощью перехода на «мозаичную» технологию, основные проблемы которой (малые размеры элементов, не позволяющие надежно считывать показания на расстоянии, перегруженность приборами и органами управления) нивелируются режимом их использования: панели выступают в качестве резервных средств управления при авариях и/или невозможности управления средствами СВБУ.

В дальнейшем необходимо рассмотреть возможность применения принципа «тёмной панели» («*dark-board*») [7] при котором предусматривается отсутствие индикации на панелях в условиях НЭ без сбоев.

Список литературы

1. X. Satoshi Hanada, Koji Ito, Kenji Mashio. The Human Factors Engineering Process and Human System Interface Design of the US-APWR.– Proceedings of ICAPP.– Nice, France, 2011.– P. 101-108.
2. IEC 60964:2009 Nuclear Power Plants - Control Rooms - Design (International Electrochemical Commission) (Атомные электростанции. Комнаты управления. Конструкция).
3. Licensing of safety critical software for nuclear reactors. Common position of international nuclear regulators and authorized technical support organizations. Revision 2015. 4. НП-001-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций».
5. Григорьев М.С. Разработка комплекса видеокадров системы представления параметров безопасности Ленинградской АЭС-2 / М.С. Григорьев, Ю.Н. Кудицкий // Сборник трудов международной научно-технической конференции «55 лет безопасной эксплуатации АЭС с ВВЭР в России и за рубежом», Нововоронеж, 2019. - С. 364-376.
6. Анохин А. Н., Острейковский В. А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 344 с.
7. IEC 61227:2008 Nuclear power plants – Control rooms – Operator controls.

УДК 621.039.516

**КОНТРОЛЬ МОЩНОСТИ, РЕАКТИВНОСТИ И ПЕРИОДА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
ПОСРЕДСТВОМ ОТОБРАЖЕНИЯ
БАЛАНСА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ**

ЮФЕРОВ А.Г.

Обнинский институт атомной энергетики

*- филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Обнинск, Российская Федерация)*

Аннотация. Рассматриваются возможности отображения мощности, реактивности и периода ядерного реактора на одном показывающем приборе. Описывается применение палеток, размещаемых на экране монитора, для упрощения визуальной оценки уровней стабилизации контролируемых величин и сопоставления их с уставками. В результате повышается оперативность и адекватность оценки текущего состояния ядерного реактора и тенденций изменения состояния.

Ключевые слова: реактивность ядерного реактора, период ядерного реактора, контроль ЯР

**CONTROL OF POWER, REACTIVITY AND PERIOD OF A NUCLEAR REACTOR
BY DISPLAY BALANCE OF RELATIVE SPEEDS OF PROCESSES**

ANATOLIY G. YUFEROV

*Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering
(Obninsk, Russian Federation)*

Abstract. Possibilities of displaying power, reactivity and period of a nuclear reactor on one indicating device are considered. Describes the use of pallets placed on the monitor screen to simplify the visual assessment of the stabilization levels of the controlled values and their comparison with the settings. As a result, the efficiency and adequacy of the assessment of the current state of the nuclear reactor and trends in the state change are increased.

Keywords: nuclear reactor reactivity, nuclear reactor period, nuclear reactor control

Введение

Совершенствование эргономических характеристик блочных щитов управления АЭС всегда будет актуальной задачей, связанной, в частности, с такими вопросами как повышение адекватности оценки оператором текущего состояния ядерного реактора и упрощение прогноза поведения реактора.

Правила ядерной безопасности реакторных установок АЭС предусматривают непрерывное измерение и отображение текущих значений плотности нейтронного потока (мощности ядерного реактора); скорости изменения плотности нейтронного потока (периода ядерного реактора) и реактивности, которая характеризует скорость изменения плотности нейтронного потока за счёт процессов на мгновенных нейтронах. Оператор ЯЭУ должен осуществлять контроль указанных величин в следующих отношениях:

- устанавливать факт стабилизации контролируемой величины на определённом временном интервале;
- сопоставлять достигнутое значение с заданными уставкам;
- оценивать допустимость скорости изменения контролируемой величины;
- оценивать направленность изменения контролируемой величины.

Однако современная аппаратура решает фактически только задачи измерения мощности, периода и реактивности, не предоставляя специальных средств для облегчения контроля данных величин в указанных отношениях [1,2]. Можно отметить следующие недостатки традиционных приборов отображения и контроля:

1. Фиксация факта стабилизации контролируемой величины затруднительна на цифровых показывающих приборах, поскольку требует от оператора запоминания предшествующих значений на приборе и мысленной оценки интервала постоянства этих значений.

2. Отображение контролируемых величин только в виде текущих мгновенных значений не позволяет дать прогноз состояния ядерного реактора.

3. Использование графиков с временной развёрткой для отображения контролируемых величин ограничивает представление информации конечным временным интервалом, что затрудняет учёт предыстории процесса и ухудшает возможность визуальной экстраполяции контролируемых величин.

4. Измерение контролируемых величин посредством различных технических средств и в различных шкалах обуславливает необходимость использования нескольких показывающих приборов, что ухудшает эргономику БЩУ.

5. Использование нескольких показывающих приборов с различными шкалами затрудняет контроль информации о состоянии ядерного реактора.

6. Не предусмотрено непосредственное отображение скорости изменения контролируемых величин.

В работе рассматриваются некоторые возможные пути и приёмы устранения указанных недостатков.

Уравнение реактиметра-периодомера

Вопросы улучшения адекватности и точности измерения мощности, периода, реактивности естественно рассматривать во взаимосвязи, поскольку данные величины определяются одним уравнением динамики ЯР, которое можно записать в следующей форме [3,4]:

$$v(t) = r(t)n(t) - \int_0^t h(t-\tau)v(\tau)d\tau + Q(t). \quad (1)$$

Здесь скорость репродукции популяции нейтронов (скорость изменения мощности ЯР) $v(t) = dn/dt$, функция репродукции предшественников запаздывающих нейтронов (ПЗН)

$$h(t-\tau) = \sum_{j=1}^J (\beta_j / \Lambda) \exp(-\lambda_j(t-\tau)),$$

интеграл репродукции ПЗН $Y(t) = \int_0^t h(t-\tau)v(\tau)d\tau$.

Для решения измерительных задач уравнение (1) удобно представить в форме уравнения реактиметра-периодомера, аналогичного «обращённому решению уравнения кинетики»:

$$r(t) = \alpha(t) + Y(t)/n(t) + Q(t)/n(t), \quad (2)$$

выражающего баланс относительных скоростей нейтронных процессов:

- относительной скорости репродукции популяции нейтронов – обратного периода

$$\alpha(t) = v(t)/n(t);$$

- относительной скорости репродукции мгновенных нейтронов - реактивности в Λ -шкале

$$r(t) = \rho(t)/\Lambda;$$

- относительной скорости репродукции предшественников запаздывающих нейтронов

$$Y(t)/n(t);$$

- и относительной интенсивности источника

$$Q(t)/n(t).$$

(В приведённых соотношениях использованы стандартные обозначения: ρ – абсолютная реактивность, Λ – время генерации мгновенных нейтронов, β_j, λ_j - доли групп и постоянные распада ПЗН.)

В уравнении (2) реактивность и обратный период выражаются в обратных единицах времени. Это позволяет отображать их на графике посредством одной шкалы, размеченной, например, в обратных секундах. (Или в герцах, для интерпретации указанных величин как характеристик частоты обновления нейтронного поля.)

Унификация отображения и контроля

В эксплуатационных режимах ядерного реактора быстро устанавливается равновесие между процессами на мгновенных нейтронах (характеризуемых реактивностью $r(t)$) и

процессами репродуцирования ПЗН (характеризуемых величиной $Y(t)/n(t)$), то есть значения величин $r(t)$ и $Y(t)/n(t)$ всегда достаточно близкие (рисунок 1). Поэтому на показывающий прибор удобно выводить графики $r(n)$ и $Y(t)/n(t)$, размещая по оси абсцисс шкалу мощности. Расстояние между указанными графиками равно обратному периоду. Таким путём на одном показывающем приборе отображаются и мощность, и все контролируемые величины – слагаемые балансного уравнения (2). Здесь не нарушается известный принцип «одно измерение – один индикатор», поскольку это слагаемые одной величины – скорости изменения мощности ЯР.

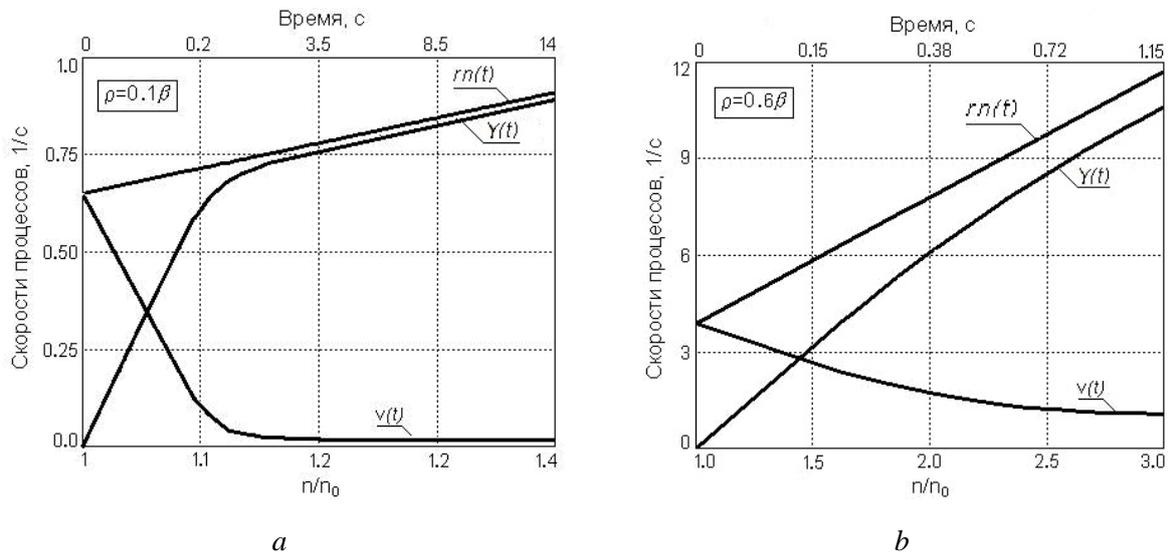


Рис. 1. Поведение скоростей процессов после ввода ступеньки реактивности:
 a – $\rho = 0.1\beta$; b – $\rho = 0.6\beta$

Выбор мощности в качестве аргумента отображаемых функций позволяет при необходимости сохранить на мониторе всю историю контролируемого процесса (рисунок 2, б), не ограничиваясь определённым интервалом времени, как это происходит при традиционной временной развертке контролируемых величин (рисунок 2, а).

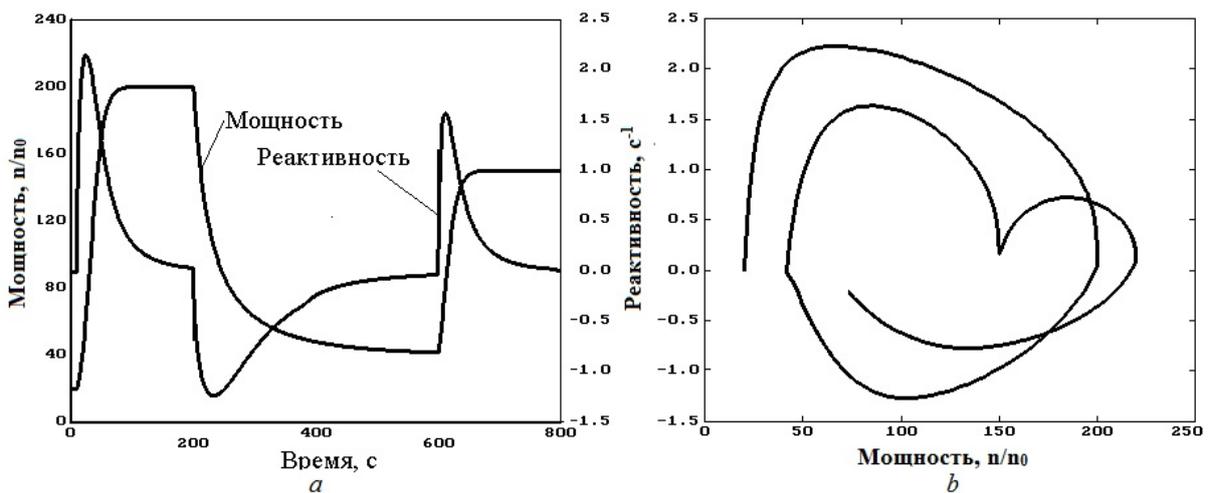


Рис. 2. Отображение мощности и реактивности:
 a – развёртка во времени, b – в координатах «мощность-реактивность»

При использовании мощности в качестве аргумента рассматриваемых функций контроль всех величин выполняется по следующей общей схеме. На монитор выводится график контролируемой величины $x(n)$ вместе с измерительной палеткой, выполненной в виде сетки пересекающих поле графика прямых $x(n) = a + b \cdot n$, где b есть уставка на относительную скорость изменения выведенной на график контролируемой величины x : $dx/dn \leq b$. Достижение

или превышение уставки фиксируется визуально как возможное пересечение или асимптотическое достижение одной из прямых $x=a+b*n$ графиком $x(n)$ снизу. Факт стабилизации мощности на некотором уровне n_c фиксируется как приближение линии графика $x(n)$ к нулю ординаты в точке $n = n_c$, факт стабилизации относительной скорости изменения контролируемой величины x фиксируют как появление на графике линейного участка $x(n) = c+d*n$. Относительная скорость изменения контролируемой величины оценивается по линейному участку как dx/dn . Выдачу управляющих воздействий, соответствующих установившейся относительной скорости изменения контролируемой величины, осуществляют, если интервал линейности по оси абсцисс, то есть приращение мощности при экспоненциальном росте, превышает заданное значение.

Согласно описанной схеме контроль периода ядерного реактора удобно осуществлять по его обратному значению $\alpha=1/p$. Для этого на показывающий прибор выводится график скорости изменения мощности $v(n)$ и контрольные палетки, выполненные в виде сетки пересекающих поле графика прямых $v(n) = c+an$. Коэффициент a принимает значения уставки относительной скорости изменения мощности 0.1, 0.05, 0.025, что соответствует уставкам периода в 10 секунд на сброс АЗ, в 20 секунд на сигнал предупредительной защиты и ввод в активную зону управляющей группы ОР СУЗ, в 40 секунд на запрет подъема управляющей группы ОР СУЗ. Факт стабилизации периода p , то есть экспоненциальное изменение мощности $n(t)=exp(t/p)$, фиксируют как появление на графике линейного участка $v(n) = c+n/p$, значение установившегося периода оценивают по линейному участку как dn/dv , факт достижения или превышения уставки α фиксируют визуально как возможное пересечение или достижение одной из прямых $v(n) = c+an$ графиком $v(n)$ снизу (рисунок 3).

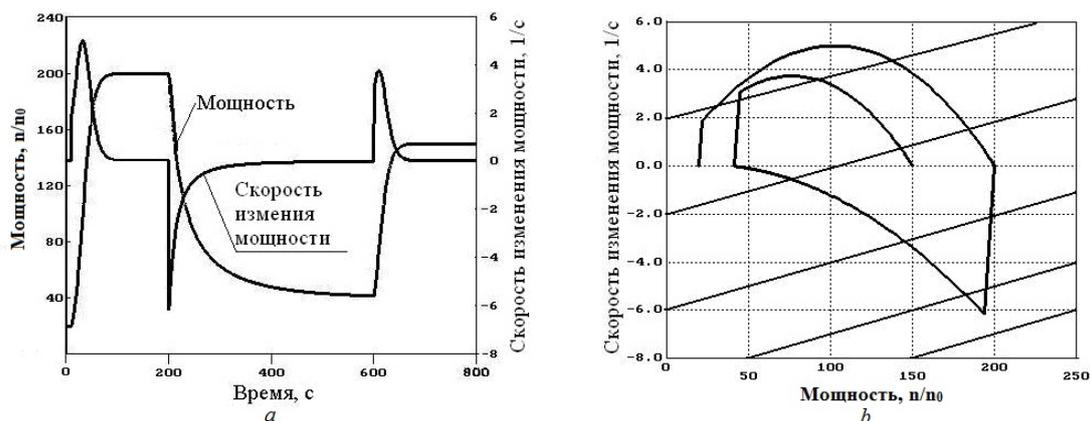


Рис. 3. Контроль стабилизации периода реактора:

a – развёртка во времени, *b* – в координатах «мощность-скорость изменения мощности»

Заключение

Описанные приёмы контроля мощности, периода и реактивности ядерного реактора достаточно легко осуществить в действующих АСУ ТП АЭС посредством предусмотренных в этих системах реактиметров, закладывая в вычислительный блок реактиметра отдельный расчёт слагаемых приведенного выше уравнения реактиметра-периодомера и обеспечивая вывод их графиков на экран монитора с наложением контрольных измерительных палеток.

Список литературы

1. Погосов А.Ю. Технические средства управления ядерными реакторами с водой под давлением для АЭС. Одесса: Наука и техника; 2012.
2. Юркевич Г.П. Системы управления энергетическими реакторами. М.: Издательство ЭЛЕКС-КМ; 2001.
3. Юферов А.Г. Квадратурные формулы для интегральных уравнений кинетики и цифровых реактиметров. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017; 2: 93-105.
4. Юферов А.Г. Схемные решения реактиметров. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2019; 4: 95-108.

УДК 681.5

КВАЛИФИКАЦИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ

АГАФОНОВ С.А., КУЗНЕЦОВ А.Н., ОСТАНИН С.М.

АО «РАСУ»

(Москва, Российская Федерация)

Аннотация. В данной статье описываются методы квалификации, верификации и валидации АСУ ТП в рамках работ АО «РАСУ» согласно собственному процессу ВиВ. Схема процесса представлена на рис. 1.

Ключевые слова: верификация, валидация, квалификация, ПКТД, видеокادر СВУ, ППО ПТК, требования, идентификатор, план, АСУ ТП, ТЗА.

QUALIFICATION, VERIFICATION AND VALIDATION

S.A. AGAFONOV, A.N. KUZNETSOV, S.M. OSTANIN JSC RASU

(Moscow, Russian Federation)

Abstract. This article describes the methods of I&C qualification, verification and validation within the framework of the work of JSC RASU according to its own V&V process. A diagram of the process is presented in picture 1.

Keywords: verification, validation, qualification, DETD, videoframes of Upper-level system, I&C system application software, requirements, identifier, plan, I&C, SRA.

На рис. 1 приведена схема процессов квалификации, верификации и валидации.

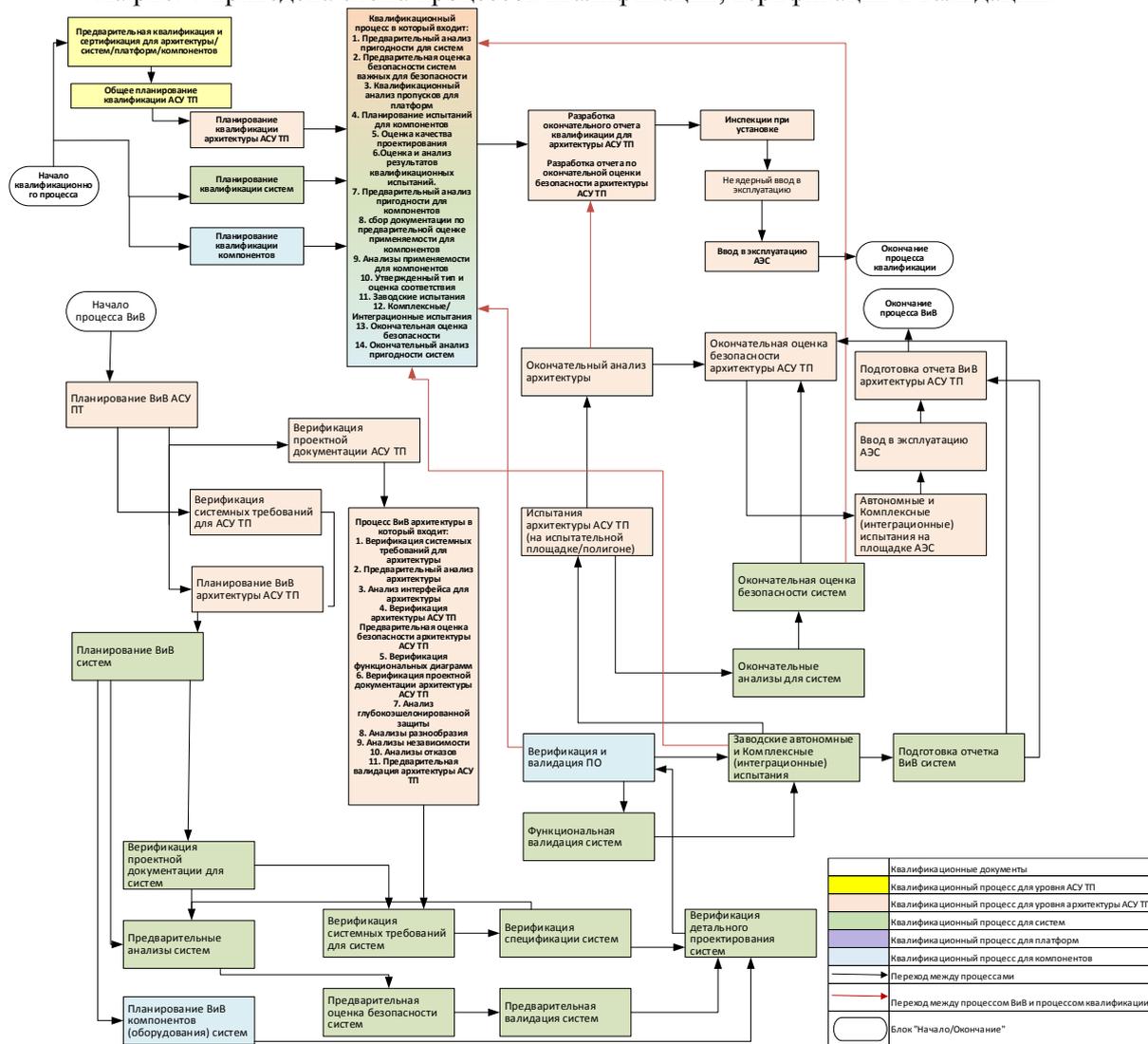


Рис. 1. Схема процессов квалификации, верификации и валидации

Квалификация АСУ ТП

Как видно из схемы процесса одним из важнейших этапов разработки АСУ ТП является квалификация, который идет параллельно этапам верификацией и валидацией и тесно с ними связан.

Под **квалификацией** подразумевается процесс определения соответствия системы или компонентов эксплуатационным условиям. Квалификация осуществляется для установления соответствия определенного класса системы контроля и управления определенному набору квалификационных требований.

На начальном этапе квалификации выполняется планирование квалификации архитектуры АСУ ТП, планирование квалификации систем, а также планирование квалификации компонентов.

После проведения всех действий квалификационного процесса разрабатывается окончательный отчет квалификации для архитектуры АСУ ТП, а также отчет, по окончательной оценке, безопасности архитектуры АСУ ТП, после которых проводится инспекции по установке и ввод в эксплуатацию АЭС.

Далее на схеме процесса видно, что следующими этапами являются верификация и валидация (ВиВ) которые также являются важными стадиями разработки АСУ ТП.

Под **верификацией** подразумевается процесс проверки выполнения на каждом этапе разработки цифровой компьютерной системы всех требований, накладываемых предыдущим этапом.

Под **валидацией** подразумевается процесс подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены.

На этапах верификации и валидации (ВиВ) началом процесса является планирование ВиВ АСУ ТП которое разделяется на планирование ВиВ архитектуры АСУ ТП, верификацию системных требований для АСУ ТП, верификацию проектной документации АСУ ТП, а также планирование ВиВ систем.

Одним из важных подразделов Планирования ВиВ систем является верификация проектной документации для систем, которую рассмотрим подробно. В данную верификацию входит верификация проектно-конструкторской технической документации (ПКТД) и техническое задание на автоматизацию (ТЗА).

Верификация ПКТД

Проведение работ по анализу ПКТД осуществляется в соответствии с Техническим заданием на оказание услуг по теме «Оказание консультационных услуг по проектной документации АСУ ТП для энергоблоков атомной станции» и «Общим планом верификации и валидации для АСУ ТП».

Целью проведения анализа ПКТД, разработанной на стадии проектирования АСУ ТП является обеспечение соответствия выходных данных проектирования и разработки (разработанного ПКТД) исходным данным к проектированию и разработке, в том числе оценка применимости и возможности использования в существующих проектных решениях.

Критериями соответствия разработанной ПКТД исходным данным является проверка на адекватность, проверка на внутреннюю согласованность, проверка на соответствие исходным данным, проверка на применимость, а также проверка на возможность использования существующих решений.

Критерием успешности анализа проектной, конструкторской, технической документации является условие: проектные решения, содержащиеся в ПКТД, разработаны в соответствии с исходными данными и являются однозначными, непротиворечивыми, полными и прослеживаемыми, а также применимыми в проекте.

Результаты анализа ПКТД оформляются в Отчете об анализе ПКТД (далее - Отчет).

Отчет об анализе ПКТД включает в себя сведения об объекте анализа (полное наименование, обозначение, номер ревизии/изменения ПКТД), дату проведения анализа, список исполнителей, проводивших анализ, сведения об отчете анализа, цель анализа, перечень проверок, объем проверок, сведения об исходных данных, сводка замечаний по результатам

анализа, в которой отражены, перечень замечаний и связанные с ними предложения по коррекции замечаний, результаты взаимодействия с разработчиком по устранению замечаний.

Отчет об анализе ПКТД должен быть идентифицирован: присвоено обозначение Отчета, указана дата составления Отчета. Каждому Отчету присваивается уникальное обозначение. После того как будет проведен анализ всех документов, отчеты об анализе передаются ГИПу от Заказчика.

Верификация ТЗА

Целью проведения мероприятий по верификации Технологические задания на автоматизацию (далее ТЗА) является подтверждение взаимного соответствия объектов, входящих в состав ТЗА, а также подтверждение соответствия ТЗА функциям технологической системы АСУ ТП, заявленным в проекте.

Объектами верификации являются Технологические задания на автоматизацию подсистем АСУ ТП, в состав которого входят технологические алгоритмы (алгоритмы ТЗБиС), технологические схемы (P&I-диаграммы технологических схем), технологическое задание на запорную арматуру (ТЗ на запорную арматуру), технологическое задание на регулируемую арматуру (ТЗ на рег. арматуру), технологическое задание на регуляторы (ТЗ на регуляторы), технологическое задание на точки теплотехнического контроля (ТЗ на точки контроля), технологическое задание на точки радиационного контроля (ТЗ на точки радиационного контроля), технологическое задание на перечень арматуры (ТЗ «перечень арматуры»), технологическое задание на механизмы (ТЗ на механизмы), технологическое задание на сигналы (ТЗ «перечень сигналов»), а также технологическое задание на перечень алгоритмов (ТЗ «перечень алгоритмов»).

При верификации ТЗА применяются метод анализа, который определяет пригодность, адекватность и результативность объекта для достижения заданных целей; метод экспертизы, который позволяет рассмотреть, исследовать какие-либо вопросы, решение которых требует специальных знаний. Тип работы со знаниями направлен на применение уже имеющихся знаний для подготовки и принятия решений.

Верификация ТЗА считается завершенной успешно если объем работ (тип проверок) применительно к верификации технологических заданий на автоматизацию выполнен полностью, замечания к ТЗА, выявленные при верификации, устранены или обосновано сняты, проведена повторная верификация после устранения замечаний, оформлен «Отчёт о верификации ТЗА».

Также более подробно рассмотрим верификацию прикладного программного обеспечения (ППО), в которую входит верификация видеокладов систем верхнего уровня (СВУ) и верификация ППО программно-технического комплекса (ПТК).

Верификация видеокладов СВУ

Целью проведения верификации видеокладов СВУ является подтверждение соответствия видеокладов требованиям, определенным в исходных данных для разработки, а также подтверждение корректности представленной информации.

При верификации видеокладов СВУ применяется метод статического анализа, который заключается в применении SQL запросов к информации, размещенной на видеокладах и метод экспертизы, который позволяет визуально проверить видеоклад.

В зависимости от исходных данных, по которым были разработаны видеоклады, проводятся проверки на соответствие ЗЗИ на видеоклады; на соответствие ТЗ на разработку видеокладов; на наличия сигналов, реализованных на видеокладах, в РБД СВУ; на соответствие технологическим схемам по полноте и размещению элементов; на корректность отображения технологических параметров, в том числе цветовой кодировки; проводится анализ видеокладов на удобочитаемость, информативность и единство предоставления информации, а также проводится сравнительный анализ видеокладов энергоблоков-аналогов.

Верификация видеокладов считается завершенной успешно если работы и операции, выполнены полностью для всех типов видеокладов; выполнены требования, определенные в исходных данных; устранены или обоснованно сняты замечания и несоответствия к

видеокадрам и исходным данным; проведена повторная верификация после устранения замечаний и несоответствий; новых замечаний не выявлено; оформлен отчет о верификации видеокадров.

После всей проделанной работы отчет передается в департамент СВУ для установки ВК на энергоблок АЭС.

Верификация ППО ПТК

Целью проведения верификации ППО ПТК является подтверждения соответствия ППО ПТК исходным данным для разработки, а также подтверждения работоспособности ППО и корректности выполнения основных функций ПТК на математической модели ППО.

При верификации ППО ПТК применяются метод экспертизы который заключается в визуальной проверке алгоритмов, реализованных в модуле МРТА САПР АРИУС, на соответствие алгоритмов ТЗБиС (состав входных и выходных сигналов / команд ТА, логика обработки сигналов); метод статического тестирования, который заключается в тестировании алгоритмов на математической модели. Тестирование проводится как отдельно для каждого алгоритма, так и для нескольких алгоритмов связанных между собой с помощью средств моделирования, встроенных в МРППО САПР АРИУС и метод статического анализа, который заключается в применении SQL запросов к данным ППО ПТК, представленным в табличной форме (перечни сигналов, настроечные параметры и т.д.).

Верификация прикладной структуры считается завершенной успешно если работы и операции, выполнены полностью; все замечания к ППО, выявленные при верификации, устранены или обоснованно сняты; проведена повторная верификация в объеме изменений после устранения замечаний и несоответствий; новых замечаний не выявлено, оформлен отчет о верификации ППО ПТК.

После проделанной работы отчет передается на Энергоблок АЭС для установки ППО ПТК на оборудование.

Валидация АСУ ТП

В процесс валидации АСУ ТП включаются заводские автономные испытания АСУ ТП; автономные испытания АСУ ТП на площадке АЭС; комплексные (интеграционные) испытания межсистемного интерфейса связи СВУ и смежных систем АСУ ТП на полигоне завода-изготовителя и площадке АЭС.

Заводские автономные испытания АСУ ТП

Заводские автономные испытания на полигоне завода-изготовителя проводятся для подтверждения функционирования разработанного оборудования, в соответствии с требованиями спецификации требований к системам АСУ ТП.

Валидация АСУ ТП проводится для того, чтобы показать, что система соответствует всем положениям спецификации требований к системе и установленному программному обеспечению.

Проверки осуществляются согласно программам и методикам, разработанным на этапе «Рабочий проект». В программах и методиках испытаний содержатся требования по комплектности

испытываемой системы, перечни, виды и условия тестирования, спецификация требований, подлежащих тестированию, методы тестирования, критерии успешности испытаний.

Виды и методы проводимых тестов уточняются конкретно для каждой системы АСУ ТП, а также определяются инструменты валидации.

Результаты тестов, проведенных согласно программам и методикам испытаний, документируются, фиксируются замечания по несоответствиям. Результаты валидации АСУ ТП, с описанием проведенных работ, включаются в отчет о валидации.

К отчету прилагаются результаты проведения валидации, а именно, обнаруженные несоответствия и запланированные мероприятия по их устранению.

В протоколах по результатам испытаний систем АСУ ТП, дается заключение о соответствии основных характеристик систем АСУ ТП требованиям спецификации требований к системам АСУ ТП и указываются выявленные при испытаниях замечания.

Автономные испытания АСУ ТП на площадке АЭС

Автономные испытания АСУ ТП - испытания (тесты), проводимые с целью определения возможности допуска частей (подсистем) АСУ ТП к комплексным испытаниям по мере их готовности к опытной эксплуатации, обеспечивающие полную проверку функций и процедур в соответствии с программой и методикой, согласованных с заинтересованными организациями, проверку основных временных характеристик функционирования программных средств, надежности и устойчивости функционирования программных и технических средств.

Входными данными являются акты монтажа, акт проведения испытаний при приемке, программы и методики автономных испытаний систем АСУ ТП, а также рабочая конструкторская и эксплуатационная документация на системы АСУ ТП.

При валидации необходимо подтвердить, что система АСУ ТП функционирует в соответствии с требованиями, содержащимися в программах и методиках автономных испытаний систем АСУ ТП.

Выходными данными являются акты и протоколы проверок о выполнении программы автономных испытаний и отчетные документы.

Комплексные (интеграционные) испытания межсистемного интерфейса связи СВУ и смежных систем АСУ ТП на полигоне завода-изготовителя и площадке АЭС

Комплексные (интеграционные) испытания межсистемного интерфейса связи СВУ и смежных систем АСУ ТП – комплекс работ по проверке функционирования межсистемного интерфейса связи оборудования системы верхнего уровня (СВУ) и интегрируемой системы АСУ ТП, а также проверке функционирования программного обеспечения шлюза связи интегрируемой подсистемы АСУ ТП, проводимый на полигоне завода-изготовителя и площадке АЭС с целью подтверждения выполнения требований нормативных документов, заводской и проектно-конструкторской документации к полноте и качеству межсистемного обмена данными и необходимый для обеспечения проведения дальнейших пусконаладочных работ оборудования АСУ ТП.

Входными данными является спецификация комплексные (интеграционные) испытания АСУ ТП, программа и методика комплексные (интеграционные) испытания систем АСУ ТП, рабочая конструкторская и эксплуатационная документация на системы АСУ ТП.

При валидации необходимо подтвердить, что проведены комплексные (интеграционные) испытания систем АСУ ТП; проведена валидация результатов комплексные (интеграционные) испытания (оформлена и подписана документация, подтверждающая правильное проведение комплексные (интеграционные) испытания систем АСУ ТП).

Выходными данными являются результаты комплексные (интеграционные) испытания АСУ ТП, которые оформляются актами приемки межсистемного интерфейса сопряжения систем АСУ ТП в опытную эксплуатацию каждой интегрируемой системы АСУ ТП и отчетные документы.

Результаты и их обсуждение

В данной статье описаны методы квалификации, верификации и валидации АСУ ТП согласно процессу, разработанному АО «РАСУ». Этот процедура является инструкцией для специалистов, занимающихся экспертным анализом, статическим анализом и статическим тестированием, а также валидацией АСУ ТП.

Процесс верификации документов регулярно обновляются с учетом полученного опыта и нововведений в области проектирования АСУ ТП. Проблемой в данной области по-прежнему остается трудоемкость, так как верификация документа экспертным анализом занимает достаточно большое время. Но мы разработали несколько полезных программ для автоматизации процесса. Эти программы проверяют документ на нормоконтроль, содержание

(наличие необходимых разделов документа), наличие идентификаторов требований и т.д. - в целом на все, что не требует глубокой экспертизы.

Также для верификации видеокадров СВУ или ППО ПТК для каждого метода используют средства, разработанные в АО «РАСУ», например, для верификации видеокадров методом экспертизы» используется ПО ПОРТАЛ, которое обеспечивает визуальное представление состояния контролируемого объекта. Для автоматизации проверок при методе статического анализа используется модуль верификации прикладного ПО в части видеокадров, который обеспечивает автоматизированное считывание в СУБД содержимого SVG-файлов видеокадров, РБД и прочих исходных данных, автоматизированное сравнение загруженных данных, а также анализ этих данных при помощи SQL запросов. При верификации ППО ПТК методом экспертизы используется модуль разработки технологических алгоритмов в составе САПР «АРИУС». Данный модуль предназначен для автоматизированной разработки технологических алгоритмов в формализованном графическом виде и верификации разработанных алгоритмов. Для метода статического тестирования используется модуль разработки задания на ППО в составе САПР «АРИУС». Модуль обеспечивает навигацию, предназначенную для оперативного перехода к необходимым листам функциональных планов, имитацию сигналов датчиков, имитацию срабатывания сигнализации (сигналов превышения уставок), имитацию исполнительных механизмов (вентилей запорных, регулирующих клапанов, секционных выключателей и др.), автоматизированное сравнение версий функциональных планов. Для автоматизации проверок при методе статического анализа используется модуль верификации прикладного ПО. Модуль обеспечивает автоматизированное считывание в СУБД содержимого БД ЗЗИ ПТК и резервных копий ППО, автоматизированное сравнение и анализ считанных данных при помощи SQL запросов, а также автоматизированное формирование журналов замечаний.

При проведении валидации АСУ ТП используются имитаторы исполнительных механизмов (запорной арматуры, регулирующих клапанов, двигателей, соленоидных клапанов), имитаторы каналов ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, программатор программно-технического средства (ПТС).

Все эти средства позволяют быстро, а главное качественно выполнять верификацию и валидацию АСУ ТП.

Также стоит отметить, что данные методы и используемые средства для проведенных проверок и испытаний по верификации и валидации АСУ ТП были успешно применены для пуска Белорусской АЭС э\б 1,2; Ленинградской АЭС-2 э\б 1,2 и Нововоронежкой АЭС-2 э\б 1,2, а также при модернизации Калининской АЭС э\б 1 и Ростовской АЭС э\б 1.

Заключение

Верификация, квалификация и валидация – важные этапы жизненного цикла АСУ ТП. Наша сфера деятельности связана с безопасностью работы атомной станции, и цена ошибки очень высока. Именно поэтому необходимо наращивать опыт, расширять кругозор и совершенствовать данный процесс АСУ ТП.

УДК 621.311.25:621.039.5

**ОПЫТ ФИЗИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО
КОНТРОЛЯ ПРИ ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭНЕРГОБЛОКА №1
БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

КАЛИНУШКИН А.Е., КОВЕЛЬ А.И. МИЛЬТО Н.В., МУСИХИН А.М., СЕМЧЕНКОВ Ю.М.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
(Москва, Российская Федерация)*

САУНИН Ю.В., ДОБРОТВОРСКИЙ А.Н., КОРОЛЁВ А.С.

*АО «Атомтехэнерго», Нововоронежский филиал «Нововоронежатомтехэнерго»
(Нововоронеж, Российская Федерация)*

Аннотация. Доклад представляет основные сведения и особенности системы внутриреакторного контроля (СВРК) Белорусской АЭС, которая является одной из основных подсистем АСУ ТП и относится к системам нормальной эксплуатации важным для безопасности. Исходя из такой классификации СВРК, выполнение комплекса работ, называемых физическими испытаниями СВРК при вводе энергоблока АЭС в эксплуатацию, является одним из необходимых условий приёмки, как системы, так и энергоблока в целом в эксплуатацию. Результаты физических испытаний СВРК на разных этапах ввода в эксплуатацию подтвердили проектные характеристики системы с учётом ряда выявленных особенностей, которые не оказывают существенно влияние на представительность и надёжность выходной информации СВРК. Эти результаты показали хорошее соответствие с аналогичными результатами, которые были получены на ранее введенных в эксплуатацию и эксплуатируемых энергоблоках с ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006).

Ключевые слова: система внутриреакторного контроля, физические испытания, ввод в эксплуатацию, работоспособность каналов контроля, достоверность показаний каналов контроля

**EXPERIENCE OF PHYSICAL TESTS OF THE IN-CORE MONITORING SYSTEM
DURING COMMISSIONING OF POWER UNIT NO. 1 OF THE BELARUSIAN NPP**
KALINUSHKIN A.E., KOVEL A.I., MILTO N.V., MUSIKHIN A.M., SEMCHENKOV Y.M.

*National Research Center «Kurchatov Institute»
(Moscow, Russian Federation)*

Y.V. SAUNIN, A.N. Dobrotvorskii, A.S. KOROLIOV

*JSC «Atomtechenergo», Novovoronezh filial «Novovoronezhatomtechenergo»
(Novovoronezh, Russian Federation)*

Abstract. The report presents the main information and features of the in-core monitoring system (ICMS) of the Belarusian NPP, which is one of the main subsystems of I&C system and belongs to the systems of normal operation important for safety. Based on this classification of the ICMS, the implementation of a set of works called physical tests of the ICMS when the NPP power unit is put into operation is one of the necessary conditions for the acceptance of both the system and the power unit as a whole into operation. The results of physical tests of the ICMS at different stages of commissioning confirmed the design characteristics of the system, taking into account some of identified features that do not significantly affect to the representativeness and reliability of the output information of the ICMS. These results showed good agreement with similar results that were obtained at previously commissioned and operated power units with VVER-1200 (AES-2006 design).

Keywords: in-core monitoring system, physical tests, commissioning, operability of monitoring channels, reliability of readings of monitoring channels.

Введение

Выполнение ряда автономных и комплексных испытаний при вводе энергоблока АЭС в эксплуатацию является одним из необходимых условий приёмки, как отдельных систем, так и энергоблока в целом в эксплуатацию. В частности, для СВРК, исходя из ее технических и функциональных особенностей, одними из таких испытаний являются физические испытания СВРК (ФИ СВРК). На блоке №1 Белорусской АЭС ФИ СВРК были включены в этапные пусковые программы и выполнены в соответствии с рабочими программами, разработанными в установленном порядке.

Доклад представляет полученный опыт выполнения ФИ СВРК на основании учета проектных особенностей системы и обобщении результатов, полученных на разных этапах ввода в эксплуатацию и в разных эксплуатационных состояниях. Знание этого опыта важно, как для разработчиков системы, так и для пусконаладочного и эксплуатационного персонала, обеспечивающих на разных этапах жизненного цикла АЭС надежную и эффективную работу одной из подсистем в составе АСУ ТП энергоблока.

Краткое описание и основные проектные решения СВРК Белорусской АЭС

СВРК представляет собой функционально законченную систему в составе СКУД, связанную информационными потоками с другими системами СКУД и с внешними системами энергоблока. СВРК является одним из основных элементов, обеспечивающих контроль условий эксплуатации ядерного топлива, а также важнейших параметров, связанных с безопасностью эксплуатации реакторной установки. СВРК предназначена для обеспечения контроля активной зоны реактора на основе внутриреакторных измерений с целью безопасной и экономичной эксплуатации реакторной установки.

СВРК обеспечивает контроль нейтронно-физических параметров активной зоны, тепловой мощности РУ и теплогидравлических параметров первого и второго контуров, формирование и передачу защитных (АЗ) и управляющих (ПЗ-1, ПЗ-2) сигналов защиты по внутриреакторным локальным параметрам (запас до кризиса теплообмена, линейное энерговыделение твэлов), информационную поддержку оператора при управлении полем энерговыделения, представление информации о текущем состоянии активной зоны и основного оборудования РУ на мониторах СВРК и передачу данной информации (в том числе для отображения на БПУ) в СВБУ, а также контроль эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации, создание архива данных по истории эксплуатации активной зоны и основного технологического оборудования РУ, диагностирование собственных технических и программных средств.

Разработка СВРК выполняется с учетом требований, предъявляемых к системе, важной для безопасности и включающей в себя элементы систем безопасности. ПО СВРК разработано в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р МЭК 60880 и проходит процедуры верификации и валидации в соответствии с планами верификации и валидации.

В СВРК функционально входят: первичные преобразователи, кабельные трассы от первичных преобразователей до измерительной аппаратуры и программно-технический комплекс (ПТК) СВРК. ПТК СВРК состоит из ПТК нижнего уровня (ПТК-НУ) и ПТК верхнего уровня (ПТК ВУ). В свою очередь ПТК НУ подразделяется на ПТК защиты (ПТК-З) и ПТК информационно-управляющий (ПТК-ИУ). В ПТК ВУ входят: вычислительный комплекс (ВК СВРК), клеммные шкафы, рабочие места дежурного персонала, ПТК внутриреакторной шумовой диагностики (ПТК ВРШД), вычислительный комплекс системы комплексного анализа, шлюзы связи с СВБУ и со смежными системами АСУ ТП, вычислительный комплекс водно-химического режима, дублированная локальная сеть СВРК с сетевыми устройствами.

Основу СВРК составляют распределенные по сечению и высоте активной зоны нейтронные детекторы типа ДПЗ с эмиттером из родия, а также термоэлектрические преобразователи (ТП), расположенные на входе и выходе ТВС, а также под крышкой реактора. ДПЗ и ТП входят в состав сборок внутриреакторных детекторов (СВРД). В активную зону устанавливаются 54 СВРД, в каждом по семь ДПЗ. Это обеспечивает контроль энерговыделения в 378 точках активной зоны и контроль температуры в 154 точках.

Все первичные измерительные преобразователи в составе СВРК используются с индивидуальными функциями преобразования. Индивидуальные функции преобразования ТП и термопреобразователей сопротивления платиновых (ТС) определяются по данным заводской калибровки. Изначально индивидуальные функции преобразования ДПЗ определяются расчетным путем с помощью аттестованных расчетных программ. В процессе эксплуатации, индивидуальные функции преобразования ДПЗ (из-за непрерывного изменения коэффициента преобразования в процессе «выгорания» родиевого детектора) определяются расчетным методом по величине протекшего электрического заряда.

Аппаратура ПТК-З состоит из четырех независимых каналов, каждый канал ПТК-З размещается в отдельном изолированном помещении, которое отделено от помещений других

каналов противопожарной перегородкой. К каждому каналу ПТК-3 подведены кабельные трассы датчиков своего канала безопасности и по ним на вход измерительной аппаратуры поступают сигналы датчиков контроля теплотехнических параметров РУ, а также 1/4 часть всех СВРД. Аппаратура ПТК-ИУ связана с ВК СВРК информационными линиями связи, по которым постоянно идет односторонняя информация в ВК СВРК для обработки данных. Для обеспечения функционирования ПТК-3 в части формирования сигналов защиты периодически под контролем персонала осуществляется прием и обновление в ПТК-3 настроечной информации. ПТК-ИУ состоит из двух идентичных независимых информационно-измерительных устройств, имеющих выходы в локальную сеть СВРК. ПТК-ВРЩД предназначен для обработки переменной составляющей токов ДПЗ и для передачи в ВК СВРК обобщенной информации об аномалиях в активной зоне. СВРК обеспечен аппаратными и программными средствами самодиагностики. Диагностическое ПО служит для выполнения задач тестирования и контроля работоспособности аппаратных средств и системного программного обеспечения.

Структура и объем выполненных физических испытаний СВРК

Необходимость в проведении расширенного комплекса пусковых испытаний, получивших название физические испытания СВРК (ФИ СВРК), вытекает из функциональных и проектных особенностей СВРК [1] для обеспечения нормативных требований к системам нормальной эксплуатации важным для безопасности. Данные испытания проводятся практически на всех этапах пусконаладочных работ и предназначены для оценки качества монтажа измерительных каналов, правильности реализации алгоритмов функционирования и их достаточности, а также специальных испытаний для определения значений констант, используемых в базе данных СВРК [2, 3].

Комплекс ФИ СВРК для блока №1 Белорусской АЭС включил в себя следующие виды испытаний:

1. Проверка СВРК в части контроля состояния реакторной установки (РУ).

Испытания выполняются на подэтапе «Холодно-горячей обкатки (ХГО) РУ», этапах «Физический пуск» (в подкритическом состоянии, и при выводе реактора в критическое состояние), «Энергетический пуск» (на мощности 10 и 40%Nном), «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75, 90 и 100%Nном). Испытания требуют стационарных состояний при стабилизированных основных параметрах РУ. По результатам испытаний подтверждается выполнение функции контроля состояния РУ по ~1000 каналам контроля общетехнологических параметров (давления, перепады давления, температуры, расходы и т.д.), разбитым на несколько подгрупп исходя из технологических особенностей и функций СВРК.

2. Проверка СВРК в части температурного контроля теплоносителя 1 контура.

Испытания выполняются на подэтапе «Холодно-горячей обкатки РУ», этапах «Физический пуск» (в подкритическом состоянии) в стационарном по температуре теплоносителя состоянии и при разогреве, а также на этапах «Энергетический пуск» (на мощности 10 и 40%Nном), «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75, 90 и 100%Nном) в стационарном состоянии (при стабилизированных основных параметрах РУ). По результатам испытаний подтверждается выполнение функций температурного контроля теплоносителя 1 контура по более, чем 1000 каналам, разбитым на подгруппы исходя расположения первичных преобразователей и выполняемых функций СВРК.

3. Проверка СВРК в части контроля энерговыделения в активной зоне.

Данный вид испытаний выполняется на этапах «Энергетический пуск» (на мощности 40%Nном), «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75, 90 и 100%Nном). Испытания требуют стационарного состояния (при стабилизированных основных параметрах РУ), а также и разного положения групп ОР СУЗ. По результатам испытаний устанавливается достоверность показаний энерговыделения по ДПЗ с учетом констант переходной функции ДПЗ, правильность восстановления поля энерговыделения с учетом симметрии загрузки активной зоны и проектных нейтронно-физических характеристик.

4. Проверка СВРК в части контроля параметров локального энерговыделения по внутриреакторным параметрам в ПТК-3.

Этот вид испытаний выполняется на этапах «Энергетический пуск» (на мощности 40%Nном), «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75, 90 и 100%Nном). Испытания требуют стационарного состояния (при стабилизированных основных параметрах РУ), а также разного положения групп органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Кроме этого, испытания проводятся в состояниях с ксеноновыми колебаниями и при переходных режимах, вызванных отключениями главных циркуляционных агрегатов (ГЦНА). По результатам испытаний оценивается выполнение защитных функций, реализованных в ПТК-3.

5. Проверка СВРК в части контроля мощности реактора.

Данный вид испытаний выполняется на этапах «Энергетический пуск» (на мощности 50%Nном), «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75, 90 и 100%Nном). Испытания требуют стационарного состояния (при стабилизированных основных параметрах РУ), а также режимов при отключениях ГЦНА. По результатам испытаний оценивается выполнение функций контроля мощности реактора, и определяются оптимальные весовые коэффициенты для средневзвешенной мощности реактора с целью выполнения проектных требований.

6. Проверка СВРК при отключениях ГЦНА.

Данный вид испытаний выполняется на подэтапе «Холодно-горячей обкатки РУ», этапах «Физический пуск» (в подкритическом состоянии), «Энергетический пуск» (на мощности 50%Nном), «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75 и 100%Nном). Испытания выполняются при отключениях ГЦНА и в состояниях с неполным количеством работающих петель (при стабилизированных основных параметрах РУ). По результатам испытаний оценивается выполнение функций контроля параметров, зависящих от работы ГЦНА.

7. Проверка СВРК в части контроля локального кипения по ВРШД.

Данный вид испытаний выполняется на этапе «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75, 90 и 100%Nном). Испытания требуют стационарного состояния при стабилизированных основных параметрах РУ. По результатам испытаний подтверждается правильность диагностирования локального кипения теплоносителя в активной зоне подсистемой внутрореакторной шумовой диагностики.

8. Проверка СВРК в части водно-химического контроля теплоносителя 1 контура.

Данный вид испытаний выполняется на этапах «Энергетический пуск» (на мощности 50%Nном), «Опытно-промышленная эксплуатация» (на мощности 75, 90 и 100%Nном). Испытания требуют стационарного состояния при стабилизированных основных параметрах РУ. По результатам испытаний подтверждается правильность контроля параметров ВХР 1 контура, рассчитываемых модулем «МУХТАР», а также точность рекомендаций по дозированию реагентов поддержания ВХР теплоносителя.

9. Определение влияния теплогидравлических характеристик петель 1 контура на температуру на входе в активную зону.

Данные испытания выполняются на этапе «Физический пуск» в подкритическом состоянии. Испытания требуют состояний с различием температур в холодных нитках. По результатам испытаний определяются коэффициенты для расчета температуры на входе в каждую ТВС, которые вносятся в базу данных (БД) СВРК.

10. Проверка соответствия координат СВРД в активной зоне координатам СВРД, отображаемым в СВРК.

Данные испытания выполняются на этапе «Энергетический пуск» (на мощности 40%Nном). Испытания требуют состояний с разным положением отдельных ОР СУЗ. По результатам испытаний определяется правильность монтажных работ по подключению линий связи и заполнения БД СВРК.

Анализ основных результатов физических испытаний СВРК

Проведенные на подэтапе ХГО блока №1 Белорусской АЭС ФИ СВРК показали, что реализация функций контроля состояния РУ и температуры теплоносителя 1 контура в основном обеспечивает проектные требования для состояния «горячее» РУ (без мощности). В то же время, были выявлены следующие замечания по работе каналов контроля:

1) имеются два канала контроля температуры в петлях 1 контура по показаниям ТС с индивидуальными статическими характеристиками, чьи аддитивные поправки больше $0,3^{\circ}\text{C}$ (погрешность при измерении индивидуальных функций преобразования);

2) не реализовано демпфирование для датчиков контроля перепада давления на ГЦНА;

3) требуется сглаживание для показаний каналов контроля электрической мощности ГЦНА и перепада давления на реакторе;

4) в проекте неправильно указаны диапазоны значений для «горячего состояния» по перепаду давления на парогенераторах, расходу теплоносителя в петлях и через реактор;

5) при проектировании выбраны некорректные критерии для отбраковки резких изменений при отключении/подключении ГЦНА.

Испытания на этапе «Физический пуск» окончательно подтвердили правильную реализацию функций контроля состояния РУ и температуры теплоносителя 1 контура с учетом исправления замечаний по предыдущим работам.

По результатам испытаний термоконтроля в режимах «без мощности» для устранения систематических погрешностей были внесены поправки к показаниям всех каналов контроля температуры в петлях (по ТС) и в реакторе (по ТП). По результатам испытаний в части контроля состояния РУ были внесены изменения по расчету расхода теплоносителя в петлях при отключении ГЦНА (см. рис.1).

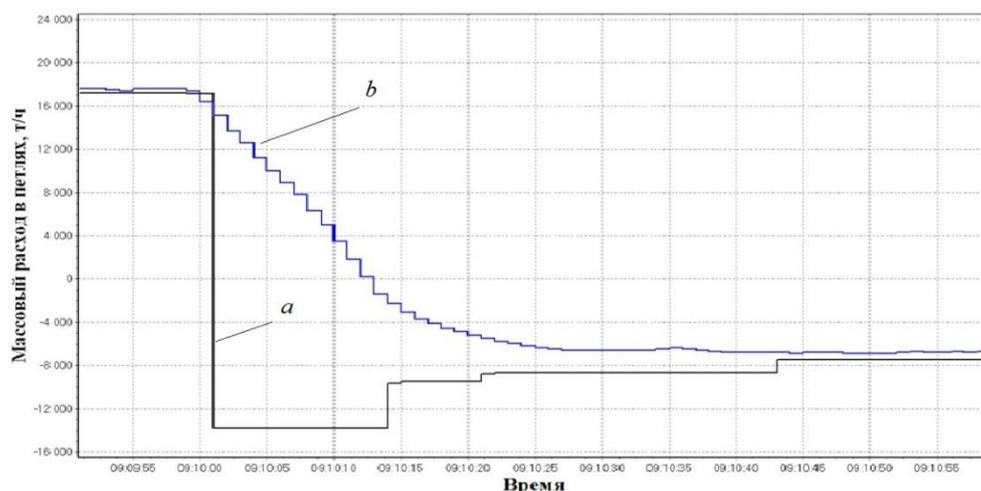


Рис. 1. Изменение расхода в петле при отключении ГЦНА в этой петле: *a* - до внесения изменений, *b* - после внесения изменений

Помимо этого, по результатам испытаний в части контроля состояния РУ были обнаружены и устранены ошибки в контроле давления пара в главном паровом коллекторе, в положении групп ОР СУЗ, а также были даны рекомендации по представлению информации СВРК для инженеров-физиков при выводе реактора в критическое состояние.

Результаты определения коэффициентов влияния для расчета температуры на входе в активную зону показали, что для блока №1 Белорусской АЭС сохраняются все особенности коэффициентов, выявленные по результатам аналогичных испытаний на других блоках АЭС с ВВЭР-1000 [4] и ВВЭР-1200. Кроме этого, был опробован новый алгоритм проведения данного вида испытаний и предложена его реализация при вводе в эксплуатацию блока №2.

Среди результатов, полученных при освоении проектной мощности, следует отметить те, которые имеют определенные особенности, связанные с особенностями теплогидравлических и нейтронно-физических процессов в РУ, а также с размещением первичных преобразователей. В частности, как и на всех блоках с ВВЭР [5], а также с PWR наблюдается неоднородное течение теплоносителя в горячих нитках петель 1 контура, что проявляется в значительном расхождении температуры по ТС размещенным в разных местах сечения трубопровода. Наибольшее расхождение $\sim 2,2^{\circ}\text{C}$ было зафиксировано при номинальном уровне мощности.

Аналогично другим блокам, где используются СВРД типа КНИТ, ТП на входе в активную зону (проектное обозначение - ТП-3) имеют завышенную относительно холодных ниток температуру. Данный факт возможно обусловлен наличием радиационного разогрева наконечника чехла, который может составлять 0,5 – 0,8 °С, а также подогревом теплоносителя, связанным с расположением ТП-3 выше начала топливной части активной зоны (около 60-80 мм). Это подтверждается тем, что отклонение средней в орбите симметрии температуры на входе от температуры в холодных нитках изменяется практически прямо пропорционально в зависимости от мощности реактора. Как говорилось ранее, в СВРД имеется две ТП на выходе (проектное обозначение - ТП-1А и ТП-1Б). Анализ отклонений показаний температуры теплоносителя на выходе из ТВС по ТП-1Б от ТП-1А показывает, что они не превышают 4 °С, что ниже значений, которые было получены на ранее вводимых блоках с ВВЭР-1200.

Стоит особенно отметить, что на блоке №1 Белорусской АЭС была выполнена перфорация каналов направляющих труб под СВРД в БЗТ. Это одна из мер, касающаяся повышения достоверности температурного контроля под крышкой реактора. Результаты испытаний каналов температуры под крышкой реактора показали, что только этой меры недостаточно и необходимы дальнейшие исследования. Эти исследования должны определить помимо технических мер также и организационные меры в части установления режимных требований и границ достоверности по этим каналам контроля с учетом выявленных особенностей.

Результаты испытаний по проверке энерговыделения показали выполнение критериев достоверности практически по всей активной зоне (на момент окончания испытаний было выявлено только шесть из 378 каналов с неработоспособными ДПЗ). Показания восстановленного поля энерговыделения имеют хорошую сходимость с расчетами по прогнозам программ «Имитатор реактора» (ИР) и «КАСКАД». Особенностью является то, что более высокие значения энерговыделения относительно прогнозных наблюдаются для центральных ТВС и, наоборот, более низкие - для периферийных ТВС. Также имеется занижение показаний КQ в ТВС, расположенных близко к патрубкам 1 и 3 петли, а у патрубков 2 и 4 петли значения в СВРК и ИР приблизительно одинаковые. Максимальные значения по линейному энерговыделению твэл и минимальные значения по запасу до кризиса теплообмена по данным СВРК превышали прогнозные данные. С учетом консервативности и выполненных критериев достоверности это обеспечивает более безопасную эксплуатацию.

Результаты испытаний каналов контроля мощности показали, что значения различных способов расчета, реализованных в алгоритмах СВРК, удовлетворяют проверочным расчетам и соответствует проектным характеристикам. Для повышения представительности контроля мощности реактора следует исследовать зависимость констант, вводимых в СВРК, от эксплуатационного состояния (уровень мощности реактора, количество работающих ГЦНА, положение ОР СУЗ, выгорание и т.д.). При выполнении этих условий, СВРК обеспечивает контроль средневзвешенной мощности реактора с погрешностью не более 1 %Nном, что даст возможность снижения консерватизма в проектных расчетах.

Заключение

Полученные результаты ФИ СВРК показывают, что система соответствует проектным требованиям и обеспечивает выполнение проектных функций по надежному контролю состояния активной зоны и энергоблока в целом. При этом, имеющийся и полученный новый опыт ФИ СВРК при вводе в эксплуатацию блока №1 Белорусской АЭС показывает, что возможно улучшение характеристик, как самой системы, так и применению новых подходов по контролю ее функционирования. В частности, это относится к возможностям расширения объема контроля и автоматизации диагностических процедур, выполняемых эксплуатационным и сопровождающим персоналом [6].

Список литературы

1. Калинушкин А.Е., Козлов В.В., Митин В.И., Семченков Ю.М. Система контроля, диагностики и управления для ЯЭУ большой мощности с водо-водяными реакторами. Атомная энергия, т. 106, вып. 1, 2009.
2. Саунин Ю.В. Разработка методик комплексных испытаний систем внутрореакторного контроля ВВЭР. Автореф. дис. канд. техн. наук. Мытищи-Нововоронеж, Подольск, ОКБ

«Гидропресс», 2010.

3. Добротворский А.Н. Разработка и обоснование методики определения средневзвешенной мощности реактора энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000. Автореф. дис. канд. техн. наук. Подольск, ОКБ «Гидропресс», 2017.

4. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Исследование температуры теплоносителя на входе в активную зону на примере реактора Тяньваньской АЭС (Китай). Атомная энергия, т.103, вып. 2, 2007

5. Saunin Yu.V., Dobrotvorski A.N., Semenikhin A.V. e.a. Numerical and experimental investigation of 3D coolant temperature distribution in the hot legs of primary circuit of reactor plant with WWER-1000. – Kerntechnik, 80 (2015) 4.

6. Семенихин А.В., Саунин Ю.В., Жук М.М. Опробование системы диагностики входной информации СВРК на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017 - №3.

УДК 681.51

СОВРЕМЕННАЯ ТИПОВАЯ АРХИТЕКТУРА АСУ ТП АЭС НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ ТПТС ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ВНИИА»

АРТЕМЬЕВ К.П., ГАЛИЦЫН Ю.С., ГРИЦЕНКО С.Ю., НАРИЦ А.Д., НОВИКОВ А.Н., АСПИДОВ К.М., БОРЗЕНКО А.А., ПЕРВОВ А.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. В докладе представлены особенности и основные характеристики комплекса средств автоматизации (КСА) ТПТС производства Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»), применение которого обеспечивает построение современной надежной АСУ ТП АЭС, отвечающей международным требованиям.

Ключевые слова: АЭС, АСУ ТП, ТПТС, защита от ООП, защита в глубину, разнообразие.

MODERN TYPICAL ARCHITECTURE OF NPP I&C BASED ON TPTS TECHNOLOGY PRODUCED BY FSUE "VNIIA"

KONSTANTIN P. ARTEMEV, YURI S. GALITSYN, STANISLAV Yu. GRITSENKO, ALEXANDER D. NARITC, ALEKSEY N. NOVIKOV, KIRILL M. ASPIDOV, ANDREY A. BORZENKO, ALEKSEY V. PERVOV

The Federal State Unitary Enterprise "All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov" (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The report presents the features and main characteristics of the TPTS platform produced by the Federal State Unitary Enterprise "All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov" (FSUE "VNIIA"), the use of which ensures the construction of a modern reliable automated process control system for NPP that meets international requirements.

Keywords: NPP, I&C system, TPTS, vulnerability to CCF, defense in depth, diversity.

Введение

На данный момент КСА ТПТС применяется во всех проектах АЭС российского дизайна, в том числе и на Белорусской АЭС. Характеристики КСА ТПТС позволяют создавать автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУ ТП) отвечающую требованиям защиты в глубину и обеспечивающую защиту от отказа по общей причине, в том числе и в программном обеспечении.

Основная часть

Современная типовая архитектура АСУ ТП, АСУ ТП Белорусской АЭС включает достаточно большое количество подсистем. ФГУП «ВНИИА» является разработчиком и изготовителем оборудования для наиболее крупных частей АСУ ТП:

- система нормальной эксплуатации;
- управляющая система безопасности.

Система нормальной эксплуатации (СНЭ) выполняет задачи, обеспечивающие эксплуатацию АЭС в определенных проектом условиях, необходимых для работы без нарушения эксплуатационных пределов.

Управляющая система безопасности (УСБ) предназначена для обеспечения ядерной безопасности АЭС. Учитывая тот фактор, что большую часть времени УСБ находится в дежурном режиме, необходимо обеспечить достаточную надежность УСБ и исключить выдачу ложных команд управления. На рис. 1 представлена укрупненная структурная схема АСУ ТП в соответствии с концепцией глубокоэшелонированной защиты (ГОСТ Р МЭК 61513-2011) реализованная на Белорусской АЭС.

Оборудование ТПТС-НТ используется на уровнях нормальной эксплуатации, НЭ важной для безопасности (НЭ ВБ), включая иницирующую часть предупредительных защит и систему для управления тяжёлой аварией (синий цвет).

Для четвертого уровня, особенности ТПТС-НТ позволяют локализовать этот уровень и предупредить распространение отказа от других уровней.

Более жесткие требования предъявляются для системы безопасности. Основное из этих требований - защита от отказов по общей причине посредством применения принципов разнообразия. И ТПТС-СБ в иницирующей части АЗ-УСБТ и исполнительной части УСБТ удовлетворяют этому требованию.

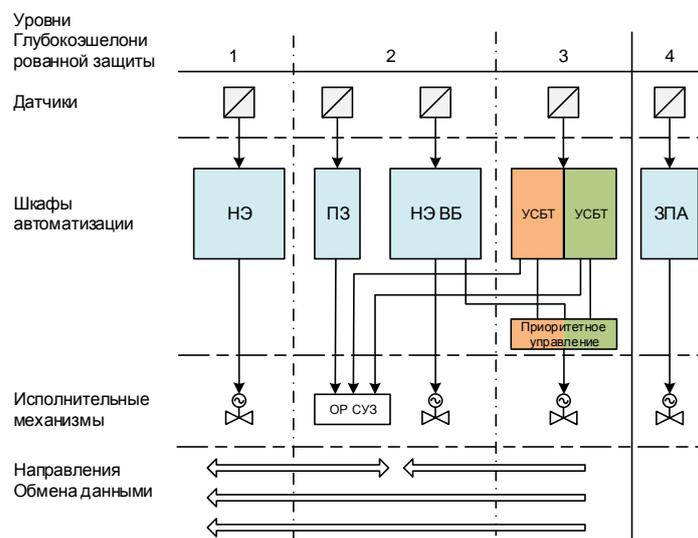


Рис. 1. Структурная схема АСУ ТП Белорусской АЭС

На рис. 2 приведена общая схема системы коммуникационных шин и распределение функций системы на базе КСА ТПТС-НТ. Система коммуникационных шин КСА ТПТС-НТ обеспечивает информационную связь между компонентами в ПТК, между ПТК в системе низовой автоматики, а также системы низовой автоматики с БШС, реализующими связь с СВУ. Она включает в себя системную шину EN, локальные шины ENL, шины ввода-вывода (ШВВ) в СВВ, полевые шины RS-485. Все шины являются шинами последовательной передачи, резервированные, обеспечивают гальваническое разделение между абонентами.

В ТПТС-НТ используется положительный опыт эксплуатации систем ТПТС, в которых эффективно решена проблема безударного переключения резерва, обеспечивающего сохранение работоспособности системы при любых многократных отказах, за исключением одновременных отказов в основном и резервном узлах одного типа.

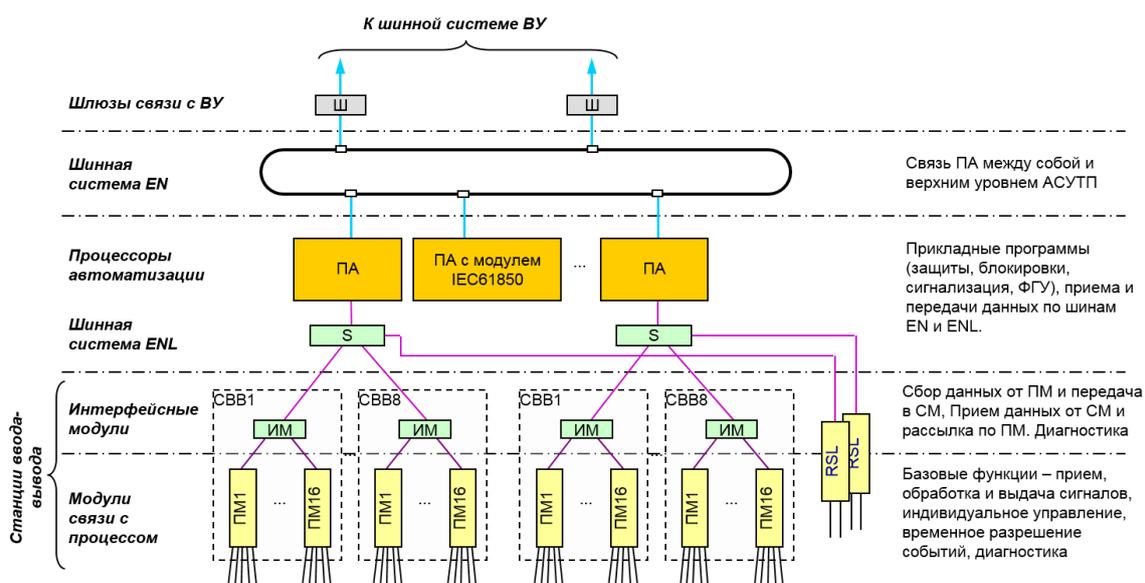


Рис. 2. Общая схема системы коммуникационных шин

Механизм горячего резерва «1-из-2» в ТПТС-НТ используется на всех уровнях – на

уровне ПА, на уровне СВВ (ИМН, МСП), на уровне коммуникационных шин.

ПА работает строго циклически, работа коммуникационных шин сбора данных (ENL, ШВВ) детерминирована, что обеспечивает регулярную доставку данных, критичных ко времени.

Системная шина EN построена на основе технологии Industrial Ethernet 100 Мбит/с и реализована в виде виртуального кольца последовательно соединённых коммутаторов Ethernet, образующего оптоволоконную коммуникационную магистраль. Её резервирование осуществляется путём реконфигурации избыточной структуры связей виртуального кольца.

Локальная шина ENL имеет радиальную организацию с соединениями между ПА и СВВ типа «точка-точка», реализуемую коммутатором Ethernet. Резервирование шины ENL обеспечивается посредством подключения к ПА двух шин ENL, каждая из которых подключена к своему интерфейсному модулю (ИМН) в СВВ.

В СВВ имеется 2 ИМН и 2 ШВВ. ШВВ в СВВ так же, как и шина ENL, имеет радиальную организацию, обеспечивающую подключение МСП к ИМН соединениями типа «точка-точка». МСП имеют 2 интерфейса ШВВ, каждый из которых подключён к своему ИМН.

Радиальная организация шин по типу «точка-точка» и их резервирование обеспечивают сокращение времени обмена информацией, позволяют исключить возможность потери значительного объёма входной информации при единичном отказе.

Такая структура построения обеспечивает удобство обработки данных процесса, поскольку каждый параметр технологического процесса легко доступен каждому ПА вследствие высокой скорости информационных каналов. Кроме того, существенно повышается наглядность при проектировании, сопровождении и последующих модификациях проекта системы.

Конструктивные и технические характеристики КСА ТПТС-НТ обеспечивают его работу как в резервированном, так и нерезервированном режиме в соответствии с требованиями проекта. Еще более ответственными являются мероприятия по обеспечению ядерной безопасности энергоблока. Функции УСБ направлены на предотвращение проектных аварий, ограничение их последствий и обеспечение безопасности при любом из учитываемых проектом исходном событии с наложением, в соответствии с принципом единичного отказа, одного, независимого от исходного события, отказа элементов или одной, независимой от исходного события, ошибки оператора.

АСУ ТП должна быть построена таким образом, чтобы максимально учитывать требования нормативных документов, сохраняя в то же время эффективность работы АЭС.

Важнейшими из требований, направленных на обеспечение ядерной безопасности, являются требования по применению в УСБ принципов резервирования, независимости и разнообразия (в соответствии с рекомендацией NUREG/CR-7007). Структурная схема УСБ Белорусской АЭС показана на рис. 3.

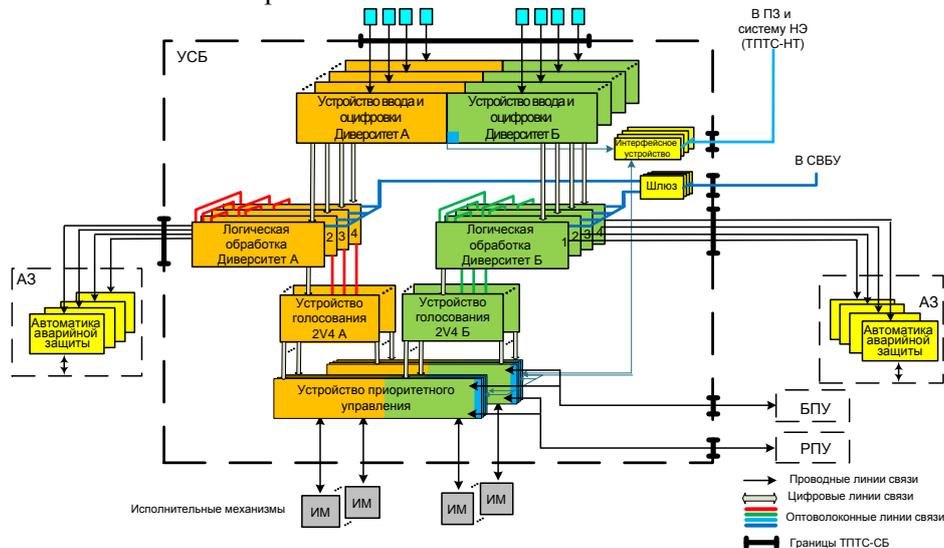


Рис. 3. Структурная схема УСБ Белорусской АЭС

Целевые показатели системы достигаются путем создания многоканальной структуры.

При этом каждый канал УСБ способен выполнить каждую из функций безопасности. Для этих целей каждый канал комплектуется выделенным КИП (по одному датчику на параметр для каждого канала) и исполнительными механизмами. Для того, чтобы при отказе оборудования не выдавались ложные команды предусмотрено голосование по логике «2 из 4», в котором помимо параметров, выработанных (измеренных или вычисленных) внутри каждого канала УСБ, используется информация из трех других каналов. Голосование происходит на двух уровнях: первый - на уровне технологических параметров, формируя, таким образом, достоверный и пригодный для дальнейшей обработки сигнал в каждом канале; второй - на уровне ввода команд в стойки приборные приоритетного управления, где пресекается таким образом выдача ложной команды на исполнительные механизмы, а так же, в случае отказа в данном канале УСБ (процессор ПА-СБ или тракт передачи команд), выдача команд на исполнительные механизмы по мажорированным командам других каналов УСБ. Данные подходы обеспечивают при единичных отказах – в части аварийных защит принцип «безопасного» отказа, а в части управления исполнительными механизмами УСБТ защиту от выдачи ложной команды.

Обеспечение принципа независимости достигается путем размещения оборудования каналов УСБ в отдельных помещениях, разнесенных в пространстве, осуществлением питания от независимых источников. Цифровые связи между каналами выполнены в виде выделенных (точка-точка) оптических линий связи, обеспечивающих гальваническую развязку каналов УСБ. Связь с аппаратурой СНЭ также реализована оптическими каналами системной шины EN. Каждый канал УСБ содержит два независимых комплекта аппаратуры. Комплекты А и В реализованы различными техническими средствами и никак не связаны между собой. Каждый комплект имеет собственный набор КИП. Для функционирования СНЭ требуется информация от КИП УСБ - эти связи также оптические, однонаправленные каналы связи (из УСБ в СНЭ) УСБ-СНЭ не связаны с межканальными шинами УСБ и имеют другой протокол обмена.

Для обеспечения независимости поведения программного обеспечения от внешних иницилирующих факторов, в СБ в любой момент времени можно предсказать интенсивность потоков данных. Эта интенсивность постоянна и не зависит от времени и состояния внешнего оборудования (КИП, приводов, смежных систем) и идентична той, которая была зафиксирована при сдаче системы в промышленную эксплуатацию. Достигается это за счет исключения использования прерываний – вся обработка и пересылка сигналов происходит циклически.

Принципы разнообразия являются основой для построения УСБ, в которой снижена до приемлемого и разумного минимума вероятность отказа по общей причине в системе безопасности при любых проектных воздействиях, а также при ошибочном действии персонала при эксплуатации и ремонте. Помимо единичных случайных отказов в оборудовании систем безопасности АЭС, устойчивость к которым безусловно необходима, в соответствии с современными нормами должна быть обеспечена устойчивость к отказу по общей причине.

Также для обеспечения устойчивости к отказам по общей причине, связанных с ведением времени в системе, решено отказаться от поддержания системного времени в аппаратуре комплектов А и Б. Время ведется и синхронизируется с временем АСУ ТП только в узлах нормальной эксплуатации, служащих для передачи информации из аппаратуры комплектов А и Б в систему нормальной эксплуатации и СВУ, которые не взаимодействуют с узлами системы безопасности и не влияют на их работу.

Практическая реализация принципа разнообразия в модулях ТПТС-СБ заключается в использовании двух независимых, аппаратно-различных комплектов оборудования и как следствие – обеспечивается программное разнообразие.

Электронные компоненты для реализации схем комплектов А и Б проиллюстрированы в табл. 1.

Реализация обозначенных подходов и архитектура модулей ТПТС-СБ позволяет интегрировать функции НЭ ВБ и СБ. Интеграция заключается в реализации следующих подходов:

1. Исполнительные механизмы системы безопасности контролируются системой нормальной эксплуатации важной для безопасности, в случае отсутствия аварии, и управляются от системы безопасности в случае обнаружения аварии;

2. Измерения технологических параметров процесса должны быть доступны для

функций нормальной эксплуатации (например, для предупредительных защит или передачи в СВБУ).

Таблица 1. Аппаратное разнообразие

Тип модуля	Комплект А	Комплект Б
Модуль ввода унифицированных сигналов тока	ПЛИС Altera	Микроконтроллер STM
Модуль ввода сигналов термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления		
Модуль приоритетного управления	ПЛИС Altera	ПЛИС Xilinx
Модуль ввода аппаратных дискретных сигналов	ПЛИС Altera	ПЛИС Xilinx
Процессорный модуль автоматизации	Микропроцессор Freescale (PPC) + ПЛИС Altera + микроконтроллер Hilscher NetX	Микропроцессор Xilinx (ARM) + ПЛИС Xilinx
Модуль-размножитель 4-канальный	ПЛИС Altera Hi	ПЛИС Xilinx
Преобразователь интерфейсов крейта	ПЛИС Altera	ПЛИС Xilinx
Модуль-коммутатор голосования	ПЛИС Altera	ПЛИС Xilinx
Модуль голосования	ПЛИС Altera	ПЛИС Xilinx

Данная структура обеспечивает возможность обнаружения, локализации и устранения ООП на ранних стадиях его возникновения. Это достигается путем сравнения результатов работы обоих комплектов в НЭ ВБ.

На рис. 4 показана структура АСУ ТП АЭС на базе аппаратуры ТПТС-НТ в части системы нормальной эксплуатации и ТПТС-СБ в части системы безопасности. Как мы видим данные две платформы полностью покрывают все задачи, связанные с функциями нормальной эксплуатации и безопасным управлением реакторной установкой.

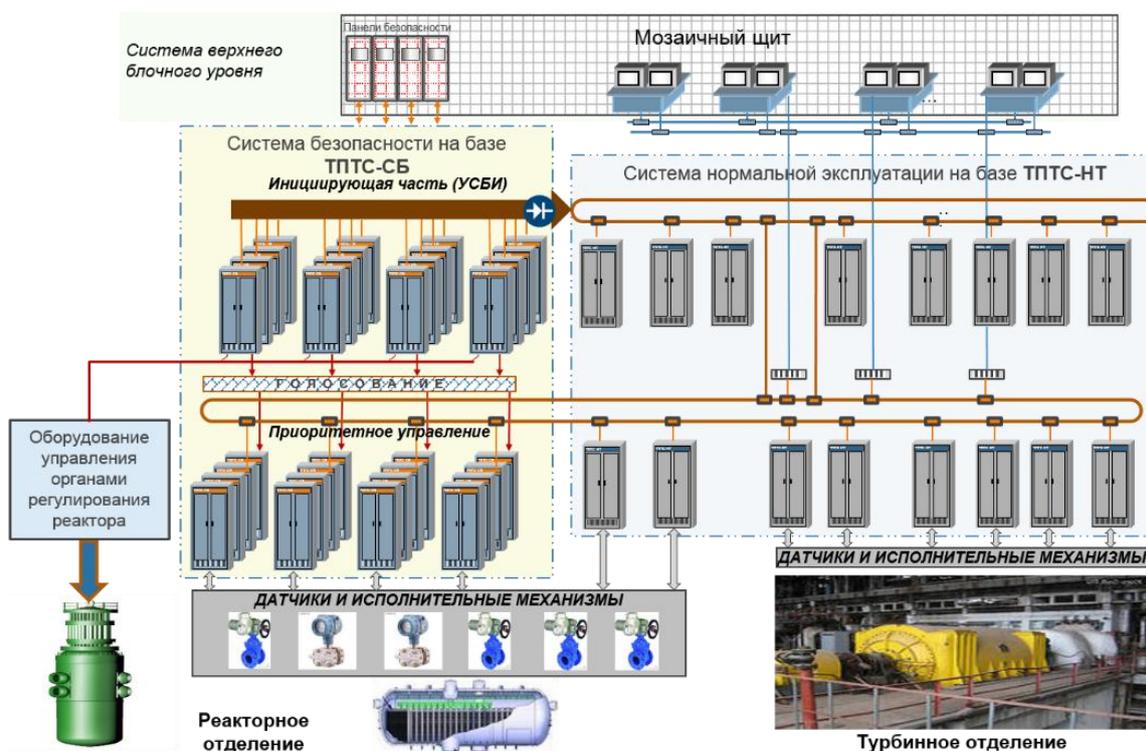


Рис. 4. Структура АСУ ТП АЭС.

Для проектирования прикладного программного обеспечения и аппаратной

конфигурации оборудования ФГУП «ВНИИА» разработало и внедрило интегрированную систему автоматизированного проектирования САПР GET-R1.

Инструментальные средства GET-R1 обеспечивают сквозную разработку всего проекта нижнего уровня, включая технологические алгоритмы, прикладное программное обеспечение и эксплуатационную документацию. В GET-R1 выполняются следующие виды документов:

- базы данных точек подключения, сигналов и механизмов;
- технологические алгоритмы управления, не зависящие от применяемых средств автоматики;
- реализация технологических алгоритмов управления для конкретного поколения аппаратуры ТПТС (путем автоматизированной конвертации технологических алгоритмов);
- программный код алгоритмов управления, загружаемый в модули ТПТС;
- схемы подключения объектов управления к ПТК ТПТС;
- схемы соединений и шинных связей ПТК, исходные данные для кабельных журналов.

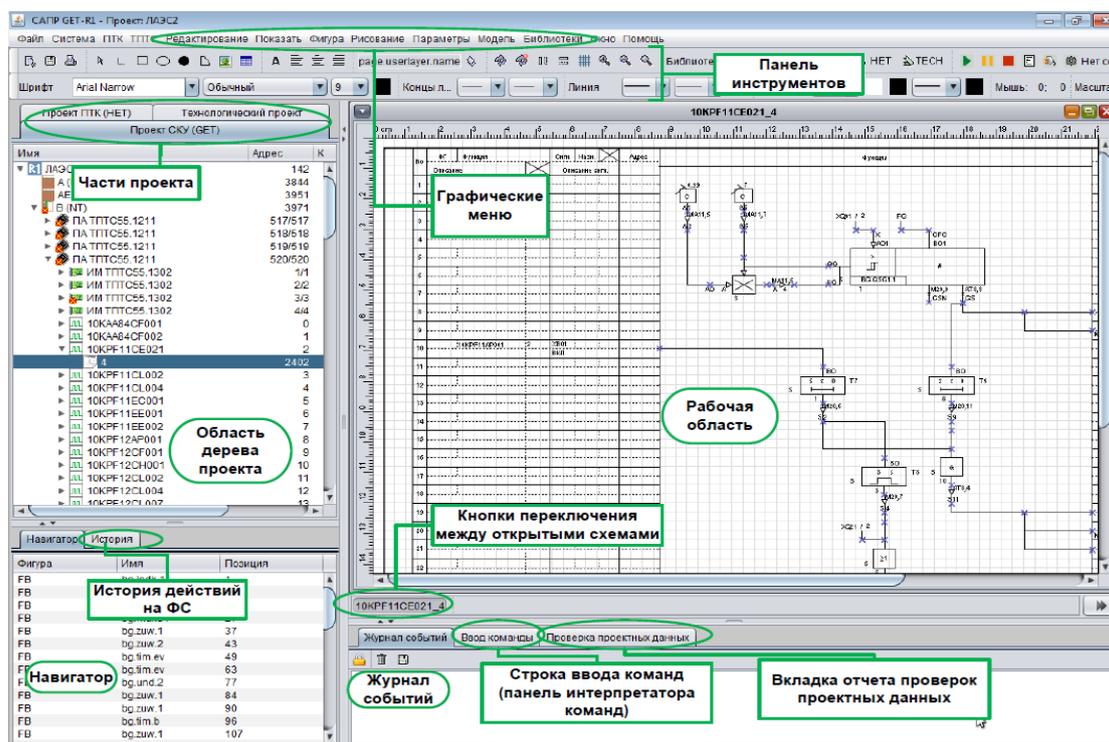


Рис. 5. САПР GET-R1.

Разработка перечисленных частей проекта может выполняться разными организациями, при этом процедуры обмена исходными данными максимально автоматизированы. Система GET-R1 включает в себя полную модель оборудования ТПТС (ТПТС-НТ и ТПТС-СБ), графическую визуализацию при моделировании, виртуальные имитаторы механизмов и окна управления, а также средства разработки тестовых сценариев для автоматической верификации прикладного программного обеспечения ТПТС.

Инструментальные средства GET-R1 прошли апробацию и сертификацию, применяются АО «Атомэнергопроект», АО «АТОМПРОЕКТ» и другими организациями при проектировании АСУ ТП проектов Ленинградской, Белорусской АЭС, а также в теплоэнергетике и нефтяной отрасли.

На данный момент GET-R1 является мощным инструментом, позволяющим создавать весь перечень проектной документации, а именно: технологические алгоритмы, алгоритмы управления с привязкой к конкретной аппаратуре, схемы подключений (подключение ТПТС к конкретным механизмам) и общие аппаратные схемы (схемы размещения аппаратуры по шкафам, местам в крейте).

Заключение

АСУ ТП Белорусской АЭС, построенная на базе средств ТПТС-НТ в СНЭ (уровни 1, 2, 4) и ТПТС-СБ в УСБ (уровень 3) полностью отвечает всем требованиям по разнообразию, независимости, резервированию. Реализован принцип глубокоэшелонированной защиты. Цифровая система безопасности на базе ТПТС-СБ, применяя встроенное программное и аппаратное разнообразие на каждом этапе выполнения функций УСБ, гарантирует выполнение функции как при единичном отказе, так и при отказе по общей причине, в том числе и программного обеспечения. Применение ТПТС-СБ для построения АСУ ТП АЭС в сочетании с ТПТС-НТ позволяет создать гармоничную АСУ ТП с оптимизированными связями безопасности и нормальной эксплуатации, а также с блочным и резервным пунктами управления, что обеспечит эффективное и безопасное управление энергоблоком.

Список литературы

1. ГОСТ Р МЭК 61513-2011 Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования.- М.: Стандартиформ, 2012.
2. NUREG/CR-7007. Методы обеспечения разнообразия в АСУ ТП АЭС.

УДК 621.396.61

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС

к.т.н. ГЕРАСИМЧУК О.А., КРЮКОВ А.В., ПРИХОДЧЕНКО А.Н., САРЫЛОВ О.В.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (Москва, Российская Федерация)

Аннотация. Рассматриваются характеристики оборудования и систем, эксплуатируемых на энергоблоках современных атомных электростанций, полученные в результате обследования электромагнитной обстановки. Проведен анализ на протяжении длительного времени электромагнитных помех, характерных для эксплуатации энергоблока на мощности.

Ключевые слова: АЭС, энергоблок АЭС, испытания, измерения, электромагнитная совместимость, технические средства

ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT OF NUCLEAR POWER PLANT UNIT

OLEG.A. GERASIMCHUK, ANTON.V. KRYUKOV, ALEXANDER.N. PRIKHODCHENKO,
OLEG.V. SARYLOV

*The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. Characteristics of modern nuclear power plant units equipment collected during the examination of electromagnetic environment are considered. Analysis of testing for electromagnetic compatibility of equipment in typical state for an operating NPP unit for a long period of time is carried out.

Keywords. NPP, NPP unit, testing, measurement, electromagnetic compatibility, technical devices

Безопасность и экономичность эксплуатации крупных электроэнергетических объектов в большой степени зависит от характеристик и надежности используемого оборудования и систем. Для управления технологическими процессами повсеместно используются современные электронные элементы на базе микропроцессорной техники, работающих на частотах до десятков ГГц с малыми передаваемыми потенциалами напряжения. Эксплуатация микропроцессорной техники систем контроля и управления (СКУ) в условиях мощных электрических и магнитных полей природного и техногенного происхождения является характерной особенностью современной электроэнергетики, в частности энергоблоков АЭС.

Современный энергетический объект представляет собой разветвленную сеть энергонапряженных зданий, сооружений, электрических станций и подстанций с напряжениями от 0,1 В до 750 кВ.

Одной из важнейших задач, которую необходимо решать для обеспечения безопасности и надежности эксплуатации объектов электроэнергетики является проблема снижения влияния промышленных электромагнитных воздействий (обеспечение электромагнитной совместимости) на нормальное функционирование используемых систем контроля и управления (СКУ) и, в свою очередь, снижение помехоэмиссии от них в окружающее пространство и линии связи. Электромагнитные воздействия обусловлены естественными и искусственными явлениями и воздействуют на технические средства, в т.ч. на СКУ, путем излучения в пространстве размещения технических средств и кондуктивным путем по проводам и кабелям питания, ввода-вывода сигналов и заземления.

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных объектов электроэнергетики показывает, что в условиях возникающих электромагнитных воздействий возможны нарушения режимов эксплуатации, сопровождаемые несанкционированными остановами энергоблоков или нарушениями условий нормальной эксплуатации АЭС.

Устойчивость СКУ к электромагнитным воздействиям в зависимости от назначения и влияния на безопасность АЭС установлена в национальном стандарте для АЭС [1]. С ним гармонизированы соответствующие зарубежные стандарты [2].

Необходимость проведения мониторинга электромагнитной обстановки (ЭМО) возникает в следующих случаях [3]:

При возникновении электромагнитных наводок в цепях связи, управления, электропитания, которые приводят к сбоям и отказам функционирования систем СКУ, что в свою очередь приводит к остановам энергоблока или его разгрузке.

При проектировании нового энергоблока АЭС на этапе выбора площадки.

При проведении пусконаладочных работ на вновь вводимом энергоблоке АЭС для подтверждения характеристик его электромагнитной обстановки в помещениях размещения СКУ, назначенных Главным проектировщиком.

При модернизации и продлении ресурса СКУ на уже эксплуатируемых энергоблоках, когда необходимо проведение категорирования помещений для отнесения их к категории помещений с легкой, средней, жесткой ЭМО и определении степени жесткости испытаний к электромагнитным воздействиям.

В настоящее время формально не установлена классификация ЭМО для мест размещения на АЭС с различными типами реакторов, хотя и имеются несистематизированные измерения параметров ЭМО, выполненные в основном ИЦ НПЦ ИТ ФГУП на энергоблоках российских АЭС.

Целью работ является:

- оценка принадлежности помещений с установленным оборудованием к определенному классу жесткости по электромагнитной обстановке (классификация);
- оценка уровня помех в кабельных линиях (кабели сигнальные, управления, ввода/вывода, интерфейса);
- анализ качества сети надежного электропитания (постоянного и переменного напряжения);
- определение запасов по уровню помех различного вида в помещениях с оборудованием - СКУ и оценка их влияния на устойчивость.

Как правило, окружающая ЭМО для оборудования различного назначения принимается условно по критериям, приведенным в [1].

Для определения параметров реальной электромагнитной обстановки проводят специальные измерения как на работающих на мощности, так и на остановленных энергоблоках АЭС в период ППР.

При обследовании реальной ЭМО определяется уровень и возможные источники возникновения промышленных помех; проводится оценка соответствия параметров ЭМО значениям, установленным в нормативной документации для различных отраслей промышленности; разрабатываются технические мероприятия по снижению уровней помех (если это возможно на действующем объекте) до нормируемых значений.

Степень жесткости устанавливается по признакам технического выполнения объекта. При этом количественные параметры обстановки, такие как напряженность электрического, магнитного или электромагнитного полей, не указываются. Если присутствуют признаки разных видов обстановки, то считается, что обстановка относится к виду более жесткой. Признаки жесткости соответствуют следующим уровням ЭМО, перечисленным в [1]: легкая, средняя, жесткая, крайне жесткая.

По опыту проведения мониторингов на работающем энергоблоке организационно просто проводить мониторинг радиочастотных полей и магнитных полей (промышленной частоты и импульсных) даже без вывода обследуемых систем из работы в штатном режиме в режим работы на сигнал. Достаточно соблюдать осторожность и не прикасаться к работающему оборудованию СКУ.

Также при работе энергоблока на мощности возможно проведение измерений радиочастотных наводок в линиях связи и электропитания, а также параметров сети надежного электропитания при помощи разъемных бесконтактных датчиков помех индуктивного или емкостного типа. Возможен вывод СКУ в режим работы на сигнал, но возможна также и работа в штатном режиме, что определяется требованиями безопасности для каждой системы.

Измерения контактными методами при помощи измерительных проводов или радиочастотных щупов желательнее проводить в период ППР или же при обязательном выводе обследуемой стойки СКУ в режим работы на сигнал, чтобы возможные отклонения в ее работе не повлияли на режим работы реактора в целом.

Наиболее характерные виды электромагнитных помех, зафиксированные при мониторинге ЭМО на различных энергоблоках АЭС приведены ниже.

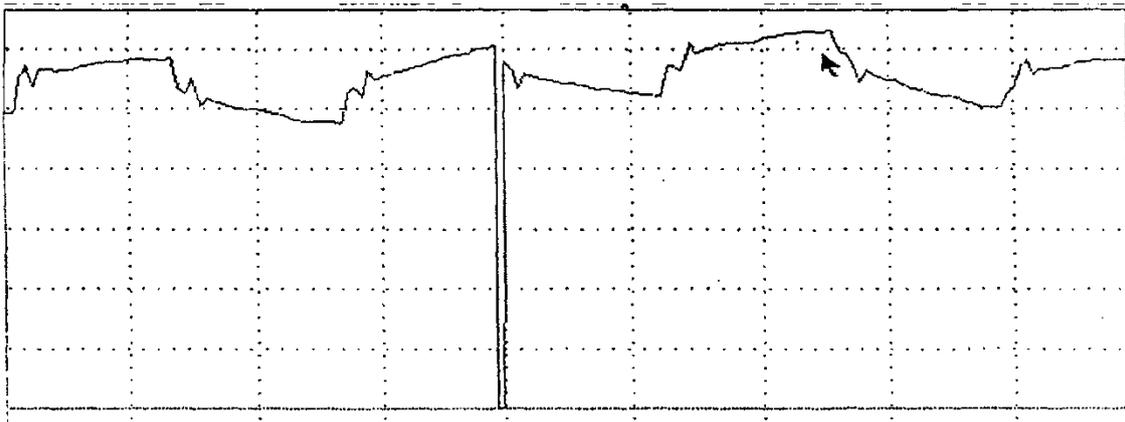


Рис. 1. Колебания и прерывания напряжения питания постоянного тока на ОРУ-750.

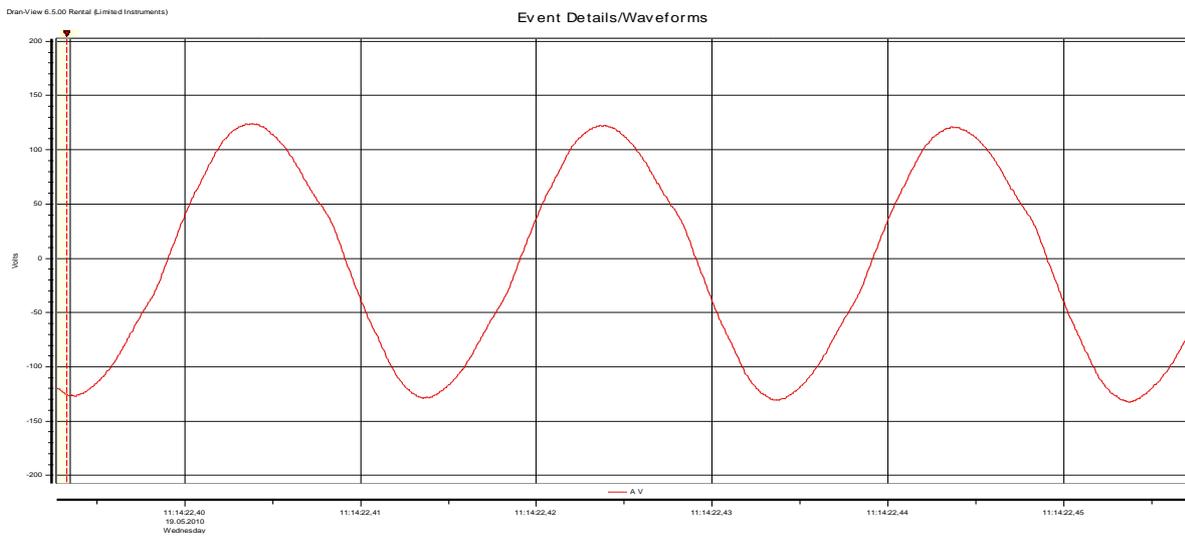


Рис. 2. Типичная осциллограмма напряжения входного электропитания.

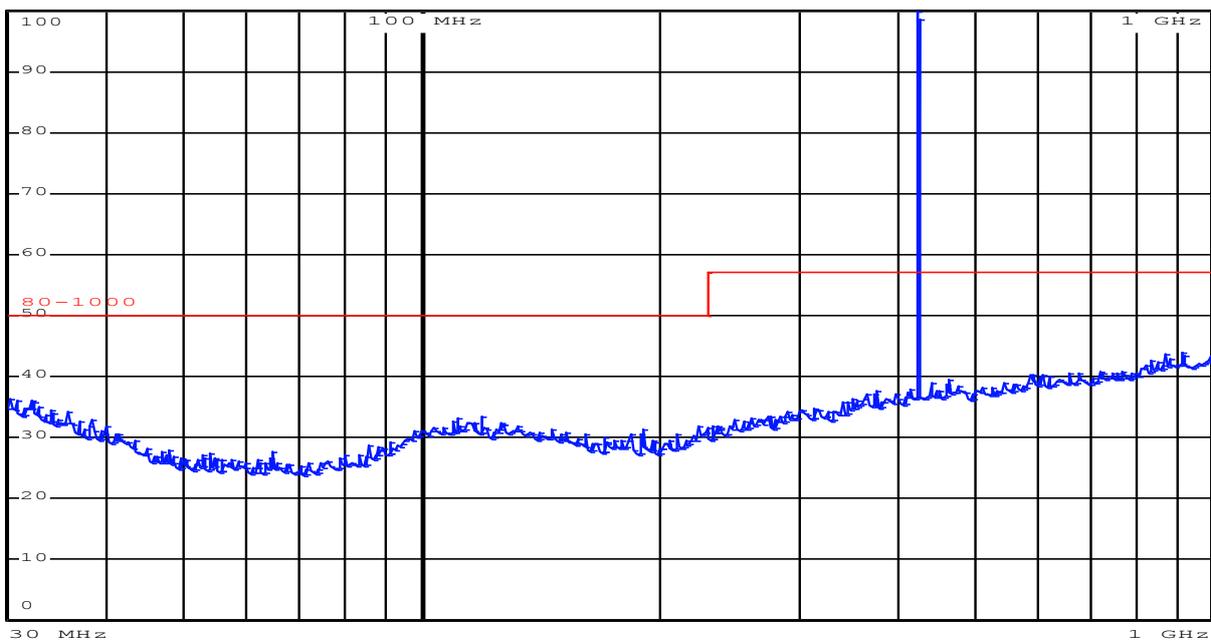


Рис. 3. Радиочастотное поле в диапазоне 0,03 – 1 ГГц по ГОСТ 30805.22 на расстоянии 3 м в режиме передачи ДЕСТ устройства.

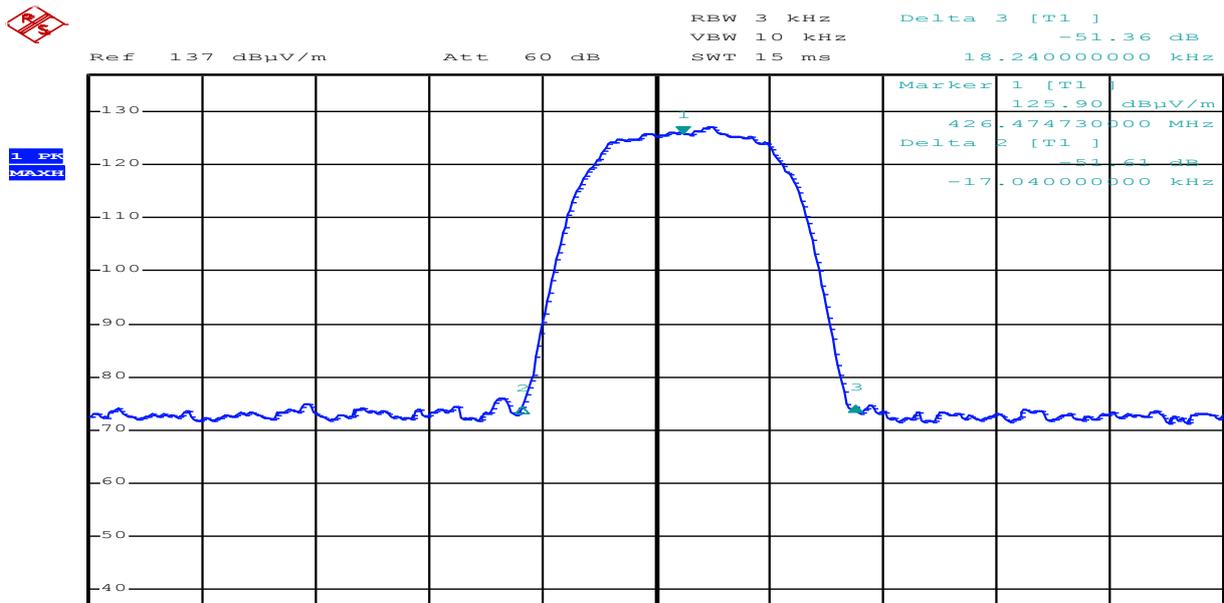


Рис.4. Определение уровней излучения на рабочих частотах ДЕСТ устройства на расстоянии 3м. При увеличении измерительного расстояния до 10 м происходит снижение примерно на 10 дБ, а при уменьшении до 1 м увеличение на ту же величину.

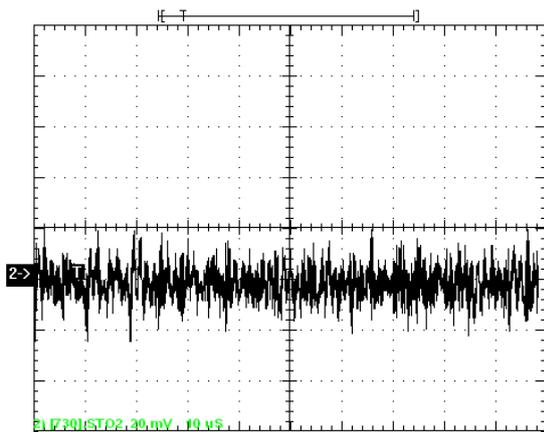


Рис. 5. Питание постоянного тока. ВЧ наводки при дребзге контактов реле

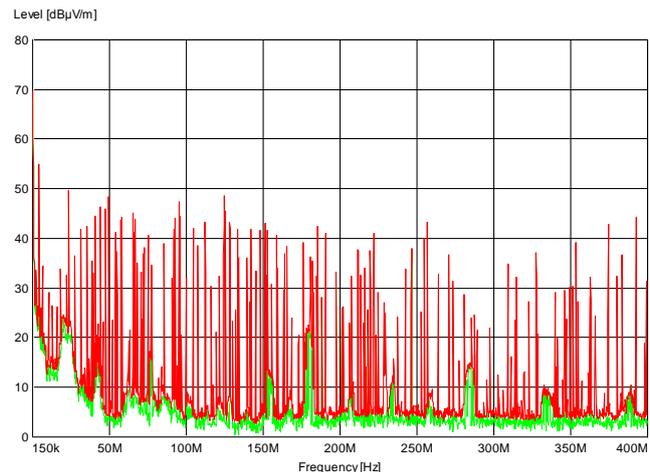


Рис. 6. Наведенное радиочастотное напряжение в кабеле связи при дребзге контактов реле

Практически все линии связи, сеть питания постоянного и переменного тока несут в себе высокочастотные помехи в диапазоне 100-400 кГц. Однако, если для линий питания они в целом безопасны ввиду высокой амплитуды действующего напряжения, то для линий связи они могут быть более критичны, т.к. по ним передаются сигналы невысокой амплитуды 1-5 В и дополнительная постоянная составляющая помехи суммирующаяся в инерционном измерительном органе защиты суммируются и приводят к завышению сигнала до порога срабатывания.

Для всех обследуемых помещений характерны низкочастотные помехи 20 кГц напряженностью до 4,5 В/м, характерными для галогенных ламп со стартерами, которые являются причиной помех. Замена ламп на бесстартерные или светодиодные позволят понизить поле как минимум на порядок.

Характерные зафиксированные частоты радиочастотного поля 50-150, 420-450, 900, 1800 МГц, которые характерны для как для работы промоборудования, так и работы радиопередающих устройств, таких как: радиотелефоны, портативные радиостанции, устройства радиосвязи, телевидение, сотовые телефоны, в соответствии со стандартом

ГОСТ 30804.4.3 не превышают испытательных напряженностей 10 В/м, которыми испытывается важное для безопасности оборудование СКУ. Однако, более близкое расположение излучающих устройств приводит к превышению максимальных испытательных значений, что зачастую небезопасно и должно служить ограничением для проектировщиков.

Измеренные параметры сети надежного питания показывают, что суммарная несинусоидальность в штатных режимах без силовых переключений составляет не более 5% от общей несинусоидальности, отсутствуют импульсные наведенные помехи и напряжения, колебания частоты сети электропитания, что говорит об удовлетворяющих проектной и технической документации требованиях сети надежного питания. Однако, сеть надежного питания внешних объектов, таких как ОРУ, характеризующего разветвленной сетью, обычно менее стабильна.

Магнитные поля промышленной частоты и импульсные обычно невелики в помещениях размещения оборудования СКУ (десятки А/м), но вблизи силового оборудования, а особенно в помещениях размещения систем возбуждения турбоагрегатов составляют 500-600 А/м.

По результатам проведенных мониторингов ЭМО с 2000 по 2019 года на протяжении длительного времени становится ясно, что их целесообразно проводить с периодичностью не менее, чем раз в пять лет при работе энергоблока на мощности для подтверждения неизменности условий эксплуатации и степени жесткости ЭМО, чтобы исключить ее влияние на старение электронной аппаратуры.

На настоящий момент назрела настоятельная необходимость актуализации нормативных документов [1] и [3], т.к. они были разработаны почти 10-лет назад и содержат устаревшие стандарты электромагнитной совместимости и диапазоны частот, что мешает внедрению передовых технологий на энергоблоках АЭС, например, WiFi, рабочие частоты которого выше, чем упомянутые в [1] и [3] 2 ГГц. Складывается парадоксальная ситуация, когда оборудование, в т.ч. производства ФГУП «ВНИИА», поставляемое на объекты традиционной энергетики испытываются на устойчивость к радиочастотному полю до 6 ГГц, а на объекты использования атомной энергии только до 2 ГГц, что затрудняет их внедрение. Аккредитованный испытательный центр ФГУП «ВНИИА» в инициативном порядке проводит испытания на частоты до 6 ГГц стоек управления АСУ ТП – ТПТС. Видится целесообразным перевыпуск межгосударственного стандарта [1], включенного в сводный перечень документов по стандартизации Госкопкорации «Росатом», в форме модифицированного стандарта с учетом современных требований [4] применительно к условиям использования оборудования СКУ АЭС РФ и ЕврАзЭС с учетом требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии.

Список литературы

- 1 ГОСТ 32137-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний. Введ. 2014-01-01. – М.: Росстандарт, 2014. 32 с.: УДК 621.311.25.001.4:006.354.
- 2 Сарылов В.Н., Сарылов О.В. Сопоставимость нормативных требований по электромагнитной совместимости оборудования систем важных для безопасности при взаимной поставке на зарубежные и российские атомные станции. // Сборник докладов. Международная научно-техническая конференция Датчики и системы - 2005 «ДиС-2005», 6-10 июня 2005г. – Пенза:, 2005. – с. 356–372.
- 3 РД ЭО 1.1.2.25.0943-2013. Требования к обеспечению электромагнитной совместимости систем контроля и управления атомных станций. Введ. 2014–01–22. – М.: 127 стр.
- 4 IEC 62003-2020 “Nuclear Power Plants – Instrumentation, Control and Electrical Power Systems – Requirements for Electromagnetic Compatibility Testing”. Введ. 2020-03. Женева. 38 стр.

УДК 681.2

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ
СРЕДСТВ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТПТС**

ГРИЦЕНКО С.Ю., МОИСЕЕВ М.И., КОРОВИНА О.А., КОЖЕВНИКОВ А.Ю.,
ЖМАЙЛОВ В.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА»),
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. В докладе представлены основные положения метрологического обеспечения средств программно-технических ТПТС как средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Поскольку средства ТПТС входят в состав измерительных каналов атомных электростанций, в докладе показаны основные проблемы метрологического обеспечения измерительных каналов, применяемых в области использования атомной энергии, и изложены подходы к их решению.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, средства программно-технические ТПТС, средство измерений, измерительный канал, поверка.

**THE METROLOGICAL PROVISION FOR DEVELOPMENT AND APPLICATION OF
TPTS PLATFORMS**

STANISLAV Yu. GRITSENKO, MICHAEL I. MOISEEV, OLGA A. KOROVINA,
ANDREY Yu. KOZHEVNIKOV, VADIM V. ZHMAILOV

*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Automatics» (FSUE «VNIIA»),
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The paper presents main theses of the metrological provision for the TPTS platforms as measurement instruments in the state system for ensuring the uniformity in the measurements field. Since the TPTS platforms' components are a constituent part of measuring channels at nuclear power plants, the paper shows main problems of the metrological provision for the measuring channels in the nuclear energy field and outlines approaches to the solutions for these problems.

Keywords: metrological provision, TPTS platform, measuring instrument, measuring channel, verification.

Средства программно-технические ТПТС, разрабатываемые ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л. Духова, применяются для компоновки по проектной документации программно-технических комплексов (ПТК). В настоящее время выпускается три основные разновидности средств ТПТС: ТПТС-ЕМ, ТПТС-НТ, ТПТС-СБ. В составе ПТК средства ТПТС входят в автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП): системы автоматизации, системы контроля и управления, информационные и управляющие системы, а также системы безопасности объектов атомной и тепловой энергетики и других отраслей промышленности.

Средства ТПТС выполняют измерения электрических величин и являются средствами измерений (СИ), применяемыми в области использования атомной энергии, входящей в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений (ГРОЕИ). Поэтому, в соответствии с действующей нормативной базой, метрологическое обеспечение (МО) средств ТПТС подлежит государственному регулированию [1]:

- средства ТПТС являются СИ утвержденного типа, прошедшими поверку;
- документация на средства ТПТС проходит метрологическую экспертизу;
- работы и услуги по МО средств ТПТС выполняются только аккредитованными лицами.

Все средства ТПТС имеют оформленные свидетельства об утверждении типа СИ и методики поверки. При выпуске средства ТПТС проходят первичную поверку, а в процессе эксплуатации подлежат обязательной периодической поверке с интервалом пять лет. Результаты поверки подтверждаются свидетельством о поверки. Величина межповерочного интервала выбирается согласно требованиям, изложенным в РМГ 74-2004 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений» [2].

Поскольку средства ТПТС входят в состав измерительных систем и каналов атомных электростанций (АЭС), ФГУП «ВНИИА» принимает активное участие в решении вопросов МО измерительных каналов АЭС. Согласно требованиям современных документов измерительные системы или каналы АЭС могут рассматриваться как покомпонентно (в виде набора отдельных СИ), так и комплектно (как единое СИ). Однако критерии выбора подходов не регламентированы, а их легитимное применение затруднено [1, 3 - 5].

Так, в настоящее время измерительные системы и каналы на АЭС рассматривают как набор отдельных измерительных компонентов (СИ утвержденного типа), которые поверяют отдельно во время останова энергоблока. В условиях постоянного усложнения и расширения измерительных систем АЭС, это приводит к следующим проблемам: высокая трудоёмкость поверки; недостаток времени отведенного на поверку измерительной системы в целом и каждого измерительного канала в частности; необходимость работы персонала в условиях повышенного радиационного фона и прочих вредных условиях; отсутствие учета влияния на метрологические характеристики линий связи и реальных условий эксплуатации измерительных компонентов канала.

Устранить или минимизировать указанные проблемы можно, рассмотрев измерительный канал как законченное средство измерений и заменив покомпонентную поверку комплектной. При проведении комплектной поверки предлагается применять как эталонные измерительные каналы, так и результаты самодиагностики и перекрестного сличения результатов измерений каналов в процессе эксплуатации. Легитимное применение такого подхода к комплектной поверке измерительных каналов требует доработки современной нормативной базы в сфере ГРОЕИ.

Однако рассмотрение измерительных систем и каналов как законченных СИ в целях проведения комплектной поверки не всегда целесообразно. Так, сложные измерительные каналы АЭС могут иметь настолько разветвлённую структуру, что не представится возможным описать все пути прохождения метрологически значимой информации и выделить измерительный канал из состава сложной системы. Кроме того, сложные измерительные системы АЭС являются адаптивными и интеллектуальными, т.к. для их параметров и структуры предусматривается возможность настройки, модификации и дополнения в процессе эксплуатации. Во многих современных технических заданиях на разработку автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) АЭС, содержится требование о возможности увеличения количества и номенклатуры измерительных каналов на 10-20 %. Это требование продиктовано многолетним опытом эксплуатации АЭС и обеспечивает гибкость и адаптивность АСУ ТП [7]. Однако, несмотря на широкое применение в сфере ГРОЕИ адаптивных и интеллектуальных измерительных систем и каналов, современная нормативная база не регламентирует процедуры утверждения их типа и поверки, делая их использование нелегитимным. Поэтому в нормативную базу в сфере ГРОЕИ необходимо ввести следующие положения. Во-первых, регламентировать возможность разделения сложных измерительных каналов и систем на отдельные компоненты (СИ утвержденного типа), взаимодействующие друг с другом согласно аттестованным методикам измерений. Во-вторых, регламентировать возможность увеличения количества измерительных каналов, приведенных в описании типа [6].

Таким образом, для легитимного применения на АЭС измерительных систем и каналов необходимо развить современную нормативную базу как в направлении комплектного, так и в направлении покомпонентного подходов к рассмотрению, регламентировав критерии выбора. Для внедрения комплектного подхода необходимо регламентировать применение комплектных способов поверки каналов, как с применением эталонных измерительных каналов, так и с использованием результатов самодиагностики и перекрестного сличения результатов измерений каналов в процессе эксплуатации. Для внедрения покомпонентного подхода, необходимо регламентировать возможность разделения адаптивных и интеллектуальных измерительных каналов и систем на отдельные компоненты (СИ утвержденного типа), взаимодействующие друг с другом согласно аттестованным методикам измерений. Предлагаемое развитие нормативной базы позволит легитимизировать применение сложных измерительных каналов и систем в сфере ГРОЕИ, а также существенно сократить трудоёмкость

работ по утверждению типа и поверке измерительных каналов АЭС, повысив экономическую эффективность ее эксплуатации.

Заключение

Метрологическое обеспечение средств измерения ТПТС, применяемых для проектной компоновки ПТК АЭС, полностью отвечает требованиям ГРОЕИ.

В то же время ряд проблем, связанных с метрологическим обеспечением измерительных каналов и измерительных систем АЭС ещё предстоит решить. В том числе необходимо минимизировать проблемы, связанные с практикуемой в настоящее время покомпонентной поверкой каналов на АЭС. Для это необходимо легитимное внедрение представленных в докладе подходов к проведению комплектной и покомпонентной поверок измерительных каналов, что требует доработки нормативной базы в сфере ГРОЕИ.

Список литературы

1. ФЗ-102 «Об обеспечении единства измерений».
2. РМГ 74-2004 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений»
3. ГОСТ Р 8.596-2002 «ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения»
4. Приказ государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» от 31 октября 2013 года № 1/10-НПА «Об утверждении метрологических требований к измерениям, эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений, их составным частям, программному обеспечению, методикам (методам) измерений, применяемым в области использования атомной энергии»
5. Жмайлов В. В., Кожевников А. Ю., Коровина О. А. Применение комплектных способов поверки измерительных каналов на атомных электростанциях // Измерительная техника. 2020. № 5. С. 4 – 10.
6. Кожевников А. Ю., Коровина О. А. Предложения по корректировке первой редакции ГОСТ Р 8.596-20xx «ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения» // Метрология. 2020. № 4 С. 3 – 14.
7. ГОСТ Р 8.673-2009 «ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные»

УДК 004.72

РАЗВИТИЕ СИСТЕМНОЙ ШИНЫ EN АСУ ТП НА БАЗЕ ТПТС

КИШКИН В.Л., ТИХОНОВ Ю.Н., НОВИКОВ А.А., КОНОПАТОВ А.А., БОРЗЕНКО А.А.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова» (Москва, Российская Федерация)

Аннотация. В статье описывается развитие шины EN оборудования ТПТС. Рассматривается устройство, ключевые особенности и базовые характеристики вариантов реализации системной шины. Описываются средства диагностики, а также реализация поддержки шины в абонентах.

Ключевые слова: системная шина, ТПТС, дублирование, надёжность, EN.

EN SYSTEM BUS EVOLUTION IN TPTS BASED I&C SYSTEMS

VLADIMIR L. KISHKIN, YURI N. TIKHONOV, ALEXANDER A. NOVIKOV,
ALEXEI A. KONOPATOV, ANDREY A. BORZENKO

Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Federal State Unitary (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The object of the article is the EN system bus development in TPTS systems. The implementation, key features and the basic characteristics of different EN bus variants are considered. The diagnostic possibilities are described, as well as the bus implementation in the abonent software.

Keywords: system bus, TPTS, duplication, reliability, EN.

Введение

В рамках повышения надёжности обмена между абонентами системы коммуникаций в программно-технических комплексах (ПТК) ТПТС-ЕМ, ТПТС-НТ и ТПТС-СБ в 2018-2020 годах в ФГУП ВНИИА им. Н.Л.Духова проведена работа по созданию дублированной шины EN-2.

Дублированная шина EN-2 призвана заменить резервированную шину EN с целью организации полноценной защиты от информационных перегрузок в виде широковещательного шторма, который может привести к нарушению обмена данными между абонентами шинной системы. Кроме того, дублированный вариант даёт возможность построения шины или ее отдельных фрагментов на более простых топологиях типа "дерева" (без кольцевого резервирования) с полным сохранением работоспособности при единичных отказах.

Шина EN-2 является модернизированной версией шины EN и строится абсолютно на том же аппаратном оборудовании, что и EN, путём изменения проводных коммуникаций и замены встроенного программного обеспечения (ВПО) процессорных модулей. При построении каналов EN-2A/2B шины по технологии Turbo Ring такая конфигурация шины, на том же сетевом оборудовании, на котором построена шина EN, может обеспечить двукратное резервирование.

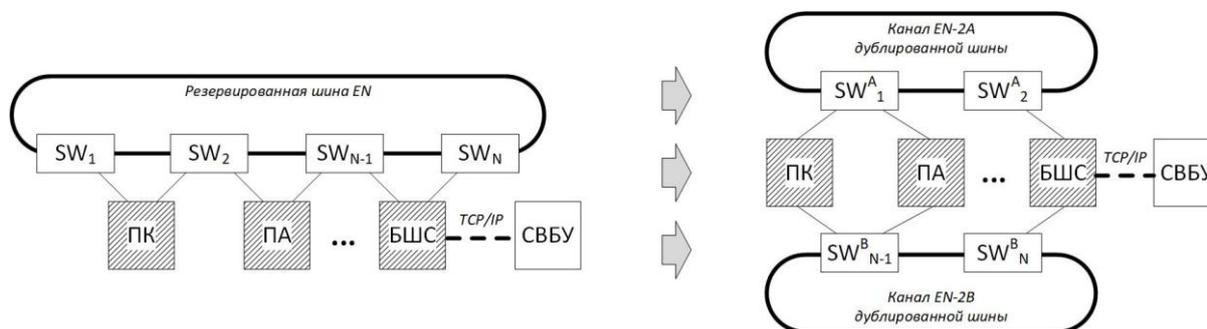


Рис. 1. Системные шины EN и EN-2 ТПТС

Пример построения шины EN-2 на оборудовании шины EN представлен на рис. 1. Шина EN-2, как и EN, использует коммутаторы (SW) и оптоволоконные линии для построения магистралей; для абонентских подключений используется витая пара. К дублированной шине EN-2 могут подключаться те же абоненты комплексов ТПТС, что и к шине EN, а именно: процессоры (ПА) и контроллеры (КА) автоматизации, блоки шлюза сопряжения (БШС) с системой верхнего блочного уровня (СВБУ), инженерные и диагностические станции (ИС и

ДС), а также иные средства, входящие в ПТК АСУ ТП, реализованные на базе персональных компьютеров (ПК) с операционными системами (ОС) *Windows* и *Linux*, с помощью стандартных сетевых адаптеров *Ethernet*.

Устройство шины

Дублированная шина *EN-2* представляет собой две физически несвязанные (каналы *EN-2A* и *EN-2B*) локальные сети *Ethernet*, по которым передаются данные прикладного уровня.

Передача данных между абонентами шины *EN-2* производится параллельно и одновременно по обоим каналам *EN-2A* и *EN-2B*. Передаваемые прикладные телеграммы последовательно нумеруются перед их инкапсуляцией в кадры нижнего уровня. Прикладному уровню на стороне приёмника передается только одна копия адресованной телеграммы – полученная раньше, копия, полученная позже по другому каналу, отбрасывается. Предусмотрены как процедуры, обеспечивающие надёжную доставку с подтверждением получения телеграмм со стороны приёмника (с повторными отправками в случае отсутствия квитанции о получении), так и процедуры без подтверждения.

Для предотвращения влияния информационных перегрузок в одном из каналов шины на работу процессорных модулей по другому, исправному, каналу – в ВПО предусмотрены алгоритмы, обеспечивающие полную блокировку приёма по каналу в случае выявления в нём шторма.

Сравнение пользовательских характеристик шин *EN* и *EN-2* приведено в табл. 1.

Таблица 1. Пользовательские характеристики *EN/EN-2*

Характеристика	Шина <i>EN</i>	Шина <i>EN-2</i>
Устойчивость к неисправностям	однократный обрыв магистральной или абонентской линии;	- любая однократная ошибка; - широкополосный шторм в любом из каналов;
Количество оборудования	одинаковое	
Технические данные (режимы, скорости, оптика)	одинаковые	
Функции диагностики элементов шины	обрыв физического соединения;	- обрыв физического соединения; - потеря логической связи при сохранении физического соединения; - ошибки коммутации портов и каналов; - контроль связи с резервными абонентами; - абоненты с дублирующими адресами;
Максимальный темп выдачи телеграмм	ограничивается активным каналом;	ограничивается наиболее быстрым из двух каналов;
Допустимый поток входящих телеграмм, обслуживаемых интерфейсной частью одного абонента, тлг/сек	ТПТС-ЕМ	
	400	300
	ТПТС-НТ	
	700	400
	ТПТС-СБ	
	600	400
Количество абонентов в шине	800	
Трудоёмкость монтажа	ниже	выше

Диагностика

Для диагностирования неисправностей в работе шины *EN-2* на объектах эксплуатации в штатных коммуникационных процессорных модулях ТПТС предусмотрен набор базовых диагностических средств.

В качестве модулей, выполняющих функции базовой диагностики, выступают один или несколько коммуникационных модулей БШС, выполняющих периодическую проверку связей с прочими абонентами шины. Максимальное количество абонентских связей, контролируемых одним БШС: 500 (при этом каждый из абонентов может быть резервированным). При наличии в сети большего количества абонентов диагностическая задача должна выполняться несколькими БШС.

При обнаружении возникновения/устранения неисправностей БШС формируют события *ANZ92* для системы верхнего уровня (СВУ) с указанием соответствующих причин. Диагностируемые неисправности перечислены в табл. 1.

Расширенные возможности диагностики и локализации неисправностей во всех компонентах шины *EN-2* (коммуникационных модулях и коммутаторах) обеспечивает разработанное специализированное программное обеспечение КАСТ (комплексный анализатор сетевого трафика). КАСТ работает на отдельном ПК (с ОС *Windows/Linux*), подключаемом к обоим каналам шины *EN-2*, и выполняет диагностику компонентов шины с помощью циклического опроса абонентов и обработки событийных сообщений от коммутаторов. Возникающие неисправности наглядно отображаются на графической схеме топологии шинной подсистемы ПТК. Кроме того, результаты диагностики могут передаваться из КАСТ на любое автоматизированное рабочее место (АРМ) комплекса для дополнительной визуализации и сигнализации. В работе КАСТ использует библиотеку *en.lib* и протокол *Simple Network Management Protocol (SNMP)* с подпиской на событийные сообщения коммутаторов (*Trap*).

Реализация

Для реализации алгоритмов дублированной шины в абонентах комплексов ТПТС разработана кросс-платформенная библиотека *en.lib*, реализующая протоколы обменов *EN* и *EN-2* с учётом рекомендаций нормативных документов [1].

Поддержка шин *EN* и *EN-2* выполнена в *en.lib* в виде отдельных режимов работы. При выборе этих режимов – телеграммы других режимов отбрасываются. Кроме того, реализован режим *EN-2/1*, в котором по умолчанию обмен ведётся по протоколу дублированной (*EN-2*) шины, однако отдельные абоненты могут подключаться к модулям по любому из каналов (*EN-2A* или *EN-2B*) по протоколу резервированной (*EN*) шины. Это позволяет использовать в испытаниях и на объекте эксплуатации при пуско-наладочных работах (ПНР) более широкий спектр сервисных и диагностических средств.

Для использования во встроенном программном обеспечении процессорных модулей библиотека *en.lib* адаптирована под процессорные платформы всех коммуникационных модулей ТПТС. Для использования в тестовых и сервисных средствах комплекса ТПТС в библиотеке реализована поддержка работы в составе приложений для операционных систем *Windows* и *Linux*.

Библиотека *en.lib* используется в том числе и при разработке стороннего программного обеспечения (ПО), для организации подключения других подсистем автоматизированной системы управления (АСУ) к абонентам комплекса ТПТС по одному или двум каналам дублированной шины *EN-2*.

Примером такой системы является разработанный совместно с РНЦ «Курчатовский институт» шлюз сопряжения для связи комплексов, созданных на базе средств ТПТС-НТ, с аппаратурой внутриреакторного контроля (СВРК). Данный шлюз осуществляет обмен данными между двумя системами согласно проекту, выполненному в САПР *GET-R1*. Для связи с подсистемой СВРК используется стандартный стек протоколов *TCP-IP*. Для связи с ТПТС-НТ используется библиотека *en.lib*.

Заключение

Основной особенностью шины *EN-2* является сохранение работоспособности (передачи данных) при любых однократных отказах компонентов шины, а также при однократной ошибке коммутации шины, вызывающей информационные перегрузки (широковещательный шторм) в одном из каналов.

Шина *EN-2* закладывается как основная коммуникационная шина в новых отечественных и зарубежных проектах АСУ ТП, построенных на базе аппаратуры ТПТС. Детали архитектуры шины *EN-2*, а также различные структурные варианты её организации представлены в патенте на изобретение [2].

Список литературы

1. ГОСТ Р МЭК 60880-2010 «Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Программное обеспечение компьютерных систем, выполняющих функции категории А».
2. Патент на изобретение №2450305 от 20.08.2010. Комплекс программно-аппаратных средств автоматизации контроля и управления.

УДК 681.513

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ТПТС

МЕЙЛАХС А.Л., ИВАНОВА А.А.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова» (Москва, Российская Федерация)
Аннотация. Доклад посвящен новым подходам к автоматическому регулированию, которые следуют из опыта эксплуатации аппаратуры ТПТС51, ТПТС-ЕМ, и обусловленному этими подходами развитию алгоритмического обеспечения аппаратуры ТПТС. В докладе показаны новшества, введенные в средства автоматического регулирования ТПТС-НТ и ТПТС-СБ. Помимо этого показаны основные проблемы, выявленные при эксплуатации оборудования предыдущего поколения, и представлены методы их решения в новых поколениях ТПТС.
Ключевые слова: ТПТС, средства автоматического регулирования, оборудование, модуль, функции, функциональный блок.

SOLVING PROBLEMS OF AUTOMATIC CONTROL IN THE TPTS TECHNOLOGY

ARTEM L. MEILAKHS, ANNA A. IVANOVA

The Federal State Unitary Enterprise "All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov" (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The article describes the main approaches to automatic control in the TPTS-NT equipment. The problems encountered during the operation of the TPTS-EM and TPTS51 and the innovations introduced in the automatic control systems in the new generation of TPTS are shown.

Keywords: TPTS, automatic control tools, equipment, module, functions, function unit.

Введение

В настоящее время средства автоматического регулирования в КСА ТПТС представлены модулями связи с процессом ТПТС55.1681, ТПТС55.1625 и ТПТС57.1772 функциональными блоками CRU, IBR и S-PID в универсальном модуле процессора автоматизации ТПТС55.1211 и в процессорном модуле автоматизации ТПТС55.1105. При сравнении с предыдущим поколением аппаратуры – КСА ТПТС51, ТПТС-ЕМ – очевидно расширение состава обсуждаемых средств.

Особенности САР ТПТС

В аппаратуре ТПТС51, унаследовавшей подходы от Teleperm ME, единицей оборудования, предназначенной для организации автоматического регулирования, является функциональный модуль, предназначенный для управления исполнительным механизмом (ИМ) регулирующей автоматики. Таких модулей два.

Модуль ТПТС51-2.1411 применяется для трехпозиционного управления ИМ интегрирующего типа. К указанному классу ИМ относятся широко распространенные регулирующие клапаны с электрическим приводом.

Модуль ТПТС51-2.1412 применяется для управления ИМ обеспечивающими «непрерывное» изменение некоторого параметра технологического процесса, выбранного технологом для организации регулирования.

Аппаратный интерфейс модулей ТПТС51-2.1411, ТПТС51-2.1412 позволяет обеспечить подключение двух ИМ. Встроенное программное обеспечение (ВПО) предоставляет возможности индивидуального управления и контроля каждого механизма. Предусмотрен унифицированный интерфейс механизма в информационно-управляющей системе верхнего уровня (ИУСВУ). ИМ может управляться командами оператора-человека или автоматики в дистанционном режиме, в автоматическом режиме механизм управляется согласно типовому закону регулирования по рассогласованию, вырабатываемому пользовательским, проектно зависимым алгоритмом.

Функциональный блок IBR, поддерживаемый ВПО модулей ТПТС51-2.17xx, ТПТС51-2.141x, предназначен, в том числе, для организации автоматического регулирования по пользовательскому алгоритму, при этом предусмотрен стандартный интерфейс с ИУСВУ.

В ТПТС-НТ индивидуальный контроль и управление ИМ регулирующей автоматики обеспечивается МСП ТПТС55.1681 и ТПТС55.1625. В ТПТС-СБ контроль и управление ИМ

выполняется модулем ТПТС57.1772. При разработке модулей ТПТС55.1681 и ТПТС57.1772 был сохранен внешний интерфейс модулей ТПТС-ЕМ, однако алгоритмическое обеспечение функции было модернизировано, отчасти в силу накопленного при эксплуатации ТПТС51 и ТПТС-ЕМ опыта, отчасти в силу следования общим тенденциям развития аппаратуры для автоматического регулирования. МСП ТПТС55.1625 имеет сильно измененный внешний интерфейс – это модуль высотой 3U с соединителем, предназначенным для ввода/вывода сигналов, находящимся на передней панели модуля. Однако алгоритмически данный модуль схож с модулем ТПТС55.1681.

МСП ТПТС55.1681 сочетает в себе функции модулей ТПТС51-2.1411, ТПТС51-2.1412. МСП ТПТС55.1625 предназначен для управления ИМ с «непрерывной» управляющей командой и алгоритмически схож с ТПТС55.1681. Модуль ТПТС57.1772 предназначен для трехпозиционного управления ИМ типа регулирующей клапан.

Модернизация логики автоматического регулирования в ТПТС

Морально устаревшая логика формирования команд регулирования по ПИ-закону в модуле ТПТС51-2.1411, построенная на расчете выходных сигналов трехпозиционного реле, охваченного обратной связью через апериодическое звено, была в модулях ТПТС55.1681 и ТПТС57.1772 заменена на логику, построенную путем охвата трехпозиционного реле обратной связью через цифровой интегратор. Притом интегратор в указанной логике используется как в качестве упрощенной модели относительного перемещения управляемого клапана, так и для расчета И-составляющей закона регулирования. Особенностью полученной логики является возможность в случае необходимости полностью отключить П- или И- составляющие закона регулирования. Кроме того, предусмотрены новые по отношению к алгоритму в модуле ТПТС51-2.1411 возможности: линейная чувствительность к рассогласованию, выбор реакции при переключении в автоматический режим, смещение входного сигнала трехпозиционного реле, сокращение числа формируемых команд, расчет перемещения клапана с возможностью установки по датчику положения.

Известна проблема применения модуля ТПТС51-2.1411 для регулирования уровня в технологических сосудах, например, деаэраторах. Поскольку связь расхода с уровнем приносит в замкнутую систему регулирования одно интегрирующее звено, наличие второго интегрирующего звена, которое будет иметь место при применении ПИ-регулятора, в силу консервативности требований к регулированию в первом контуре АЭС не допускается. Два интегрирующих звена в тракте замкнутой системы делают её близкой к структурно неустойчивой. Модуль ТПТС51-2.1411 реализует только ПИ закон, отключить И-составляющую нельзя, поэтому для его применения в этом случае формируют проектно обратную связь по датчику положения клапана. Эта обратная связь «превращает» ПИ-регулятор в П-регулятор, но полученная система является статической, а установившаяся ошибка является существенной для качества технологического процесса. За время эксплуатации аппаратуры ТПТС51, ТПТС-ЕМ было создано и внедрено несколько проектных алгоритмов для снижения ошибки регулирования уровня. Однако все эти алгоритмы сложны и создают значительную нагрузку на вычислительные мощности модулей, ухудшают дискретность системы, поскольку существует связь между периодами циклов функциональных модулей и количеством операций, которые надо выполнить согласно пользовательскому алгоритму.

Кроме того, надежность и точность автоматического регулирования в значительной степени определяются в рассматриваемом случае датчиком положения, который является элементом системы с относительно низкой надежностью.

Модули САР в КСА ТПТС-НТ и ТПТС-СБ с модернизированным алгоритмом снимают проблему кардинально в силу того, что может быть реализован П-регулятор без интегрирования.

Другой известной проблемой эксплуатации модулей регулирования ТПТС51 и ТПТС-ЕМ является проблема формирования желаемой реакции регулятора при переключении из дистанционного режима в автоматический. На практике востребована одна из двух реакций: «безударная», «с отслеживанием П-составляющей» и «ударная», «без отслеживания П-составляющей». Реакция первого типа очень важна для сложных объектов автоматизации,

поскольку позволяет избегать быстрых и значительных изменений регулируемого параметра при включении регулятора, снижая риск «раскачки» технологического процесса в целом, когда в среднем все параметры имеют необходимые значения, но характер процесса автоколебательный, а мгновенные экстремальные значения параметров нарушают условия эксплуатации. Реакция второго типа востребована тогда, когда требуется высокое быстродействие, например, для аварийного сброса пара путем быстрого перемещения органа регулирования редуционной установки.

Алгоритм, реализуемый модулем ТПТС51-2.1411, отслеживает изменение рассогласования не зависимо от режима, поэтому его реакция в общем случае непредсказуема, а пользовательский алгоритм, направленный на формирование предсказуемой реакции, не может влиять на баланс регулятора иначе, чем посредством манипуляций с рассогласованием. За время эксплуатации аппаратуры ТПТС51, ТПТС-ЕМ создавалось, совершенствовалось и внедрялось множество таких алгоритмов, в которых для преобразования рассогласования используются цифровые интеграторы, фильтры, переключатели, комбинационная логика и счет времени. Замечание о сложности и ресурсоемкости, сделанное ранее, в полной мере относится и к этим алгоритмам.

Алгоритм регулирования, реализуемый модулями ТПТС нового поколения, позволяет сформировать предсказуемую реакцию двух типов, притом «безударную» – двумя различными путями, либо включив предусмотренное звено автобалансировки, либо отключив П-составляющую в момент переключения.

Аналогичным образом удалось снять проблему формирования «безударной» реакции при адаптации регулятора к условиям технологического процесса, который фактически сводится к изменению «скачком» параметров ПИ-закона, или при необходимости перейти от регулирования одного параметра процесса к регулированию другого, например, от расхода среды к давлению до клапана. Во втором случае «скачком» изменяются не только параметры ПИ-закона, но и рассогласование. Общий подход к формированию «безударной» реакции – отключение П-составляющей в момент адаптации или переключения на другую цель регулирования. Динамика переходного процесса определяется постоянной интегрирования регулятора и может назначаться пользователем на время переходного процесса.

Еще одно новшество – предусмотренный в алгоритме модулях САР ТПТС-НТ вход на элемент сравнения прямого и обратного трактов – позволяет создавать пользовательские алгоритмы, воздействующие на вход трехпозиционного реле. Путем создания таких алгоритмов можно сформировать Д-составляющую, получив ПИД-регулятор, сформировать контур с регулятором с разомкнуто-замкнутой структурой по заданию или возмущению, регулятор с произвольной пользовательской логикой обратного тракта. В настоящее время на Белорусской АЭС внедрен пользовательский алгоритм, предназначенный для компенсации люфтов регулирующих клапанов. На указанный вход подается величина половины люфта, определенного экспериментально при наладке клапана, со знаком, который определяется направлением последней сформированной модулем команды. При смене направления команд вход трехпозиционного переключателя смещается на величину люфта, что приводит к формированию команды такой длительности, которой достаточно, чтобы выбрать люфт.

Линейная чувствительность к рассогласованию, в отличие от классической постоянной чувствительности, определяемой только коэффициентом передачи регулятора, позволяет повысить качество регулирования в системах стабилизации. В настоящий момент применяется на объектах энергетики, автоматизация которых на основе аппаратуры ТПТС-НТ выполнена фирмой ИНКОНТРОЛ.

Алгоритм адаптации параметров трехпозиционного реле, предусмотренный в модулях ТПТС-НТ нового поколения, предназначен для сокращения числа переключений ИМ, а, следовательно, увеличение его срока службы. В классическом регуляторе, при нарушении баланса на величину, превосходящую минимально допустимое перемещение, тут же формируется команда. В «рациональном» регуляторе формируется оценка перемещения, которое «разумно» выполнять, игнорируя малые изменения рассогласования и реагируя только на «значимые». Для П-регулятора следующая команда будет сформирована, если рассогласование с момента формирования последней команды увеличится более чем в 2 раза или уменьшится более чем на 1/3. Следующая команда ПИ-регулятора формируется тогда,

когда значения в прямом и обратном трактах регулятора различаются более чем в 2 раза, например, при увеличении или уменьшении рассогласования в 2 раза. Количество формируемых команд сокращается от 2 до 10 раз, однако, отсутствие немедленной реакции на малые изменения рассогласования вносит в систему некоторое запаздывание, которое в общем случае должно приводить к ухудшению качества переходных процессов. Нами дана общая рекомендация о том, что решение о возможности применения адаптации должно приниматься для каждого регулятора по результатам его испытаний при пуско-наладочных работах. В результате, в настоящее время имеем повсеместное применение адаптации на регулирующих клапанах на Ленинградской и Белорусской АЭС. Мы стали обращаться с ИМ «бережнее».

Повсеместное внедрение при эксплуатации модуля ТПТС51-2.1411 пользовательского алгоритма, в котором выполняется расчет приблизительного положения клапана, подсказал нам, что эта функция будет востребована, и приблизительный расчет положения был внесен в ВПО модулей ТПТС-НТ и ТПТС-СБ. Датчик положения, как упоминалось ранее – индикатор с относительно низкой надежностью. Для алгоритмов регулирования его показания обычно не используются, достаточно наличие исправного датчика регулируемого параметра. Но в случае необходимости дистанционного управления оператор ориентируется, в том числе, и на индикатор положения, поэтому допускается в течение ограниченного времени эксплуатировать систему с неисправным датчиком положения, предоставляя оператору расчетный сигнал. Расчет выполняется на цифровом интеграторе, который интегрирует выходные команды модуля. Значение на выходе интегратора может быть замещено, например, показаниями датчика положения пока он исправен. Расчетное положение широко применяется в различных пользовательских диагностических алгоритмах, которые интерпретируют несоответствие между показаниями датчика положения и расчетным положением в качестве признака той или иной неисправности ИМ. Такой подход к диагностике применен на регулирующих клапанах питательного узла второго контура Ленинградской АЭС.

Функциональные блоки

При создании аппаратуры ТПТС нового поколения учитывался тот факт, что пользовательские алгоритмы, в том числе алгоритмы регулирования, исполняются в процессоре автоматизации, а взаимодействие с ИМ не обязательно осуществляется специализированными модулями регулирования. Для случаев, когда требуется регулятор внешнего контура в многоконтурной подчиненной системе регулирования, подчиненные контуры, включающие ИМ непосредственно, могут быть реализованы на модулях связи с процессом ТПТС.

В ТПТС-НТ внешний контур может быть реализован на функциональном блоке CRU, представляющим из себя полноценный алгоритм регулирования для объекта с «непрерывной» командой, аналогичный алгоритму модулей ТПТС55.1681 и ТПТС55.1625. Еще одним применением блока CRU является контроль и управление ИМ, аппаратный интерфейс с которым выполнен посредством модулей двоичного и аналогового ввода и вывода, или последовательный цифровой интерфейс с которым выполнен на основе одного из поддерживаемых в ТПТС протоколов.

В ТПТС-СБ внешний контур может быть реализован про помощи функционального блока S-PID. Данный блок обеспечивает импульсное регулирование при использовании в качестве ИМ регулирующего клапана. В отличие от классического ПИД-регулятора, блок S-PID вырабатывает два дискретных сигнала управления «Больше»/«Меньше» для электроприводного регулирующего клапана, тем самым обеспечивает перемещение органа регулирования по ПИД-закону с постоянными параметрами.

Заключение

За время эксплуатации КСА ТПТС51, ТПТС-ЕМ был накоплен опыт работы, который позволил выделить основные проблемы при эксплуатации данного оборудования. К таким проблемам относятся: регулирование уровня в технологических сосудах, формирование желаемой реакции при смене режима регулирования и т.д.

Для решения вышеперечисленных проблем в современном оборудовании ТПТС добавлены следующие возможности: цифровой интегратор, линейная чувствительность к

рассогласованию, выбор реакции при переключении в автоматический режим, смещение входного сигнала трехпозиционного реле, сокращение числа формируемых команд, расчет перемещения клапана с возможностью установки по датчику положения.

Список литературы

1. Общее описание функциональных и системных модулей ТПТС51, ТПТС52 : техническое описание – М. : ВНИИА, 2018.
2. Модуль регулятор ТПТС55.1681 : техническое описание – М. : ВНИИА, 2017.
3. Модуль приоритетного управления регулирующим клапаном (МПУР) ТПТС57.1772: техническое описание – М. : ВНИИА, 2018.

УДК 621.38

УПРАВЛЯЕМЫЕ ETHERNET КОММУТАТОРЫ КРЕЙТОВОГО ИСПОЛНЕНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ ОБОРУДОВАНИЯ ТПТС-НТ

БУРЦЕВ П.А., НОВИКОВ А.Н.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (Москва, Российская Федерация)

Аннотация. В статье представлены особенности реализации и применения, разработанных авторами, управляемых Ethernet коммутаторов крейтового исполнения.

Ключевые слова: Ethernet коммутаторы крейтового исполнения, ТПТС-НТ, системы контроля, АСУ ТП, модули форм-фактора 3U.

3U MANAGED ETHERNET SWITCH FOR TPTS-NT PLATFORM

PAVEL A. BURTZEW, ALEKSEY N. NOVIKOV

*Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Federal State Unitary Enterprise
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. This article describes the implementation and application of Ethernet managed 3U switches.

Keywords: 3U managed ethernet switch, module, TPTS-NT platform, ENL bus, control system.

В докладе представлены коммутаторы крейтового исполнения (КЕ), предназначенные для применения в составе локальных шин (ENL) оборудования ТПТС-НТ. Коммутаторы предназначены для обмена данными в сети ENL с топологией «звезда» в соответствии со стандартом IEEE 802.3u (Fast Ethernet) для портов с витой парой 10BaseTX/100BaseTX, и для оптоволоконных портов 100BaseFX.

Применяемые в настоящее время в составе локальных шин ENL коммутаторы, имеют ряд недостатков. К ним относятся: невозможность удаленного доступа через шину EN; закрытое программное обеспечение; исполнение для установки на DIN рейку.

Отличительными особенностями разработанных крейтовых коммутаторов являются:

1. Исполнение для установки в крейт формата 3U;
2. Наличие программного обеспечения, разработанного в соответствии с требованиями к оборудованию категории А по МЭК60880 [1];
3. Наличие независимого от коммутируемой сети интерфейса управления на базе Ethernet, подключаемого к кольцевой шине EN, или на базе RS-485, подключаемого к шине Modbus [2].

В режиме интерфейса управления Ethernet, коммутатор имеет WEB-интерфейс для доступа к настройкам посредством браузера, поддерживаются протоколы ARP, UDP/IP, TCP/IP, DHCP, ICMP, Modbus/TCP, Modbus/UDP, SNMP v1, SNMP v2c, HTTP для веб сервера управления [3,4].

В режиме интерфейса управления RS-485 коммутатор становится Modbus-slave устройством, доступ к коммутатору осуществляется по протоколу Modbus/ASCII или Modbus/RTU [5].

Через интерфейс управления производится:

1. Настройка режимов работы коммутатора;
2. Настройка портов коммутатора;
3. Выбор управляющего интерфейса;
4. Синхронизация времени в соответствии с протоколом синхронизации ТПТС-НТ [6];
5. Сигнализация неисправностей;
6. Чтение статистических данных.

Основные технические характеристики разработанного семейства коммутаторов КЕ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики коммутаторов серии КЕ

Тип	Порты				
	Витые пары RJ-45 10/100Base-T		Оптические SC 100Base-FX		
КЕ1-1П(К)	1		1		
КЕ2-2П(К)	2		2		
КЕ7-0П(К)	7		0		
Наработка на отказ, тыс. час.					
	+40°	+55°		+40°	+55°
КЕ1-1П	1227	910	КЕ1-1К	1321	966
КЕ2-2П	845	675	КЕ2-2К	889	703
КЕ7-0П	697	566	КЕ7-0К	727	585
Общие характеристики					
Напряжение питания, В			19-30		
Потребляемая мощность			не более 5 Вт		
Стандарт передачи данных			IEEE 802.3u (Fast Ethernet)		
Суммарная пропускная способность по всем портам (согласно ТЗ)			не менее 10000 кадров максимальной длины в секунду		
Реальная суммарная пропускная способность по всем портам (определяется характеристиками микросхемы коммутатора)			не менее 1560000 кадров минимальной длины в секунду		
Автоматическое определение типа кабеля			прямой/кроссовый/ручная настройка		
Режим коммутации пакетов			полная буферизация без блокировки		
Защита от ширококвещательных штормов			аппаратная защита, настраиваемый порог блокировки портов		
Интерфейс управления			Полудуплексный RS-485, Modbus slave		
			Ethernet, изолированный от коммутируемой сети		
Сигнализация неисправностей			диагностические сообщения и аппаратный сигнал неисправности		
Требования к ВПО			разработано в соответствии с требованиями к оборудованию категории А по МЭК60880		

Варианты исполнения коммутаторов представлены на рис. 1.

Разработанные модули КЕ строятся на базе универсальных печатных плат форм-фактора 3U. Основным отличием исполнений является тип и количество портов. Порты передачи данных, порт шины управления и индикаторы состояний выведены на переднюю панель.

Выбранная концепция разработанных Ethernet коммутаторов для применения в составе локальных шин, позволяет оптимально использовать незадействованные слоты управляющих крейтов, избавляясь тем самым, от дополнительного навесного оборудования на DIN рейках внутри стойки. На рис. 2 представлен пример применения конвертеров и коммутаторов КЕ в составе одной стойки ТПТС-НТ, где ИМ – интерфейсный модуль, СВВ – станция ввода-вывода, ПС – приборная стойка, ЕНС – модуль ТПТС55.1211 в режиме коммуникационного модуля, FMC – модуль ТПТС55.1211 в режиме функционального модуля, ПА – крейт процессора автоматизации. Параметрирование и диагностика КЕ проводится по шине EN (шина EN на рис. 2 не показана).

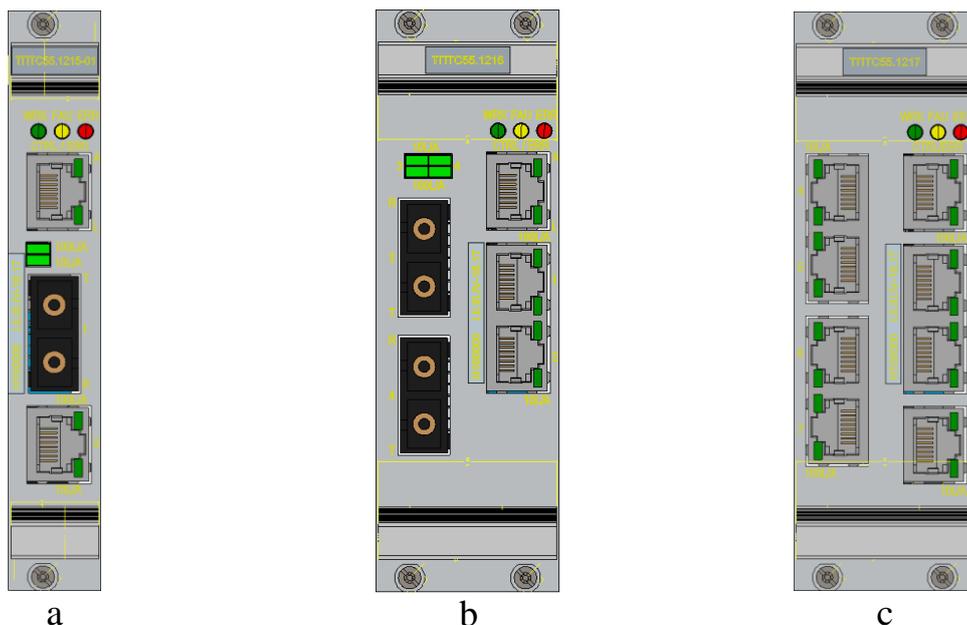


Рис. 1. Варианты передних панелей коммутаторов:
 а - конвертер КЕ1-1П(К), б - коммутатор КЕ2-2П(К), с - коммутатор КЕ7-0П(К)

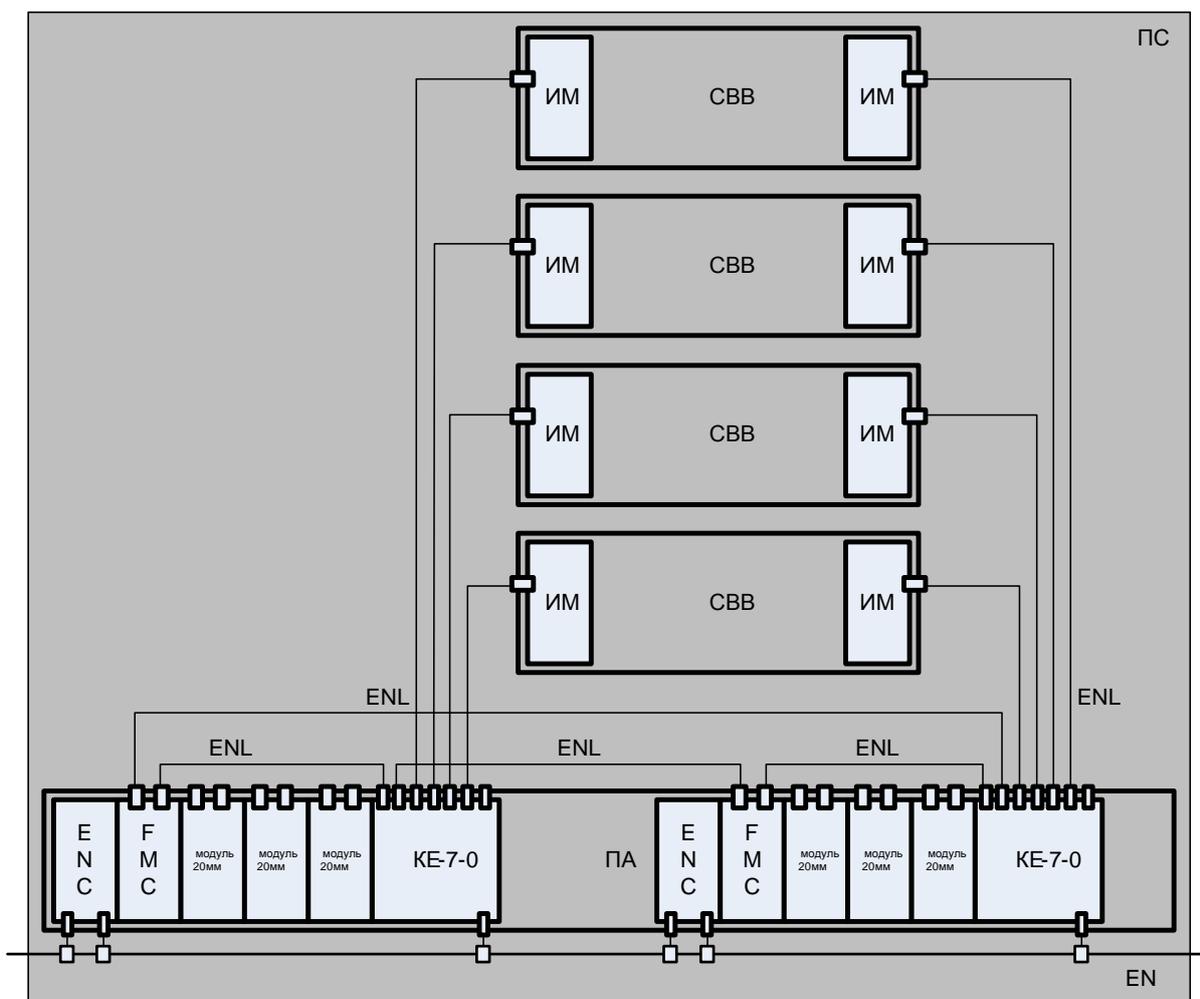


Рис. 2. Схема соединений 4-х СВВ и крейта ПА в одной приборной стойке

В случае отсутствия возможности подвода шины EN в приборную стойку с установленными коммутаторами, параметрирование модулей КЕ проводится по интерфейсу

RS-485 от Modbus мастер устройств или модулей RSL (ТПТС55.1214). Пример подключения представлен на рис. 3, где МСП – модуль связи с процессом, КА – крейт контроллера автоматизации.

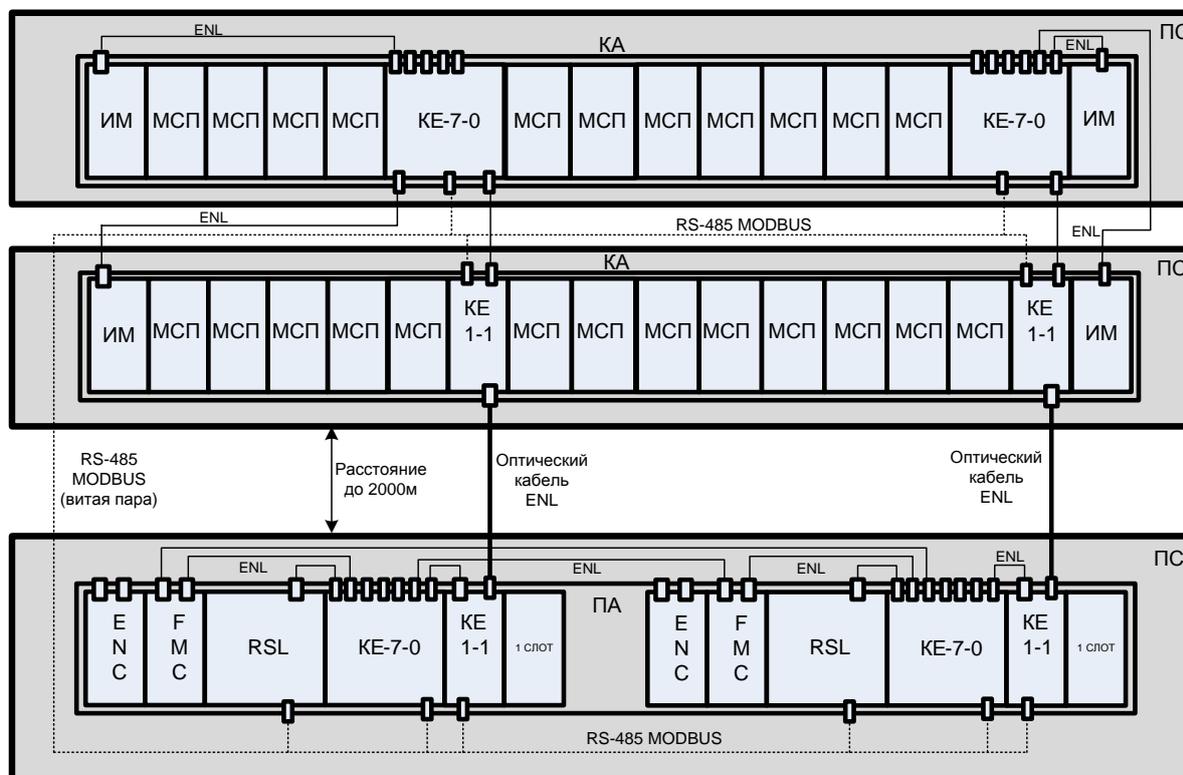


Рис. 3. Схема шины ENL, управление KE через Modbus в удаленных СВВ на базе КА

Заключение

Разработанное авторами семейство управляемых Ethernet коммутаторов крейтового исполнения позволяет сократить количество навесного оборудования в приборных стойках.

При применении разработанных коммутаторов в составе оборудования ТПТС, достигается важное качество, недостижимое при использовании обычных промышленных коммутаторов, - возможность удаленного параметрирования и диагностирования коммутаторов KE с сохранением физического разделения сетей EN и ENL. Физическое разделение сети ENL и сети EN обеспечивается наличием в KE независимого интерфейса управления с возможностью конфигурирования физического уровня обмена данными Ethernet/RS-485 Modbus.

Коммутаторы KE планируется применять в программно-технических комплексах АСУ ТП на базе оборудования ТПТС.

Список литературы

1. ГОСТ Р МЭК 60880 – 2011 АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Программное обеспечение компьютерных систем, выполняющих функции категории А.
2. MODBUS application protocol specification V1.1b Modbus-IDA.org, December 28, 2006
3. Modbus messaging on TCP/IP implementation guide, v1.0b Modbus-IDA.org, October 24, 2006
4. RFC 793 TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL DARPA INTERNET PROGRAM PROTOCOL SPECIFICATION September 1981
5. MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.02 Modbus.org, Dec 20, 2006
6. Программно-Технический комплекс ТПТС52 Форматы телеграмм шины EN № Т45/188-2008

УДК 004.052.42

**ВЕРИФИКАЦИЯ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСБ АЭС
ПОСРЕДСТВОМ САПР GET-R1**

СЕЛИВЕРСТОВ Е.С., ГАЛИЦЫН Ю.С., ИВАНОВА А.А.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. Темой доклада является освещение процедуры верификации прикладного программного обеспечения УСБ Белорусской АЭС посредством САПР GET-R1. Описаны инструменты САПР, позволяющие проводить верификацию, и приведена методология испытаний прикладного программного обеспечения.

Ключевые слова: АЭС, ТПТС-СБ, автоматизация, автоматизированные системы управления, система безопасности, верификация, прикладное программное обеспечение, сценарий проверки

**VERIFICATION OF NPP SAFETY CONTROL SYSTEM APPLICATION SOFTWARE
USING GET-R1 CAD**

EVGENIY.S. SELIVERSTOV, YURY.S. GALITSYN, ANNA.A. IVANOVA

The Federal State Unitary Enterprise "All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov" (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The topic of the report is to highlight the procedure for verifying the application software of the safety control system of the Belarusian NPP using the CAD GET-R1. The CAD tools that allow for verification are described, and the methodology for testing the application software is given.

Keywords: NPP, TPTS-SB, automation, automated control systems, safety system, verification, application software, test script.

Введение

В настоящее время программируемые технические средства автоматизации нашли широкое применение в управляющих системах безопасности (УСБ) и в системах, важных для безопасности АЭС. В связи с этим остро встает вопрос надежности прикладного программного обеспечения (ППО), используемого в программируемых программных средствах. Существующие международные стандарты предписывают использовать верифицированные программные средства, а значит и верифицированное ППО. Для решения этой задачи в составе САПР GET-R1, созданном во ВНИИА им. Духова, был разработан ряд автоматизированных решений, позволяющих проводить испытания ППО.

Основная часть

Верификация ППО является одним из методов, применяемых для защиты управляющей системы от отказа по общей причине. Объектом проведения верификации являлось ППО следующих ПТК, входящих в состав УСБ энергоблоков №1 и №2 Белорусской АЭС:

- ПТК иницирующей части АЗ-УСБТ на базе платформы ТПТС-СБ, относящиеся к классу безопасности 2;
- ПТК иницирующей части ПЗ на базе платформы ТПТС-НТ, относящиеся к классу безопасности 3.

Общая концепция испытаний ППО ПТК для иницирующих частей АЗ-УСБТ и ПЗ состоит из нескольких этапов:

- верификация прикладной конфигурации ПТК (базы данных Задания заводу-изготовителю (ЗЗИ) и ППО (GET-проекта) - этап 1;
- статическое тестирование прикладной программной конфигурации оборудования ТПТС (GET-проект) - этап 2;
- динамическое тестирование прикладной программной конфигурации оборудования ТПТС (GET-проект) - этап 3;
- функциональные испытания ПТК в части технологических разделов - этап 4;
- функциональные испытания оборудования ПТК - этап 5.

Реальная аппаратура ПТК представляет собой программно-аппаратные средства, для которых ППО, реализующее функциональную технологическую логику, представляет собой

самостоятельную часть, разрабатываемую с помощью STEP-кодов, генерируемых САПР GET-R1. Именно эта часть ППО проверяется на этапе статического тестирования, которому и уделено основное внимание в докладе.

Под статическим тестированием понимаются испытания ППО ПТК, проводимые с целью подтверждения соответствия ППО технологическим алгоритмам Задания на автоматизацию (1) без учета реакции объекта управления. Статическое тестирование ППО УСБ энергоблоков №1 и №2 Белорусской АЭС проводилось специалистами ОКБ «ГИДРОПРЕСС» при участии специалистов группы разработки ППО ФГУП «ВНИИА».

Статическое тестирование основано на использовании идеологии «черного ящика». Принимается, что разработанные базы данных и сгенерированные коды представляют собой неизвестный объект, способ проверки которого осуществляется заданием на его входы возмущающих воздействий в определенном объеме параметров и получением сигналов, поступающих с выходов объекта для проведения последующего анализа и обработки полученной информации. Такой подход позволяет абстрагироваться от внутренней организации прикладного ПО ПТК и уделить основное внимание его функционированию.

Статическое тестирование проводится с использованием штатных модулей САПР GET-R1 – подсистемы моделирования SimuNT и подсистемы выполнения сценариев. Эти модули обладают следующими функциями:

- формирование модели работы алгоритмов ПТК;
- задание значений входных сигналов и отслеживание значений выходных сигналов;
- сверка реакции модели (выходные сигналы) с ожидаемым поведением;
- отображение текущего значения сигналов и результатов операций над сигналами на GET-планах в процессе работы модели;
- формирование сценария проверки с помощью скриптового языка.

Основной принцип тестирования заключается в оказании воздействия на модель ПТК путём задания значений входных переменных и последующего сравнения реакции модели с заранее заданным критерием успешности выполнения теста. Причём, процесс тестирования предполагает его автоматизацию, но с возможностью вмешательства пользователя: возможен запрос каких-либо действий, выполняемых пользователем вручную, предложение выбора пользователем дальнейшего действия (остановить выполнение сценария или продолжить) и, при необходимости, экстренное прерывание выполнения сценариев проверки. Задание входных значений на модель ПТК, с их последующей проверкой, происходит с помощью запуска скриптов, написанных на языке сценариев.

Модель демонстрирует работу алгоритмов, позволяет проверить корректность их работы. На рис. 1 представлена схема тестирования ППО с помощью подсистемы моделирования SimuNT САПР GET-R1.

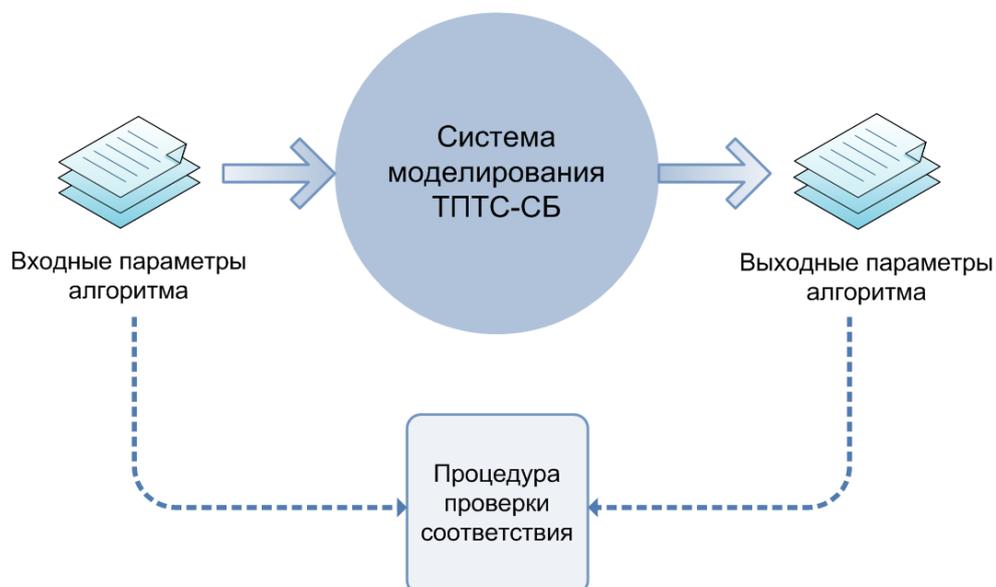


Рис. 1. Схема тестирования ППО

Порядок проведения статического тестирования предусматривает выполнение следующих основных действий:

- составление исходных данных на основании рассмотрения [1] (как основного документа, определяющего функциональные требования);
- определение массивов данных входных параметров для задания условий, соответствующих определенным условиям срабатывания или в соответствии со значениями параметров, используемых в [1];
- написание сценариев проверки в подсистеме редактирования и выполнения сценариев САПР GET-R1, задающих начальные состояния входных параметров, которые соответствуют определенному режиму реакторной установки, затем последовательно реализующих логику изменения входных параметров в соответствии с определенными условиями срабатывания или функцией автоматизации, а так же определяющими перечень параметров для вывода в файл или для записи в файл регистрации фактических моментов изменений значений переменных, необходимый для проведения заключительного анализа;
- подготовка программно-аппаратного комплекса с САПР GET-R1;
- запуск сценариев в подсистеме редактирования и выполнения сценариев САПР GET-R1 для проверки функционирования ППО ПТК;
- проведение анализа результатов испытаний и составление отчета, в котором фиксируются все этапы проверок, приводятся результаты и выводы о проведенных проверках ППО ПТК.

Условия срабатывания определяются на основании анализа Задания [1]. При проведении анализа необходимо учитывать разветвленную и взаимосвязанную структуру алгоритмов функций безопасности, а именно, учитывать то, что одно условие срабатывания может приводить к активации разных функций безопасности, и, как следствие, к активации целой группы выходных сигналов.

После запуска модели ПТК перед запуском сценариев проверки задается исходное состояние всей системы. Начальные значения входных сигналов задаются таким образом, чтобы состояние параметров реакторной установки соответствовало определенному режиму работы, например, уровень мощности 100 % при четырех работающих ГЦНА. При этом инициирование защитных действий не происходит. Исходное состояние системы сохраняется в память и загружается после каждого выполненного сценария перед выполнением следующего, тем самым обеспечивая одинаковое состояние модели ПТК перед каждой проверкой и исключая влияние одного сценария проверки на другие.

ППО ПТК представляет собой программный код, созданный и откомпилированный в САПР GET-R1 на основании материалов, изложенных в [1]. Функциональные схемы редактора САПР GET-R1 являются графическим представлением алгоритмов, приведенных в [1] с максимальной степенью детализации. Каждая функция автоматизации, описанная в [1], отражает логику срабатывания соответствующего алгоритма и действия соответствующих исполнительных механизмов, которые должны быть активизированы. Для проверки правильности работы созданного ППО ПТК необходимо задать входным параметрам такие значения, чтобы активизировать алгоритм и получить выходные сигналы, соответствующие командам на активацию исполнительных механизмов, указанным в [1].

Критерий полноты проверок – в процессе тестирования проверяются все, определенные в [1] условия срабатывания функций безопасности АЗ-УСБТ, ПЗ. Если проверка каких-либо условий срабатывания невозможна или не обязательна, то это должно быть обосновано.

Критерий соответствия (правильности) – активация исполнительных механизмов в соответствии с определенными в [1] и на его основании условиями срабатывания.

При изменении значений входных сигналов производится контроль выходных сигналов и сравнение их с ожидаемыми значениями. Если ожидаемые выходные сигналы отсутствуют, то обнаруженные в процессе анализа несоответствия фиксируются и заносятся в отчет по тестированию. Если при тестировании происходит генерация выходных сигналов, появление которых не было запланировано, то производится анализ функций в соответствии с [1] и функциональных диаграмм, реализованных в САПР GET-R1. Затем делается вывод о правильности генерации выходных сигналов. Если выходные сигналы не были определены в программе тестирования, и их появление является следствием расхождения реализации

функциональных схем с логикой, описанной в соответствующей функции автоматизации, то выявленные в процессе анализа несоответствия фиксируются и заносятся в отчет по тестированию. Полученные результаты передаются группе разработки ППО ФГУП «ВНИИА». Все результаты проверок, обнаруженные несоответствия и действия по их исправлению заносятся в отчет о тестировании.

В процессе работы над верификацией ППО УСБ энергоблоков №1 и №2 Белорусской АЭС специалистами ОКБ «ГИДРОПРЕСС» было разработано более трехсот сценариев проверки для каждого энергоблока. Были выпущены отчеты о результатах тестирования, содержащие перечни условий срабатывания функций безопасности, перечни входных сигналов и способы их изменения, перечни инициированных выходных сигналов, массивы сценариев проверки, графики изменения входных и выходных сигналов, подробные описания возникающих ошибок в ППО, предложения по улучшению и развитию инструментария для тестирования в САПР GET-R1. На основании полученных материалов группой разработки ППО ФГУП «ВНИИА» производилась корректировка ППО УСБ и давались рекомендации для модернизации САПР GET-R1. Разработанные ОКБ «ГИДРОПРЕСС» сценарии проверки легли в основу сценариев периодических проверок ПТК, выпускаемых ФГУП «ВНИИА» в составе заводской рабочей документации к ПТК АЗ-УСБТ и ИЧ ПЗ энергоблоков №1 и №2 Белорусской АЭС.

Заключение

В результате выполненной работы по проведению верификации прикладного программного УСБ энергоблоков №1 и №2 Белорусской АЭС посредством САПР GET-R1 можно отметить, что надежность систем контроля и управления, построенных на программируемых технических средствах автоматизации, обеспечивается, в том числе, за счет реализации системной многоступенчатой процедуры тестирования программного обеспечения, начиная от тестирования отдельных программных модулей и заканчивая функциональным тестированием на полигоне в динамических режимах с использованием модели объекта управления. Системная многоступенчатая процедура тестирования ППО УСБ на средствах ТПТС может быть эффективно реализована при наличии соответствующей среды разработки, минимизирующей ошибки при создании ППО – САПР GET-R1.

Список литературы

1. Белорусская АЭС. Энергоблок №1 Техническое задание. Иницирующая часть УСБТ. Задание заводу-изготовителю BLR1.B.110.1.&&&&&.01&&.021.MB.0001. Книга 1 алгоритмы функций безопасности, 2015.

УДК 681.51/54

**ОСОБЕННОСТИ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА
БАЗЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ТПТС-СБ В АСПЕКТЕ
ПРОВЕДЕНИЯ НАЛАДКИ И ПРОВЕРОК**

СЕЛИВЕРСТОВ Е.С., ГРИЦЕНКО С.Ю., НОВИКОВ А.Н.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»

(Москва, Российская Федерация)

Аннотация. Темой доклада являются особенности аппаратуры управляющей системы безопасности (УСБ) атомной электростанции (АЭС) на базе комплекса средств автоматизации ТПТС-СБ, учитывающие специфику проведения пуско-наладочных работ (ПНР) УСБ и проведения периодических проверок УСБ во время планово-предупредительного ремонта (ППР).

Ключевые слова: АЭС, ТПТС-СБ, автоматизация, автоматизированные системы управления, система безопасности, сценарий испытаний.

**FEATURES OF THE EQUIPMENT OF THE INSTRUMENTATION AND CONTROL
SAFETY SYSTEM BASED ON THE COMPLEX OF AUTOMATION TOOLS TPTS-SB IN
ASPECT OF COMMISSIONING AND CHECKS**

EVGENIY.S. SELIVERSTOV, STANISLAV Yu. GRITSENKO, ALEKSEY N. NOVIKOV

The Federal State Unitary Enterprise "All-Russia Research Institute of Automatics named after N.L. Dukhov" (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The topic of the report are features of the equipment of the instrumentation and control safety system of a nuclear power plant based on the complex of automation tools TPTS-SB, taking into account the specifics of commissioning and periodic inspections during scheduled preventive maintenance.

Keywords: NPP, TPTS-SB, automation, automated control systems, safety system, test script.

Введение

Настоящий доклад посвящен особенностям разработанного и выпускаемого ФГУП «ВНИИА» комплекса средств автоматизации ТПТС-СБ, предназначенного для построения программно-технических комплексов управляющих систем безопасности АЭС. Интерес представляют особенности, которые необходимо учитывать при проведении ПНР и ППР энергоблока и разработке регламентов проверок и испытаний систем безопасности.

При разработке комплекса средств автоматизации ТПТС-СБ, имеющего класс безопасности 2У, ввиду специфичной области его функционального применения стала необходимость пересмотра сложившихся подходов к проведению наладки и периодических проверок системы, построенной на базе ТПТС-СБ, относительно подходов для предыдущих поколений ТПТС, а также внедрения новых режимов работы оборудования

Основная часть

Ядром УСБ, построенной на базе комплекса средств автоматизации ТПТС-СБ, является процессорный модуль автоматизации (ПМА) (ТПТС57.1101 – диверситет А, ТПТС57.1102 – диверситет Б), отвечающий за выполнение пользовательских алгоритмов и организацию информационного обмена как в пределах УСБ, так и с другими подсистемами АСУ ТП АЭС.

ПМА реализует следующие функции в аспекте информационного обмена:

- Прием аппаратных сигналов посредством модулей ввода.
- Выдача аппаратных сигналов посредством модулей вывода.
- Выдача команд управления исполнительными механизмами в модули приоритетного управления / модули приоритетного управления регулятором (МПУ/МПУР).
- Прием сигналов обратных связей исполнительных механизмов от МПУ/МПУР.
- Прием и выдача сигналов в другие ПМА по межпроцессорным интерфейсам (МПИ).
- Выдача сигналов по шине EN в СКУ НЭ на базе ТПТС-НТ.
- Выдача сигналов по шине EN в СВБУ.

Каждая группа сигналов, отвечающих за ту или иную функцию информационного обмена в общем случае имеет структуру, состоящую из трех полей:

- Значение сигнала.
- Признак «ДОСТОВЕРНОСТЬ».
- Признак «ТЕСТ».

Причем одновременно может меняться как значение сигнала, так и его признаки, и УСБ должна определенным образом среагировать на эти изменения.

В результате анализа возможных эксплуатационных ситуаций, являющихся следствием регламентов проверок референтных АЭС, формирования при разработке максимального охвата диагностикой (автоматической, автоматизированной и ручными проверками) всех элементов УСБ были приняты следующие обозначения режимов ПМА:

- «Работа» (WRK).
- «Имитация» (IMIT).
- «Программирование/Опробование» (PROG).

Формальное описание свойств в зависимости от режима работы ПМА приведено в табл. 1.

Таблица 1. Режимы работы ПМА

Режим ПМА	Работа процессорного модуля автоматизации в режимах «работа», «имитация» и «программирование/опробование»
WRK	<ul style="list-style-type: none"> - Штатная обработка прикладного программного обеспечения (ППО). - Имитация входных и выходных сигналов недоступна. - Возможность загрузки ППО и внесения изменений недоступна.
IMIT	<ul style="list-style-type: none"> - Обработка ППО. - Возможность имитации входных и выходных аналоговых и дискретных сигналов, поступающих от модулей ввода и МПУ/МПУР, а также сигналов, поступающих по межпроцессорному интерфейсу, выходов на шину EN. - Сигналы, поступающие на модули вывода и модули приоритетного управления с признаком «ТЕСТ», в дальнейшую обработку поступают как недостоверные. Сигналы, имеющие признак «ТЕСТ» передаются другим абонентам по шине EN как недостоверные. - Имеется возможность разрешить передачу сигналов, предназначенных для управления модулями вывода аналоговых и дискретных сигналов, модулями приоритетного управления, а также аналоговых и дискретных сигналов, передаваемых по шине EN, игнорируя наличие признака «ТЕСТ». - Имеется возможность внесения изменений в настроечные параметры (константы в ППО). - Возможность загрузки ППО недоступна.
PROG	<ul style="list-style-type: none"> - Обработка ППО. - Возможность имитации входных и выходных аналоговых и дискретных сигналов, поступающих от модулей ввода и МПУ/МПУР, а также сигналов, поступающих по межпроцессорному интерфейсу, выходов на шину EN. - Все дискретные сигналы, поступающие на модули вывода, модули приоритетного управления и другим абонентам по шине EN устанавливаются в состояние логического «0». - Все аналоговые сигналы, поступающие на модули вывода и другим абонентам по шине EN, в дальнейшую обработку поступают как недостоверные. - По умолчанию предусмотрена блокировка выходов МПИ. Все сигналы, передаваемые по МПИ другим абонентам, назначаются как недостоверные. - Имеется возможность разрешить передачу сигналов, предназначенных для управления модулями вывода аналоговых и дискретных сигналов, модулями приоритетного управления, а также аналоговых и дискретных сигналов, передаваемых по шине EN, игнорируя наличие признака «ТЕСТ». - Предусмотрена возможность разблокировки всех или отдельных групп выходов МПИ для передачи сигналов по МПИ другим абонентам тождественно.

Режим ПМА	Работа процессорного модуля автоматизации в режимах «работа», «имитация» и «программирование/опробование»
	- Имеется возможность загрузки ППО.

Принцип обработки недостоверных сигналов, поступающих на модули вывода:

- в телеграммах шины ввода-вывода (ШВВ) в направлении модуля выдачи дискретных сигналов передаются значения, переводящие выходы модуля в состояние 0 В;
- в телеграммах ШВВ в направлении модуля выдачи аналоговых сигналов, формируемых по недостоверным маркерам, передается значение сигнала, при этом признак достоверности установлен в состояние логической «0».

Принцип обработки недостоверных сигналов, поступающих на модули приоритетного управления:

- в телеграммах ШВВ в направлении МПУ и МПУР, формируемых по недостоверным сигналам, передается команда NOP, означающая отсутствие автоматических команд УСБ от данного ПМА.

Принцип обработки недостоверных сигналов, передаваемых другим абонентам по шине EN (ПТК СКУ НЭ, СВБУ):

- в телеграммах передачи дискретных сигналов, формируемых по недостоверным сигналам, передаются состояния логического «0»;
- в телеграммах передачи аналоговых сигналов, формируемых по недостоверным сигналам, передаются текущие значения соответствующих сигналов с установленным признаком недостоверности.

Сформулированы положения:

1. Режим «Имитация» – предназначен преимущественно для проведения проверок в период работы энергоблока на мощности, так как использование этого режима позволяет проводить проверку отдельной функции безопасности без вмешательства в работу других функций.

2. Режим «Программирование/Опробование» – предназначен преимущественно для обслуживания программно-технических средств ТПТС-СБ в эксплуатации, а также для проведения проверок в период пуско-наладочных работ и планово-предупредительного ремонта, так как в этом режиме исключаются любые управляющие воздействия со стороны УСБ на исполнительные механизмы, в другие подсистемы и т.д. Но при необходимости возможна частичная или полная разблокировка управляющих воздействий.

3. Органом выбора режимов функционирования ПМА является трехпозиционный переключатель с ключевым доступом, расположенный на лицевой панели модуля. Три положения переключателя предназначены для выбора режимов «Программирование / опробование», «Имитация» и «Работа». Основным режимом, в котором функционирует ПМА, является режим «Работа». В качестве технической меры, позволяющей контролировать вывод ПМА из состояния «Работа», введена необходимость подтверждения оперативным персоналом выполняемых обслуживающим персоналом манипуляций с переключателем режимов ПМА. Такое подтверждение организовано с помощью аппаратного ключа подтверждения режима функционирования ПМА, который располагается на панелях блочного пункта управления (БПУ).

4. Организована сигнализация персоналу о текущем положении ключа и режиме работы ПМА на панелях БПУ, на лицевой панели ПМА, на активных элементах видеокадров СВБУ и диагностической станции, на инженерной станции в САПР GET-R1 при работе с ПМА.

5. Для обработки сигналов ключей подтверждения и формирования разрешений на переключение режимов работы ПМА разработан проектный алгоритм. Алгоритм формирования разрешений на переключение режимов работы ПМА базируется на следующих постулатах:

- При состояниях реакторной установки «Работа на мощности», «Горячее состояние», «Реактор на минимально контролируемом уровне мощности», «Режим разогрева» перевод из режима «Работа» в режим «Имитация» или «Программирование» разрешен только для одного канала безопасности одного диверситета.

- При состояниях реакторной установки «Перегрузка топлива», «Останов для ремонта», «Холодное состояние» в случае, когда все четыре ключа одного диверситета повернуты в сторону разрешения переключения, разрешен перевод в режим «Имитация» или «Программирование/опробование» любого количества каналов безопасности одного диверситета в любых комбинациях.

В процессе работы УСБ, построенной на базе комплекса средств автоматизации ТПТС-СБ, выполняется постоянная автоматическая самодиагностика компонентов УСБ:

- самодиагностика всех компонентов приборных стоек (стойки приборные ввода/вывода, стойки приборные приоритетного управления, стойки приборные автоматизации, стойки питания);

- самодиагностика компонентов отдельных модулей (модули связи с процессом, МПУ/МПУР, коммуникационные модули, служебные модули);

- самодиагностика трактов передачи данных, включая функцию автоматического тестирования МПУ и МПУР;

- диагностика неисправностей во внешних цепях;

Объем диагностики обеспечивает обнаружение неисправного типового элемента замены (ТЭЗ) и подключенного к нему канала измерения (управления).

Обнаруженные неисправности или отказы индицируются:

- на неисправном или отказавшем модуле (с помощью светового индикатора модуля);

- на приборной стойке в виде ламповой индикации;

- на СВБУ в цифровом виде;

- на диагностической станции в виде окон расширенной диагностики;

- на ТС ОДУ в виде сервисных табло и звуковой сигнализации.

При разработке аппаратуры ТПТС-СБ особое внимание было уделено вопросам эффективности взаимодействия пользователя с аппаратурой управляющей системы безопасности. Разработанный для аппаратуры ТПТС-СБ в САПР GET-R1 программный компонент автоматизированной проверки комплексов (система моделирования и система редактирования и запуска сценариев) собрал все возможности аппаратуры ТПТС-СБ и предоставил пользователю эффективный и удобный инструмент по верификации прикладной конфигурации программно-технического комплекса (ПТК), а также наладке, тестированию и проведению периодических проверок УСБ.

Возможности программного компонента позволили проводить проверки алгоритмов управления и программного обеспечения модулей с использованием реального оборудования (полунатурное тестирование) с выдачей сигналов на исполнительные механизмы, смежные подсистемы и панели безопасности, а также ограничиваясь только проверкой проекта системы.

Система моделирования и система редактирования и запуска сценариев позволяют создавать сценарии для проведения автоматизированных проверок по заранее разработанным методикам. При помощи последовательной имитации технологических параметров с контролем формирования уставок и управляющих воздействий возможно проверить, правильно ли работает алгоритм и выдача оборудованием сигнализации и сигналов контроля и управления. Кроме того, возможно проверить взаимодействие и взаимовлияние алгоритмов между собой. Одновременно, могут решаться и решаются задачи проверки адекватности собственно алгоритмов, и проводится анализ взаимодействия различных алгоритмов управления в динамических режимах.

Использование полунатурного тестирования при помощи сценариев позволяет минимизировать трудозатраты и влияние человеческого фактора при проведении однотипных операций как в случае проверки деградации логики обработки входных сигналов (изменение принципа обработки в зависимости от количества недостоверных сигналов), так и при проверке самих алгоритмов функций безопасности в различных комбинациях исходных условий их запуска. Программные сценарии минимизируют возможные ошибки при тестировании на оборудовании за счет предварительной проверки на модели ПТК. Автоматизированные сценарии проверки, разработанные для тестирования УСБ энергоблока №1 Белорусской АЭС, были адаптированы для энергоблока №2 Белорусской АЭС с минимальными трудозатратами.

Окно имитации в САПР GET-R1 позволяет выборочно или полностью разблокировать выдачу управляющих воздействий при наличии признака «ТЕСТ» выходных сигналов,

проводить имитацию входных сигналов с наблюдением влияния имитации на конкретное технологическое оборудование и другие алгоритмы, наблюдать за всеми входными и выходными сигналами ПМА, определять состояния режимов работы ПМА.

Разработанные функции программного компонента САПР GET-R1 для аппаратуры ТПТС-СБ активно применялись при проведении этапов статического и динамического тестирования (с использованием полномасштабной модели технологических систем энергоблока №1 Белорусской АЭС), верификации прикладной конфигурации и функциональных испытаний программно-технического комплекса УСБ и иницилирующей части предупредительных защит (ПЗ). Автоматизированные сценарии проверки функций безопасности нашли широкое применение при проведении автономной и комплексной наладки УСБ и иницилирующей части ПЗ энергоблоков №1 и №2 Белорусской АЭС. Сценарии проверки ППО включены в состав эксплуатационной документации на ПТК, разработаны инструкции по использованию сценариев при проведении периодических проверок ППО. Разработка сценариев проверки проходила при непосредственном участии главного конструктора реакторной установки ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и наладочной организации АО «Атомтехэнерго». В процессе ПНР энергоблока №1 эксплуатирующий персонал Белорусской АЭС приобрел необходимый опыт по проведению периодических проверок ППО с использованием инструментов автоматизированного тестирования САПР GET-R1.

Заключение

При разработке комплекса средств автоматизации ТПТС-СБ, предназначенного для построения программно-технических комплексов управляющих систем безопасности АЭС, реализован комплекс мер, направленных на упрощение наладки и эксплуатации. Введена возможность проверки работы прикладных алгоритмов, как без воздействия, так и с воздействием на объекты управления. Инструментальные средства проектирования, входящие в состав программно-технического комплекса, позволяют создавать сценарии проверок работы прикладных программ, автоматизировать контрольные процедуры. Это дополняет функции встроенной диагностики, реализованные во встроенном программном обеспечении аппаратуры ТПТС-СБ. Были пересмотрены сложившиеся подходы к проведению наладки и периодических проверок оборудования, принятые для систем предыдущих поколений ТПТС, а также были внедрены новые режимы работы оборудования.

Проведен анализ эксплуатационных документов АЭС, был учтён опыт наладки и эксплуатации действующих АЭС. Результатом этого анализа стала выработка рекомендаций для учета технических особенностей комплекса средств автоматизации ТПТС-СБ при наладке и периодических проверках УСБ.

В итоге была получена программная реализация режимов работы оборудования ТПТС-СБ и соответствующих режиму реакций на входные и выходные данные, разработаны инструменты и рекомендации по наладке и проверках УСБ, сформирован новейший подход к тестированию программно-технических комплексов УСБ на всех этапах жизненного цикла АЭС. Особенности аппаратуры ТПТС-СБ, обеспечивающие проведение наладки и проверок УСБ, успешно апробированы во время ПНР и ППР энергоблока №1 Белорусской АЭС.

Список литературы

1. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Общие требования.- М.: Стандартинформ, 2012.
2. ГОСТ Р МЭК 61226-2011 Системы контроля и управления, важные для безопасности. Классификация функций контроля и управления.- М.: Стандартинформ, 2011.
3. ГОСТ Р МЭК 60709-2011 Системы контроля и управления, важные для безопасности. Разделение.- М.: Стандартинформ, 2011.

УДК 004.416.6, 004.384

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ТПТС С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ ОБЪЕКТА.

БЕЛОНОСОВ М.А., ЧЕРЕПАНОВ Г.В., ОГНЕВА М.А.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») (Москва, Российская Федерация.)

Аннотация. Изменение требований рынка автоматизированных систем, а также ужесточение экономических санкций против Российской Федерации вызвало необходимость создания в рамках комплекса средств автоматизации ТПТС-НТ новых устройств, обеспечивающих обмен данными по промышленным протоколам МЭК-61850, МЭК-60870, MODBUS. Некоторые из таких устройств, такие как модули ТПТС55.1691 (модуль взаимодействия с электрической частью) и ТПТС55.1105 (контроллер автоматизации) уже прошли опытную и промышленную эксплуатацию на объектах тепловой энергетики России. Для строящихся в настоящее время объектов ведется разработка и испытания нового перспективного устройства, обладающего как большой пропускной способностью при приеме/выдаче данных по промышленным протоколам, так и возможностью выполнять сложные алгоритмы управления технологическими процессами в реальном времени.

Ключевые слова: ТЭС, АЭС, МЭК-61850, МЭК-61870, MODBUS TCP, САПР GET-R1, ТПТС.

INTEGRATION OF CONTROL AND CONTROL SYSTEMS BASED ON TPTS WITH THE ELECTRICAL PART OF THE FACILITY.

MIKHAIL A. BELONOSOV, GEORGII V. CHEREPANOV, MARIA A. OGNEVA

Federal state unitary enterprise "All-Russia research institute of automatics named after N.L. Dukhov" (FSUE "VNIIA") (Moscow, Russian Federation)

Annotation. The change in the requirements of the automated systems market, as well as the tightening of economic sanctions against the Russian Federation, caused the need to create new devices within the framework of the TPTS-NT automation complex that provide data exchange according to the IEC-61850, IEC-60870, and MODBUS industrial protocols. Some of these devices, such as the modules TPTS55.1691 (module for interaction with the electrical part) and TPTS55.1105 (automation controller), have already passed pilot and industrial operation in Russian thermal facilities. For the objects currently under construction, a new promising device is being developed and tested, which provides both high throughput data reception/output according to industrial protocols and complicated real-time algorithmic operations.

Keywords: TPP, NPP, IEC-61850, IEC-61870, MODBUS TCP, CAD GET-R1, TPTS.

Введение

Активное строительство новых АЭС и ТЭС в России и за рубежом привело к росту потребности в развитых системах контроля и управления (СКУ), позволяющих, в рамках единой системы, решить задачи автоматизации как теплотехнического оборудования, так и управления электрической частью (ЭЧ). Для СКУ ЭЧ важнейшую роль играет поддержка средствами автоматизации взаимодействия с интеллектуальными устройствами (ИУ) по протоколам МЭК-61850, МЭК-60870, MODBUS.

Прием и обработка данных МЭК 61850 в КСА ТПТС

При разработке СКУ СНЭ и СКУ ЭЧ энергетических объектов России была поставлена цель: обеспечить единый интерфейс визуализации, общий подход к управлению всеми видами оборудования [1] и организации сигнализации, как теплотехнических, так и электрических объектов управления.

Для решения данной задачи в рамках КСА ТПТС-НТ были разработаны новые модули и функции. В частности, в процессорах и контроллерах автоматизации ТПТС-НТ была реализована программная функция индивидуального управления.

Необходимо отметить, что функция индивидуального управления доступна в ТПТС-НТ только с помощью отдельного модуля связи с процессом (ТПТС55.1673), поддерживающего только проводные связи с объектом управления. Логика функции индивидуального управления

в ТПТС берет начало еще от средств Teleperm ME и ТПТС51. За время эксплуатации различных поколений ТПТС на тепловых и атомных энергоблоках данная функция неоднократно дорабатывалась, и на текущий момент поддерживает практически все известные типы исполнительных механизмов и обладает свойством универсальности, как при взаимодействии с объектами управления, так и в части интерфейса с системой верхнего уровня.

Благодаря реализации программной функции индивидуального управления процессорах и контроллерах автоматизации ТПТС-НТ, в рамках одной приборной стойки стало доступно большое количество каналов индивидуального управления (до 256), при этом сохранена полноценная логика индивидуального управления, интерфейс оператора на верхнем уровне, а также развитая диагностика. Связь с электрическими и другими устройствами при этом может быть реализована через любой интерфейс, как с помощью модуля двоичного ввода/вывода, так и цифровой – через промышленные протоколы и новый модуль ТПТС55.1691.

Модуль ТПТС55.1691 из состава КСА ТПТС-НТ выполняет задачу обмена данными по промышленному протоколу МЭК-61850 [2], в соответствии с требованиями [3]. Полученные от устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) данные передаются по внутренней цифровой шине в контроллер автоматизации ТПТС55.1105, в котором, в соответствии с проектной конфигурацией, выполняется алгоритмическая обработка и отправка данных в СВБУ с сохранением меток времени и признаков качества сигналов, сформированных РЗА. Схема взаимодействия модулей ТПТС55.1691 и ТПТС55.1105 приведена на рис.1.

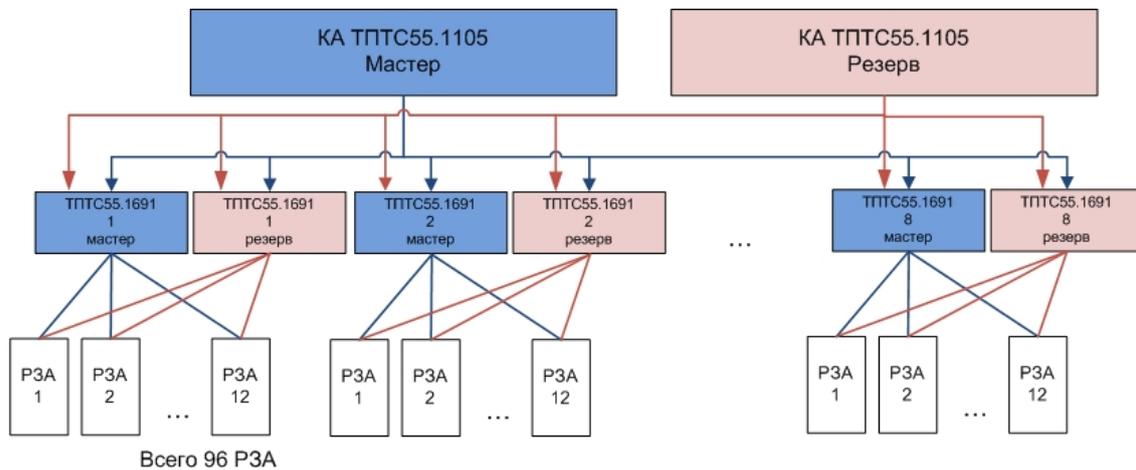


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей ТПТС55.1691/ТПТС55.1105 с ИУ (РЗА)

Проектирование обмена по промышленным протоколам

В рамках создания АСУ ТП для новейших объектов тепловой энергетики была разработана концепция нового средства проектирования электрической части в рамках GET-R1.

В соответствии с данной концепцией, проектирование включает следующие этапы:

- импорт в GET-проект файлов конфигурации терминалов РЗА различных производителей (были апробированы форматы конфигурационных файлов от ABB, ProSOFT, Tarconn, Siprotec, Wago, Schneider, ЭКРА);
- кодирование сигналов от ИУ по принятой на объекте системе классификации и кодирования (KKS или аналогичной);
- прием и обработку сигналов РЗА в прикладных алгоритмах;
- настройку передачи сигналов от РЗА в систему верхнего уровня (СВУ).
- настройку параметров обмена данными (отчетов РЗА).

С помощью данных инструментальных средств был разработан проект СКУ ЭЧ для объектов тепловой энергетики России. Внешний вид интерфейса проектирования обмена по протоколу МЭК 61850 САПР GET-R1 представлен на рис. 2.

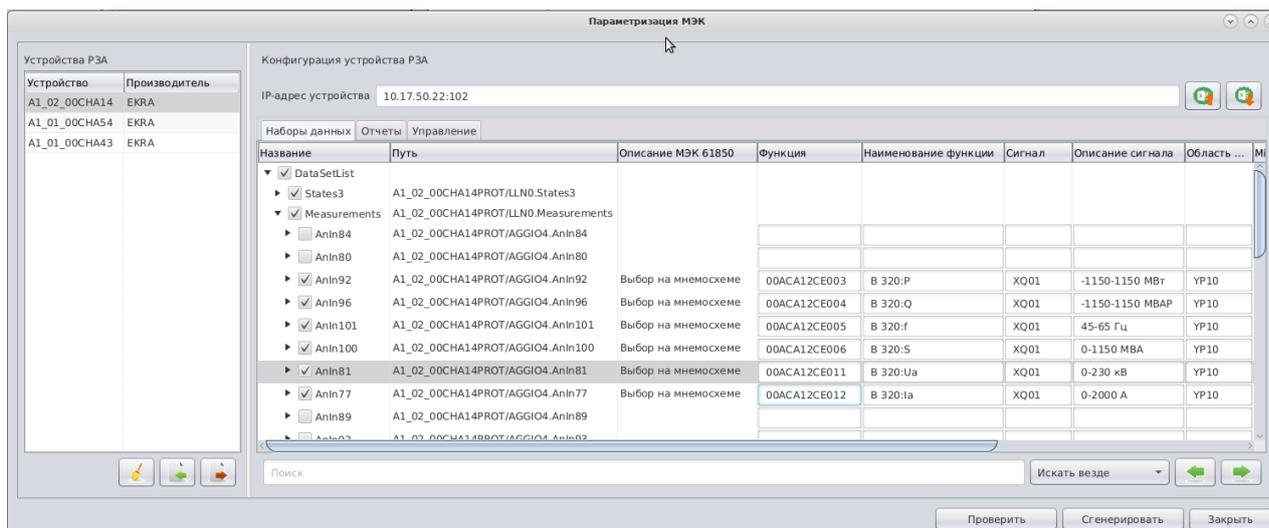


Рис. 2. Внешний вид интерфейса параметрирования обмена по протоколу МЭК 61850

Обобщая вышеописанное, можно констатировать, что для реализации SKU ЭЧ была выполнена существенная доработка КСА ТПТС-НТ и обеспечены возможности:

- обмена данными по промышленным протоколам МЭК61850 (MMS), включая как прием данных, так и выдачу команд;
- индивидуального управления большим количеством устройств через программную функцию индивидуального управления и цифровые интерфейсы ввода/вывода;
- передачи данных от РЗА в систему верхнего уровня (как для архивации, так и для визуализации) с сохранением меток времени и признаков качества, установленных РЗА, с дополнением метки качества признаками, указывающими на место потери сигнала, причину передачи сигнала;
- автоматизированного проектирования обмена данными.

Данные решения прошли апробацию и опытную эксплуатацию, и находятся в промышленной эксплуатации на объектах тепловой энергетики России.

В рамках развития КСА ТПТС в части взаимодействия с устройствами по промышленным протоколам планируется решить следующие задачи:

- обеспечить обмен данными, помимо протокола МЭК 61850, также по протоколам МЭК 60870-5-101 [4], МЭК 60870-5-104 [5], MODBUS TCP;
- увеличить пропускную способность ТПТС в части приема и обработки данных от промышленных протоколов;
- обеспечить возможность выдачи из ТПТС в смежные системы данных по промышленным протоколам;
- обеспечить синхронизацию времени терминалов РЗА.

Для решения перечисленных задач в рамках КСА ТПТС-НТ в настоящее время ведётся разработка нового устройства на базе промышленного компьютера – СКАТ (Сервер комплексной автоматизации типовой). СКАТ представляет собой программный комплекс, позволяющий в рамках единого устройства выполнять задачи как обмена данными по протоколам МЭК-61850, МЭК 60870-5-101, МЭК 60870-5-104, MODBUS TCP, так и задачи алгоритмической обработки и передачи данных в СВУ. Схема устройства СКАТ приведена на рис. 3.

В отличие от решения на базе модулей ТПТС55.1691 и ТПТС55.1105, СКАТ обладает существенно большей пропускной способностью за счет отсутствия необходимости передачи данных между модулями. Кроме того, это позволяет обеспечить синхронизацию времени устройств РЗА по протоколу NTP без потери точности. Устройство может также обмениваться данными с модулями связи с процессом, входящими в состав комплекса средств автоматизации ТПТС-НТ.

В настоящее время СКАТ находится во ВНИИА в стадии испытаний.

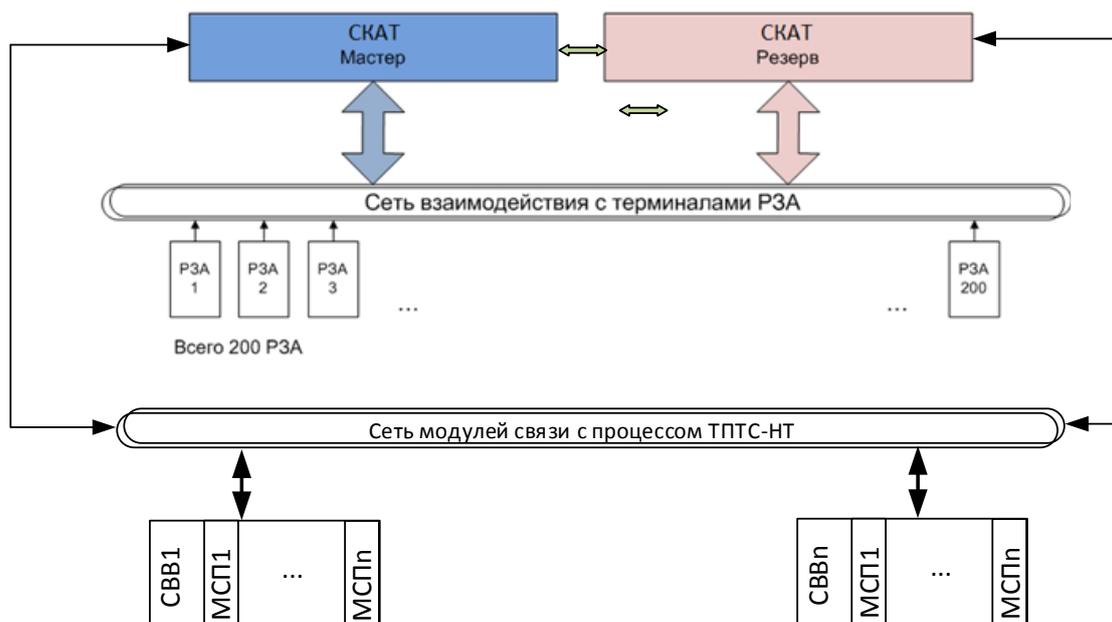


Рис. 3 Логическая схема обмена данными СКАТ.

Заключение

Опыт наладки и эксплуатации тепловых электростанций показал преимущества применения систем контроля и управления, позволяющих в рамках единой системы решить задачи автоматизации теплотехнического оборудования и электрической части энергоблока. Такое решение позволило обеспечить единообразный подход к построению алгоритмов управления, унифицировать решения по организации сигнализации, позволило упростить эксплуатацию АСУТП за счет применения унифицированного комплекса средств автоматизации.

Использование инструментальных средств, позволяющих вносить необходимые улучшения в алгоритмы управления всеми видами оборудования электростанции, упрощает задачу развития автоматизированной системы управления, в том числе и в случае широкого применения интеллектуальных устройств, объединяющихся в программно-технический комплекс с использованием промышленных протоколов.

В настоящее время, с учётом полученного опыта, ведутся работы по введению в КСА ТПТС-НТ различных промышленных протоколов, как на базе модуля ТПТС55.1691, так и СКАТ – решения на базе промышленного компьютера. Обеспечивается развитие средств проектирования GET-R1 в части новых интерфейсов проектирования обмена данными по различным промышленным протоколам.

Список литературы

1. Биленко В.А., Грехов Л.Л., Свидерский А.Г., Струков А.П. Опыт эксплуатации микропроцессорных АСУ ТП мощных модернизированных энергоблоков. М.: ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2013, № 10, с. 18–28.
2. ГОСТ Р МЭК 61850-5-2011. Сети и системы связи на подстанциях.
3. Общие технические требования к АСУТП ПС ЕНЭС. Основные требования к программно-техническим средствам и комплексам. СТО ФСК ЕС 56947007-25.040.40.226-2016.
4. ГОСТ Р МЭК 60870-5-101-2006. Устройства и системы телемеханики. Протоколы передачи.
5. ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004. Устройства и системы телемеханики. Доступ к сети для ГОСТ Р МЭК 60870-5-101 с использованием стандартных транспортных профилей.

УДК 621.3.088.7

**АДАПТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В ПРИБОРАХ
СО СВЕРХНИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

ПАНФЕРОВ Д.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики» (ФГУП «ВНИИА»)
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация: Рассматривается способ адаптивной цифровой фильтрации импульсных помех, обеспечивающий быстрый отклик на скачкообразные изменения сигнала. Способ отличается минимальными требованиями к вычислительным ресурсам для обработки измерительного сигнала в приборах со сверхнизким энергопотреблением.

Ключевые слова: цифровой фильтр, адаптивный фильтр, цифровая обработка сигналов, импульсные помехи.

**ADAPTIVE DIGITAL FILTERING OF PULSE NOISE IN ULTRA-LOW POWER
CONSUMPTION DEVICES**

DMITRY V. PANFEROV

*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Automatics» (FSUE «VNIIA»)
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. A method of adaptive digital filtering of pulse noise which provides a fast response to abrupt changes in the signal is considered. The method is characterized by minimal requirements for computing resource for processing the measurement signal in devices with ultra-low power consumption.

Keywords: digital filter, adaptive filter, digital signal processing, pulse noise.

Введение

Датчики физических величин, в частности датчики давления, работающие на промышленных объектах, подвержены влиянию сильных электромагнитных помех (ЭМП) высокой энергии, приводящих к искажению измерительного сигнала. Системы контроля и управления (СКУ) для корректной выработки управляющих воздействий должны получать от датчика информацию (измерительный сигнал) с наименьшими искажениями, с максимально возможной скоростью опроса, с наименьшими задержками результата измерения. Максимально возможное быстроедействие датчика при высокой точности измерений в динамическом режиме, как например, в системах обнаружения утечек (СОУ) нефтепроводов [1], важно для обеспечения безопасности эксплуатации оборудования на промышленных объектах. В то же время необходимо отфильтровывать высокоамплитудные импульсные помехи, вызванные различными внешними факторами. Традиционные методы фильтрации, удовлетворяющие указанным противоречивым требованиям, предъявляют высокие требования к вычислительным ресурсам и, соответственно, к энергопотреблению прибора. Этим ограничивается их применение в датчиках со сверхнизким энергопотреблением.

**Метод построения адаптивного фильтра импульсных помех с минимальными
требованиями к вычислительным ресурсам**

Для фильтрации сигналов применяются цифровые фильтры (ЦФ), математически описываемых разностными уравнениями [2, 3], в которых входная последовательность $x(n)$ преобразуется в выходную $y(n)$:

$$y[n] = \sum_{r=0}^M a_r x[n-r] \pm \sum_{s=1}^N b_s y[n-s], \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Целые числа M , N , определяют порядок ЦФ. Весовые коэффициенты a_r и b_s однозначно определяют передаточную характеристику фильтра.

По виду разностных уравнений (1) существуют два класса цифровых фильтров [3]: нерекурсивные (НЦФ), в которых выходной параметр $y(n)$ определяется только значениями входной последовательности; и рекурсивные (РЦФ), в которых выходной параметр $y(n)$ определяется как текущим значением $x(n)$, так и предшествующими значениями входных и выходных последовательностей.

Известно, что при их соизмеримых порядках, а, следовательно, и требованиях к вычислительным ресурсам, РЦФ обладают более высокой эффективностью по сравнению с

НЦФ [2, 3]. Однако при выборе весовых коэффициентов РЦФ необходимо обеспечить условия устойчивости, в отличие от нерекурсивных фильтров, которые устойчивы всегда.

Для получения высокой крутизны области перехода от полосы пропускания к полосе подавления фильтр должен иметь высокий порядок. Соответственно количество вычислительных операций, затрачиваемых на обработку разностного уравнения фильтра, также будет высоким.

В адаптивных цифровых фильтрах весовые коэффициенты разностного уравнения изменяются по определенному закону с целью минимизации нежелательных (шумовых) составляющих обрабатываемого сигнала. Для фильтров высокого порядка требуются значительные ресурсы для вычисления большого количества весовых коэффициентов. Если в качестве основы адаптивного фильтра используется рекурсивный алгоритм, дополнительно возникает необходимость контролировать условия устойчивости фильтра. В связи с этим рекурсивные алгоритмы значительно реже используются для создания адаптивных фильтров. В приборах и системах со сверхнизким энергопотреблением реализация сложных алгоритмов фильтрации сигналов приводит либо к увеличению длительности цикла обработки информации, либо к увеличению энергопотребления при сохранении необходимой длительности цикла. Оба этих следствия приводят к ограничению возможностей цифровой адаптивной фильтрации сигналов в системах с автономным питанием с длительным периодом автономности, а также в датчиках с питанием от токовой петли 4-20 мА, предназначенных для выполнения задач с быстрой реакцией на аварийные события. Предельным упрощением цифрового фильтра, определяемого разностным уравнением (1), является рекурсивный фильтр 1-го порядка, описываемый в общем виде разностным уравнением:

$$y[n] = a_0 * x[n] + a_1 * x[n - 1] - b_1 * y[n - 1] \quad (2)$$

и простым условием устойчивости [4]:

$$|b_1| < 1. \quad (3)$$

Комплексная передаточная функция рекурсивного цифрового фильтра нижних частот (РЦФ НЧ) от комплексной переменной z представляется выражением [4]:

$$H(z) = \frac{a_0}{1 + b_1 * z^{-1}}, \quad (4)$$

$$z = e^{j\omega T}, \quad (5)$$

где ω – частота сигнала, T – интервал дискретизации.

Функция $H(z) = H(j\omega T)$ рассматривается на частотном диапазоне $0 \leq \omega \leq \pi$. Коэффициенты b_1 и a_0 связаны между собой следующим образом:

$$b_1 = 1 - a_0. \quad (6)$$

Для построения адаптивного фильтра на базе РЦФ 1-го порядка, требующего минимума вычислительных операций, необходимо изменять коэффициенты a_0 и b_1 по определенному закону, позволяющему минимизировать нежелательные составляющие в информационном сигнале. Нахождение эффективного и столь же простого алгоритма адаптации позволили бы применять такой фильтр в приборах со сверхнизким энергопотреблением без заметного снижения быстродействия и без увеличения энергопотребления.

Импульсные помехи, присутствующие в информационном сигнале, имеют высокое значение первой производной. Вычисляя значение первой производной или скорости изменения сигнала на каждой текущей выборке сигнала, и изменяя пропорционально модулю этой величины значение весового коэффициента рекурсивного цифрового фильтра нижних частот, получаем адаптивный фильтр. При этом для того чтобы снизить чрезмерно высокую чувствительность к пульсациям сигнала с низкой амплитудой, при обработке необходимо применить небольшое время релаксации фильтра. В результате вычисление скорости изменения сигнала с внесением времени релаксации сводится к построению алгоритма рекурсивного цифрового фильтра верхних частот (РЦФ ВЧ). А алгоритм всей адаптивной фильтрации сводится к построению двух рекурсивных цифровых фильтров 1-го порядка, причем коэффициент основного – РЦФ НЧ – пропорционально зависит через масштабирующий коэффициент Ka от модуля выходного сигнала второго – РЦФ ВЧ, выполняющего роль алгоритма адаптации.

Комплексная передаточная функция РЦФ ВЧ:

$$H_h(z) = \frac{a_{h0} + a_{h1} * z^{-1}}{1 + b_{h1} * z^{-1}}. \quad (7)$$

Тогда весовые коэффициенты РЦФ НЧ с учетом масштабирующего коэффициента K_a будут определяться модулем функции $H_h(z)$:

$$k_{b1}(z) = K_a * |H_h(z)|, \quad (8)$$

$$k_{a0}(z) = 1 - k_{b1}(z). \quad (9)$$

А комплексная передаточная функция всего адаптивного фильтра будет:

$$H_{adp}(z) = \frac{k_{a0}(z)}{1 + k_{b1}(z) * z^{-1}} = \frac{k_{a0}(j\omega T)}{1 + k_{b1}(j\omega T) * e^{-j\omega T}}. \quad (10)$$

При установившейся или медленно изменяющейся величине входного сигнала ($\omega \rightarrow 0$), значение передаточная функция $H_{adp}(z)$ имеет максимально широкую полосу пропускания. При наличии импульсных помех в обрабатываемом сигнале, имеющих, как известно, в своем спектре преобладание верхних частот, частота среза РЦФ НЧ, определяемого передаточной функцией $H_{adp}(z)$, уменьшается, что приводит к подавлению импульсной помехи.

Анализ выражения (10) с учетом (7-9) выявляет уникальные свойства полученного адаптивного фильтра. При действительном скачкообразном изменении обрабатываемого сигнала с одного установившегося состояния в другое установившееся состояние адаптивный фильтр, построенный на основе рекурсивного алгоритма, т.е. имеющий бесконечную импульсную характеристику (БИХ), показывает свойства фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ). В результате переходной процесс занимает значительно меньшее время по сравнению с обработкой традиционными рекурсивными алгоритмами.

Для ускорения работы в приборах со сверхнизким энергопотреблением в выражениях рекурсивных цифровых фильтров могут использоваться целочисленные вычисления с использованием коэффициента демпфирования $Kd(z)$:

$$k_{a0}(z) = \frac{1}{Kd(z)}, k_{b1}(z) = -\frac{Kd(z)-1}{Kd(z)}, |Kd(z)| \geq 1. \quad (11)$$

Представление РЦФ НЧ во временной области в этом случае будет:

$$y[n] = \frac{x[n] + y[n-1] * (Kd[n]-1)}{Kd[n]}, \quad (12)$$

где $x[n]$ – дискретная выборка входного сигнала в дискретный момент времени n ; $y[n]$ – значение выходного сигнала в дискретный момент времени n . Такая же замена может быть выполнена и для РЦФ ВЧ, где выходным сигналом будет величина, пропорциональная скорости изменения входного сигнала $x'[n]$.

Структурная схема адаптивного фильтра на основе рассматриваемого метода адаптивной фильтрации представлена на рис. 1.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2а показана переходная характеристика рассматриваемого адаптивного фильтра. Как было показано выше, она имеет характер конечную длительность, хотя в основе алгоритма адаптивной фильтрации заложен фильтр с бесконечной импульсной характеристикой.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) рассматриваемого адаптивного фильтра для синусоидального сигнала, показанная на рис. 3, демонстрирует свойства традиционного РЦФ НЧ. При этом несмотря на то, что фильтр построен на основе РЦФ 1-го порядка, он показывает крутизну переходной зоны между полосой пропускания и полосой задерживания эквивалентную РЦФ 2-го порядка (наклон до 38 дБ/дек).

Способность рассматриваемого адаптивного фильтра подавлять импульсные помехи представлена коэффициентом подавления K_p . Исходя из принципа работы данного фильтра, коэффициент подавления увеличивается в зависимости от следующих факторов: с увеличением амплитуды импульсной помехи, с увеличением масштабирующего коэффициента K_a , с уменьшением частоты среза РЦФ ВЧ ω_{nc} . В практических случаях коэффициент подавления импульсных помех может достигать значений 55-57 дБ (рис. 4).

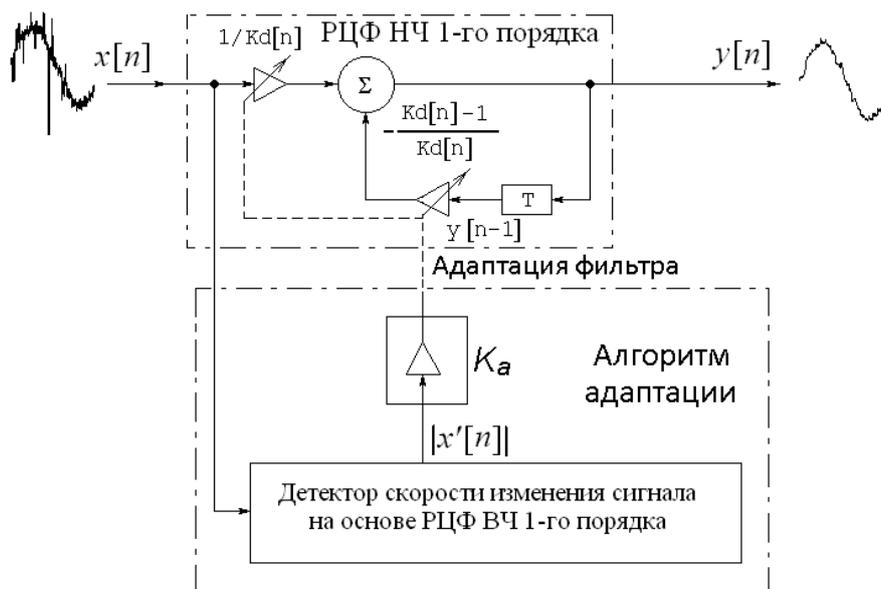


Рис. 1. Структурная схема цифрового фильтра с адаптацией по скорости изменения сигнала



Рис. 2. Переходная характеристика адаптивного фильтра

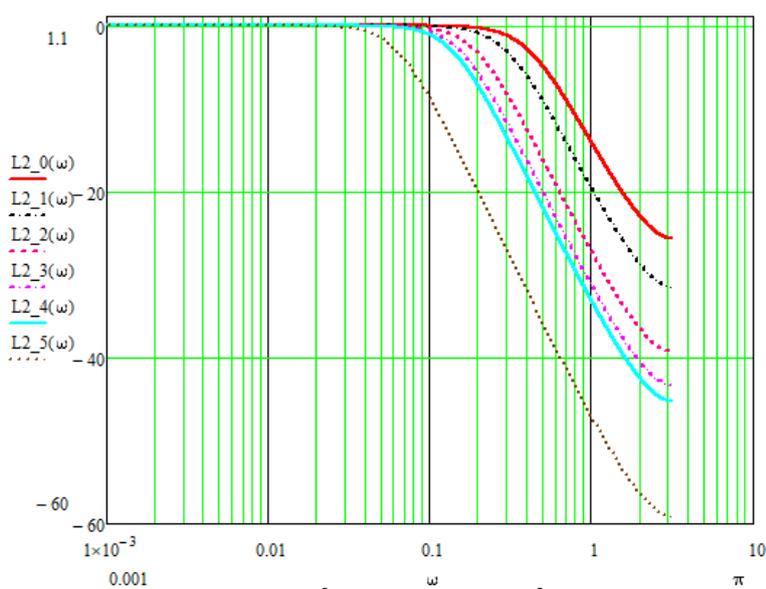


Рис. 3. ЛАЧХ адаптивного фильтра при различных фиксированных параметрах масштабирующего коэффициента K_a

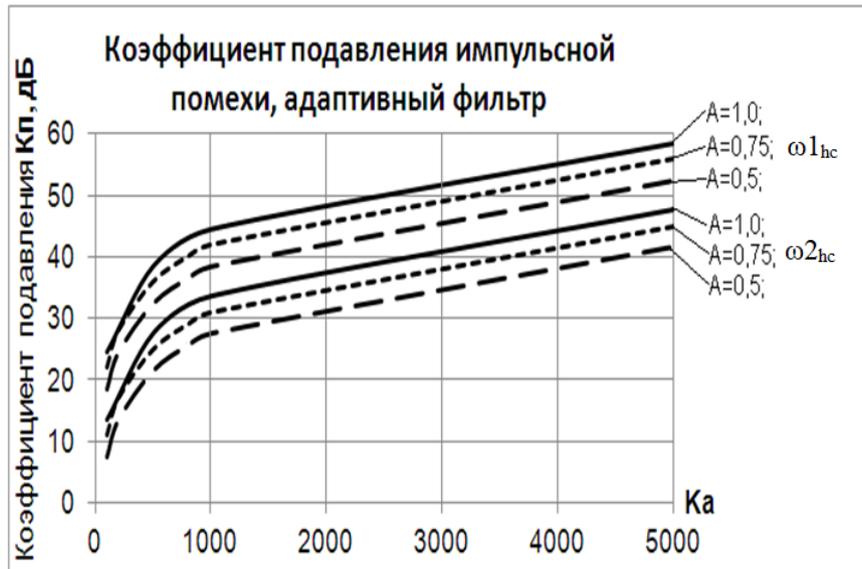


Рис. 4. Зависимость коэффициента подавления импульсной помехи с величиной относительной амплитуды 100, 75 и 50 % ($A=1,0$; $A=0,75$ и $A=0,5$) от масштабирующего коэффициента Ka при различных частотах среза РЦФ ВЧ ($\omega_{1hc} < \omega_{2hc}$)

На рис. 5 показаны диаграммы реального измерительного сигнала, полученного из системы обнаружения утечек нефтепроводов, и результаты его обработки новым цифровым адаптивным фильтром в сравнении с традиционными РЦФ НЧ 3-го порядка. Разработанный адаптивный фильтр обеспечивает более точную передачу формы сигнала (колебательный процесс после фронта падения давления) по сравнению традиционными РЦФ НЧ, искажающими переходный процесс.

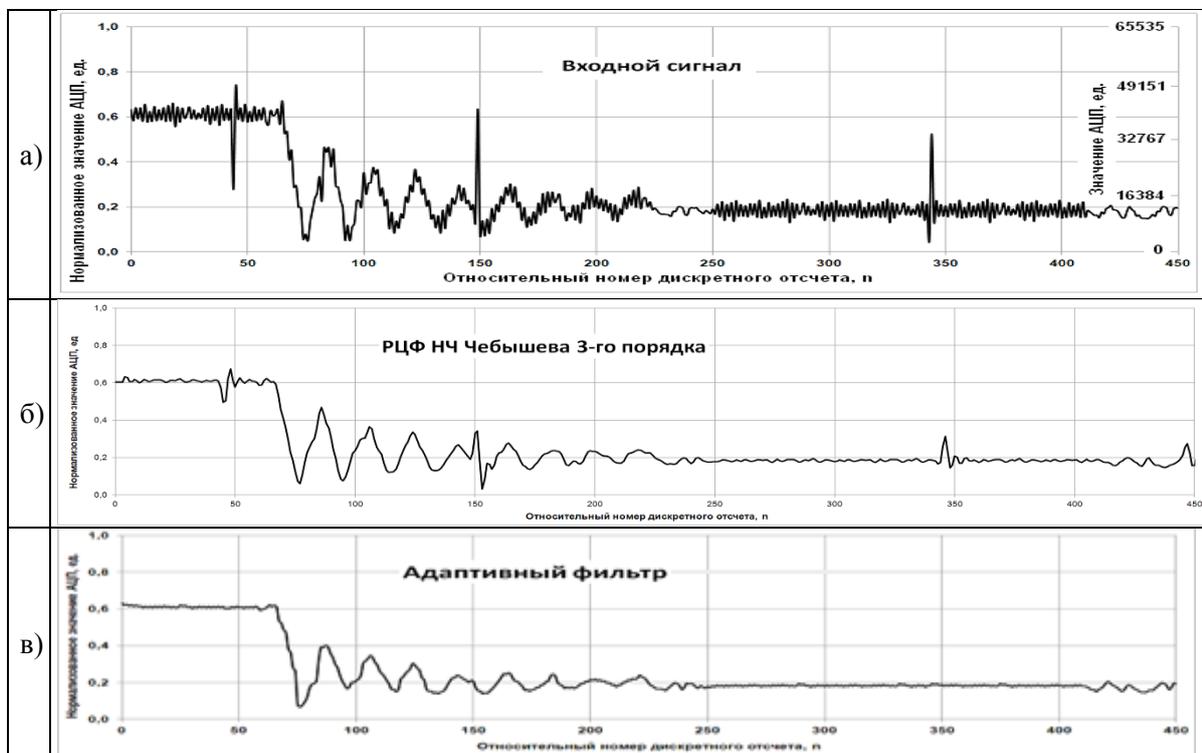


Рис. 5. Обработка реального зашумленного сигнала адаптивным фильтром: исходный сигнал (а); результаты обработки этого сигнала: РЦФ 3-го порядка (б, в), адаптивным фильтром (г)

Новизна предложенного решения заключается в разработке алгоритма адаптации, основанного на детектировании скорости изменения обрабатываемого сигнала, управляющего коэффициентами простого РЦФ НЧ 1-го порядка, позволившее при минимальных вычислительных ресурсах обеспечить высокоэффективное подавление (в практических применениях до 55...57 дБ) импульсных помех, в т.ч. высокоамплитудных, при максимальном сохранении формы сигнала, и минимизацию времени отклика при скачкообразных изменениях.

Заключение

Фильтр, выполненный на основе предложенного метода адаптивной фильтрации позволяет получить свойства, трудно достижимые при ограничении вычислительных ресурсов без существенного увеличения времени вычислений и использовании известных способов фильтрации:

а) обеспечивает высокую крутизну перехода от полосы пропускания к полосе задерживания (для синусоидального сигнала), сопоставимую с характеристиками рекурсивных фильтров 2-го или 3-го порядков;

б) несмотря на то, что адаптивный фильтр построен на основе рекурсивного фильтра, он имеет конечную импульсную характеристику;

в) обеспечивает время установления выходного сигнала, меньшее времени установления традиционных рекурсивных фильтров; выходной сигнал имеет конечный переходный процесс;

г) обеспечивает высокую степень подавления высокоамплитудных импульсных помех (на практике от 13 до 57 дБ), превосходящую по эффективности РЦФ высоких (выше 3-го) порядков; при этом степень подавления импульсных помех увеличивается с ростом их амплитуды;

д) требует минимальные вычислительные ресурсы, сопоставимые с РЦФ 2-го или 3-го порядка.

Программный фильтр, основанный на рассмотренном методе адаптивной фильтрации, внедрен в изделия, выпускаемые ФГУП «ВНИИА» для нефтегазовой промышленности.

На исполняемый код программы цифрового адаптивного фильтра получено свидетельство Роспатента о государственной регистрации программ для ЭВМ №2016661563 [5]. Подана заявка на изобретение в Европейско-Азиатское патентное ведомство [6], которая прошла экспертизу и находится на стадии рассмотрения по существу.

Список использованной литературы

1. Латыпов А.Ф., Князев А.А., Ковшов В.Д. О применении цифровых датчиков давления в системах обнаружения утечек. // Нефтегазовое дело, 2010. <http://www.ogbus.ru>
2. Li Tan. Digital Signal Processing. Fundamentals and Applications.: DeVry University Decatur, Georgia. Elsevier Inc., 2008.
3. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. Пер. с англ./ Под ред. А.М. Трахтмана. М.: Сов. Радио, 1980. – 224с., ил.
4. Гетманов В.Г. Цифровая обработка сигналов. М.: МИФИ, 1997. – 128 с.
5. Панферов Д.В. Цифровой адаптивный фильтр сигналов сенсора давления ADAPT_FILT. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661563. 13 октября 2016 г.
6. Панферов Д.В. Способ адаптивной цифровой фильтрации импульсных помех и фильтр для его реализации. Уведомление о получении евразийской заявки. Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС). Номер регистрации 2017000154. Дата подачи 25 декабря 2017 г.

УДК 681.51.01

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ САУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА ПАРОВЫХ КОТЛОВ

КУЛАКОВ Г. Т., КАРНИЦКИЙ Н. Б., КРАВЧЕНКО В. В.

Белорусский национальный технический университет,
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Предложена инвариантная система автоматического управления теплоэнергетическими процессами с измененными динамическими характеристиками, реализованная для регулирования температуры перегретого пара на котлах ТГМП-114 энергоблоков Лукомльской ГРЭС с помощью первого и второго впрысков. Показана высокая эффективность предлагаемой системы в сравнении с типовой системой автоматического регулирования с дифференциатором при штатных параметрах динамической настройки.

Ключевые слова: Инвариантная система автоматического регулирования, параметры регулирования, перегретый пар, дисперсия, эффективность.

ESTIMATION OF ECONOMIC EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION OF INVARIANT ACS OF SUPERHEATED STEAM TEMPERATURE OF STEAM BOILERS

HENADZI KULAKOU, MIKALAI KARNITSKI, ULADZIMIR KRAUCHANKA

Belarusian National Technical University,
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An invariant system for automatic control of heat and power processes with modified dynamic characteristics is proposed, implemented to control the temperature of superheated steam on TGMP-114 boilers of power units of Lukoml SDPP using the first and second injections. The high efficiency of the proposed system is shown in comparison with a typical automatic control system with a differentiator with standard dynamic tuning parameters.

Keywords: Invariant automatic control system, control parameters, superheated steam, dispersion, efficiency.

Введение

Актуальность проблемы создания высококачественных систем автоматического управления (САУ) теплоэнергетическими процессами с измененными динамическими характеристиками и взаимосвязанными параметрами возросла в условиях современности, в том числе после ввода в эксплуатацию первого и планируемом в 2022 году вводом второго энергоблока Белорусской АЭС. Это связано с изменением традиционных подходов к резервированию электрических мощностей в энергосистеме, в том числе привлечению для этих целей энергоблоков, ранее эксплуатируемых в базовой части графике электрических нагрузок. В частности, идет речь об энергоблоках 300 МВт с котлами ТГМП-114 Лукомльской ГРЭС. В связи с этим актуальной становится задача оценки эффективности внедрения инвариантных САУ как при отработке наиболее опасных измеренных внутренних возмущений, так и неизмеренных внешних.

Методика проведения эксперимента

Промышленные испытания разработанных БНТУ инвариантных САУ температуры перегретого пара первых и вторых впрысков пароохладителей проводились на паровых котлах ТГМП-114 Лукомльской ГРЭС с использованием разработанных аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации динамических систем теплоэнергетических процессов [1-6] и традиционных методов тепловых испытаний котлов [7].

Испытания проводились в рабочем диапазоне изменения нагрузки от 100 до 40 % номинального значения и предварительные результаты показали, что на первом этапе внедрение таких систем позволяет улучшить показатели качества регулирования (время регулирования, модуль площади ошибки регулирования при внутренних и внешних возмущениях, среднее значение дисперсии изменения температуры перегретого пара) в два раза по сравнению с типовой САУ с дифференциатором при штатных параметрах динамической настройки системы.

Точность поддержания заданного значения температуры перегретого пара на выходе из котла существенно влияет на экономичность, надежность и долговечность его работы. Так, повышение температуры пара на 1,0 °С снижает долговечность пароперегревателя из стали 12Х1МФ на 3 %, что при проектном ресурсе металла в 240000 часов составляет 7200 часов [6].

Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара должна гарантировать в регулировочном диапазоне изменения нагрузок котла: устойчивую работу автоматических регуляторов впрысков (отсутствие автоколебаний) и ограниченную частоту их включения; протекание переходных процессов, вызываемых скачкообразным изменением нагрузки на 10 % (при исходной номинальной нагрузке), с максимальным отклонением температуры свежего пара на выходе из котла на 8 °С, для промежуточного пара – 10 °С и значениями интегрального квадратичного критерия соответственно 5000 и 10000 (°С)² · с [8]. Вместе с тем повышение температуры перегретого пара перед турбиной повышает располагаемый теплоперепад, увеличивает экономичность работы турбины.

Внедрение модернизированных инвариантных регуляторов впрысков уменьшает среднегодовые максимальные отклонения температур перегретого пара от заданных значений примерно в 2 раза. Это позволяет повысить среднегодовую температуру перегретого пара перед турбиной на 1°С (с 540 °С до 541 °С).

Определим следующие показатели работы энергоблока:

Повышение $\eta_{\text{энергоблока}}$ ($\eta_{\text{эб}}$) при вышеуказанных условиях определится как:

$$\eta_{\text{эб}} = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{\text{ку}} \cdot \eta_{\text{тп}}, \quad (1)$$

где η_t - термический КПД при определенных p и t ; η_{oi} - внутренний относительный КПД турбины; η_m - механический КПД; η_g - КПД генератора; $\eta_{\text{ку}}$ - КПД котельной установки; $\eta_{\text{тп}}$ - КПД, учитывающий потери теплоты в трубопроводах. За исключением η_t остальные пять позиций по КПД примем на основании литературных данных [8]: $\eta_{oi} = 0,9$; $\eta_m = 0,985$; $\eta_g = 0,985$ (при водородном охлаждении); $\eta_{\text{ку}} = 0,94$ (при работе на природном газе); $\eta_{\text{тп}} = 0,975$.

Поскольку в сравниваемых случаях эти пять КПД остаются неизменными, то основное внимание уделим термическому КПД, определяемому по *DiagramHS* по известным p и t .

Соответственно, в исходном варианте (вариант А) при $p_0 = 23,54$ МПа и $t_0 = 540$ °С с учетом потери давления в регулирующих клапанах 5% [8] определим параметры пара при $p'_0 = 22,36$ МПа и $t'_0 = 535,5066$ °С. Значение $h_0 = 3324,357$ кДж/кг.

После внедрения нового регулятора впрысков параметры пара (вариант В) составят при $p_0 = 23,54$ МПа, $t_0 = 541$ °С, $p'_0 = 22,36$ МПа и $t'_0 = 536,5202$ °С. Значение $h_0 = 3327,572$ кДж/кг.

Прирост срабатываемого теплоперепада при повышении температуры t_0 на 1°С составил:

$$\Delta H = h_{0(\text{вариантВ})} - h_{0(\text{вариантА})} = 3,215 \text{ кДж/кг}. \quad (2)$$

Проведем определение термического КПД с использованием графика зависимости его от температуры острого пара. По данным [8] определим теоретическое его значение: $\eta_t^A = 0,4575$ (при $p'_0 = 22,36$ МПа, $t'_0 = 535,5066$ °С). Затем найдем срабатываемый перепад по h, S -диаграмме, предварительно рассчитав тепловую схему энергоблока 300 МВт при стандартных условиях с $p_k = 0,0034$ МПа. Учитывая тот факт, что подвод теплоты на участке « h'_k » - « $h_{\text{тп}}$ » остается величиной постоянной, в дальнейшем будем рассматривать изменения, касающиеся только процессов, связанных с паром. Сравним увеличение срабатываемого

теплоперепада двух вариантов и учетом повышение η_t за счет регенеративного подогрева питательной воды, на величину 10% [8].

Результаты и их обсуждение

1. Относительное увеличение теплоперепада:

$$K_{\Delta H} = \frac{\Delta H_B}{\Delta H_A} = \frac{(h_0 - h_{\text{тп}}' + h_{\text{тп}}'' - h_{\text{к}})_B}{(h_0 - h_{\text{тп}}' + h_{\text{тп}}'' - h_{\text{к}})_A} = \frac{3327,575 - 2926,8 + 3540,5 - 2282}{3324,357 - 2926,8 + 3540,5 - 2282} = 1,002. \quad (3)$$

Таким образом, мы получим повышающий коэффициент $K_{\Delta H} = 1,002$, который учитывает некоторый рост энтальпии пара в варианте с установкой нового регулятора впрысков.

$$\text{Тогда } \eta_t^B = \eta_t^A \cdot K_{\Delta H} = 0,4575 \cdot 1,002 = 0,4584. \quad (4)$$

Таким образом, повышение КПД энергоблока составит с учетом всех шести составляющих:

$$\begin{aligned} \Delta \eta_{\text{бл}} &= \eta_{\text{бл}}^B - \eta_{\text{бл}}^A = (\eta_t^B - \eta_t^A) \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_r \cdot \eta_{ky} \cdot \eta_{\text{тп}} = \\ &= (0,4584 - 0,4575) \cdot 0,9 \cdot 0,985 \cdot 0,985 \cdot 0,985 \cdot 0,94 \cdot 0,975 = 0,00072. \end{aligned} \quad (5)$$

2. Уменьшение расхода топлива на энергоблок.

В общем случае удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч электроэнергии определяется:

$$b_{\text{зз}} = \frac{123}{\eta_{\text{бл}}} \text{ г у.т./кВт} \cdot \text{ч}. \quad (6)$$

С учетом регенеративного подогрева питательной воды $\eta_{\text{эб}} = \eta_{\text{бл}} \cdot 1,1$, где 1,1 – коэффициент, учитывающий наличие регенерации. Учетом и коэффициенты $\eta_{oi}, \eta_m, \eta_r, \eta_{ky}, \eta_{\text{тп}}$:

$$\eta_{\text{эб}}^A = 0,4575 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,985 \cdot 0,985 \cdot 0,94 \cdot 0,975 = 0,4027;$$

$$\eta_{\text{эб}}^B = 0,4584 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,985 \cdot 0,985 \cdot 0,94 \cdot 0,975 = 0,4035.$$

3. Экономия топлива при выработке 1 кВт·ч электроэнергии:

$$\Delta b_{\text{зз}} = \frac{123}{\eta_{\text{эб}}^A} - \frac{123}{\eta_{\text{эб}}^B} = 0,6056 \text{ г у.т./кВт} \cdot \text{ч} = 0,6056 \cdot 10^{-6} \text{ т у.т./кВт} \cdot \text{ч}. \quad (7)$$

Найдем экономию топлива при работе энергоблока 16 часов в сутки (2/3 суток) при максимальной нагрузке $N_3 = 300$ МВт и постоянном давлении

$$\Delta B_{2/3} = \Delta b_{\text{зз}} \cdot N_3 \cdot 16 = 0,6056 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 16 = 0,6056 \cdot 0,3 \cdot 16 = 2,907 \text{ т у.т.} \quad (8)$$

Учитывая стоимость ($\Pi_{\text{у.т.}}$) 1 т у. т. в ГПО «Белэнерго» в 2021 году, равной 210 долл., получим экономию топлива в денежном выражении:

$$\Delta \mathcal{E}_{2/3} = \Delta B_{2/3} \cdot \Pi_{\text{у.т.}} = 2,907 \text{ т у.т.} \cdot 210 \text{ долл} = 610,47 \text{ долл.} \quad (9)$$

4. При скользящем давлении пара ($p_0 = var$) при частичной нагрузке (в данном случае 120 МВт) энтальпия пара возрастает, тогда как при постоянном давлении энтальпия перед первой ступенью равна энтальпии при номинальной нагрузке. При скользящем давлении температура пара перед первой ступенью поддерживается постоянной. В нашем случае при установке нового регулятора впрысков она равна 541°C .

Рассмотрим версию с установкой новых регуляторов впрыска и сравним вариант работы блока с этими регуляторами при постоянном давлении $p_0 = 23,54$ МПа и $t_0 = 541^\circ\text{C}$ и вариант с переходом на скользящее давление и $t_0 = 541^\circ\text{C} (const)$. В первом случае энтальпия

пара на входе в турбину с учетом 5% потери в клапанах и снижении температуры с 541°C до $536,5202^\circ\text{C}$ при давлении $p_0 = 22,36\text{МПа}$, составит $h_0 = h_0' = 3327,572\text{кДж/кг}$, как уже отмечалось ранее. Таким образом, $h_0 = h_0' = 3327,572\text{кДж/кг}$ и является величиной постоянной.

Во втором случае процессы происходят иначе. При исходных параметрах пара $p_0 = 23,54\text{МПа}$ и $t_0 = 541^\circ\text{C}$ энтальпия пара составляет $h_0 = 3327,572\text{кДж/кг}$. Далее при постоянной температуре $t_0 = 541^\circ\text{C}$ происходит «скольжение» давления в привязке к изотерме, равной 541°C , и при частичной нагрузке (в данном случае $N_3 = 120\text{МВт}$) это давление несколько возрастает, что ведет к росту энтальпии пара на входе в турбину. Определяем этот прирост по h, S -диаграмме при перемещении из точки 0 ($p_0 = 23,54\text{МПа}, t_0 = 541^\circ\text{C}$) в точку 0' ($p_0' = 22,36\text{МПа}, t_0 = 541^\circ\text{C}$). Энтальпия в этой точке составит: $h_0' = 3341,7\text{кДж/кг}$.

5. Прирост энтальпии, а следовательно располагаемого теплоперепада после перехода на скользящее давление составит:

$$\Delta h = h_0' - h_0 = 3341,7 - 3327,572 = 14,128\text{кДж/кг}. \quad (10)$$

Располагаемый теплоперепад при постоянном давлении острого пара был определен ранее и составил $\Delta H_B = 1659,275\text{кДж/кг}$.

Располагаемый теплоперепад при переходе на скользящее давление острого пара возрос и составил $\Delta H_{B(CD)} = 1673,403\text{кДж/кг}$.

Тогда относительное повышение теплоперепада для установки нового регулятора впрысков при сравнении режимов постоянного и скользящего давлений определится как:

$$K_{\Delta H(CD)} = \frac{\Delta H_{B(CD)}}{\Delta H_B} = \frac{1673,403}{1659,275} = 1,0085. \quad (11)$$

6. С учетом повышающего коэффициента КПД энергоблока составит:

$$\eta_{36(CD)}^B = \eta_{36}^B \cdot K_{\Delta H(CD)} = 0,4035 \cdot 1,0085 = 0,4069. \quad (12)$$

Экономия топлива при выработке 1 кВт·ч электроэнергии

$$\Delta b_{36(CD)} = \frac{123}{\eta_{36}^B} - \frac{123}{\eta_{36(CD)}^B} = 2,5471\text{г у.т./кВт} \cdot \text{ч} = 2,5471 \cdot 10^{-6}\text{ т у.т./кВт} \cdot \text{ч}. \quad (13)$$

7. Определим экономию топлива при работе энергоблока 8 часов в сутки (1/3 суток) при минимальной нагрузке $N_3 = 120\text{МВт}$ и скользящем давлении и получим экономию топлива в денежном выражении

$$\Delta \mathcal{E}_{1/3(CD)} = 35,21\text{т у.т.} \cdot 210\text{долл} = 7394,1\text{долл}.$$

По данным ПТО ЛГРЭС наработка котлов энергоблока №2 в 2020 году в среднем составила 7789,2 часов или 324,6 суток.

Примем, что 2/3 в сутки энергоблок работает при максимальной нагрузке и постоянным давлением пара перед турбиной (216,4 суток), 1/3 в сутки – при минимальной нагрузке и переменном давлении пара перед турбиной (108,2 сутки).

В результате годовая экономия условного топлива при постоянном давлении пара перед турбиной составит:

$$\Delta B_{2/3}^{\text{год}} = 2,907 \cdot \frac{16}{24} \cdot 216,4 = 419,4\text{т у.т.},$$

а при переменном давлении –

$$\Delta B_{1/3}^{\text{год}} = 35,21 \cdot \frac{8}{24} \cdot 108,2 = 1269,9\text{т у.т.}$$

При этом годовая экономия условного топлива составит:

$$\Delta B^{\text{год}} = 419,4 + 1269,9 = 1689,3 \text{ т у.т.}$$

При стоимости 1 т у.т. в 210 долл. в денежном выражении годовая экономия будет:

$$\mathcal{E}_1^{\text{год}} = 210 \cdot 1689,3 = 354753 \text{ долл. или } 2,6 \cdot 354753 = 922357,8 \text{ руб. (1 долл. = 2,6 руб.)}$$

Заключение

Вместе с тем по данным [6] уменьшение среднегодовой дисперсии изменения температуры пара приводит по минимальным оценкам к увеличению срока службы металла пароперегревателя на 1,56 года или 13665,8 часов. При этом повышение среднегодового значения температуры пара перед турбиной на 1 °С уменьшает срок службы только на 7200 часов. С учетом этих факторов годовой экономический эффект от модернизации всех впрысков котлов

ТГМП-114 ЛГРЭС в денежном выражении можно рассчитать по формуле:

$$\mathcal{E}_1^{\text{год}} = 922357,8 \text{ руб.} \cdot \frac{7200}{13665,8} = 485956 \text{ руб.}$$

Несмотря на уменьшение суммарного экономического эффекта с учетом дополнительных инвестиций на модернизацию регуляторов впрысков, срок окупаемости последних не будет превышать три года. Это доказывает экономическую целесообразность модернизации штатных САР температуры перегретого пара паровых котлов с внедрением инвариантных регуляторов впрысков.

Список литературы

1. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: Спр. пособие / Г. Т. Кулаков. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 192 с.
2. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов / И. Ф. Кузьмицкий. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.
3. Теория автоматического управления: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами», 1-43 01 04 «Тепловые электрические станции», 1-43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций», 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств» / Г. Т. Кулаков [и др.]; под общ. ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: БНТУ, 2017. – 133 с.
4. Кулаков, Г. Т. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: «Вышэйшая школа», - 2017. – 238 с.
5. Кулаков, Г. Т. Структурно-параметрическая оптимизация динамических систем теплоэнергетических процессов ТЭС и АЭС // Доклады БГУИР. 2015. № 2 (88).
6. Кулаков, Г. Т. Исследование влияния качества регулирования температуры перегретого пара на срок службы металла пароперегревателя котлов / Г. Т. Кулаков, М. Л. Горельшева // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика: научно-технический производственный журнал. – 2009. - № 4. – С. 62-69.
7. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. – М.: Энергоиздат, 1991. – 416 с.
8. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции. Учебник для вузов по специальности «Тепловые электрические станции». Изд. 2-е. перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1976. – 448 с.

УДК 681.513

**ПОДХОДЫ К ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА БАЗЕ СРЕДСТВ
АВТОМАТИЗАЦИИ ТПТС**ИВАНОВА А.А.^{1,2}, МЕЙЛАХС А.Л.², ТОЛОКОНСКИЙ А.О.¹¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Российская Федерация)*²*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова» (Москва, РФ)*

Аннотация. Доклад посвящен организации автоматического регулирования на базе аппаратуры ТПТС, описана проблема использования реализованных в аппаратуре ТПТС законов регулирования и показана идея для ее решения.

Ключные слова: АСУТП, ТПТС, средства автоматического регулирования, закон регулирования, оптимальное управление.

SOLVING PROBLEMS OF AUTOMATIC CONTROL IN THE TPTS TECHNOLOGYANNA.A. IVANOVA^{1,2}, ARTEM.L. MEILAHNS², ANDREY.O. TOLOKONSKIY¹¹*NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY "MEPHI" (Moscow, Russian Federation)*²*Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA)
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. This article shows the approaches to automatic control based on TPTS equipment. The problem of applying the control laws implemented in the TPTS is described and an idea for solving this problem is proposed.

Keywords: Automated control systems, TPTS, equipment, module, controller, optimal control.

Введение

Комплекс средств автоматизации (КСА) ТПТС предназначен для построения программно-технических комплексов (ПТК) систем контроля и управления АЭС, ТЭС и тепловых объектов промышленности. ТПТС включает в себя набор аппаратных и программных средств, служащих для реализации функций контроля и управления АСУ ТП. Платформа ТПТС имеет модульную структуру и позволяет создавать разнообразные структуры ПТК.

Средства КСА ТПТС используются для решения следующих задач: измерение сигналов от датчиков с унифицированными выходными сигналами тока и напряжения; прием и обработка сигналов термодар и термопреобразователей; выдача унифицированных сигналов тока и напряжения; прием, обработка и выдача двоичных сигналов; индивидуальное управление ИМ; запуск и выполнение алгоритмов защитных действий. [1,2]

На АЭС аппаратура ТПТС применяется в следующих подсистемах АСУТП: контроля и управления оборудованием нормальной эксплуатации; нормальной эксплуатации, важной для безопасности; электронной части собственных защит турбин и генератора; контроля и управления вспомогательным оборудованием турбогенератора; контроля и управления водоочисткой и водоподготовкой; иницирующей части предупредительной защиты и т.д.

В настоящее время оборудование ТПТС успешно функционирует на Белорусской, Ленинградской, Курской и других АЭС.

Для разработки ПТК на основе оборудования ТПТС используются инструментальные средства автоматизированного проектирования САПР GET-R и GET-R1. Основной задачей САПР является формирование алгоритмов работы модулей ТПТС. Помимо этого, САПР выполняет следующие задачи: создание и изменение функциональных схем, проверка правильности алгоритмов, управление проектными данными, моделирование. Для работы с оборудованием поколения ТПТС-ЕМ и ТПТС51 используется САПР GET-R. По мере модернизации оборудования ТПТС, появились новые поколения аппаратуры – ТПТС-НТ и ТПТС-СБ. Для проектирования алгоритмов управления ПТК на базе аппаратуры нового поколения был создан САПР GET-R1 – новое поколение инструментальных средств автоматизированного проектирования. САПР GET-R1 также позволяет разрабатывать ПТК на базе ТПТС51 – ТПТС-ЕМ.

Организация регулирования на базе аппаратуры ТПТС

Средства автоматического регулирования в КСА ТПТС-НТ и ТПТС-СБ представлены модулями связи с процессом (МСП) ТПТС55.1681, ТПТС55.1625 и ТПТС57.1772 функциональными и программными блоками в универсальном модуле процессора автоматизации ТПТС55.1211 и в процессорном модуле автоматизации ТПТС55.1105.

МСП выполняют функции управления исполнительными механизмами (ИМ) на основании логической обработки входных команд. В данных модулях содержится встроенная логика управления по П-, И-, ПИ и ПИД-законам регулирования.

Модуль ТПТС55.1681 предназначен для применения в системе автоматизации на базе КСА ТПТС-НТ. Модуль позволяет реализовать трехпозиционное управление (ИМ) интегрирующего типа или ИМ, обеспечивающими «непрерывное» изменение некоторого параметра, по П-, И-, ПИ и ПИД-законам регулирования. [3]

МСП ТПТС55.1625 используется для непрерывного аналогового управления и алгоритмически схож с модулем ТПТС55.1681.

В ТПТС-СБ индивидуальный контроль и управление ИМ регулирующей автоматикой обеспечивается модулем ТПТС57.1772. Модуль предназначен для выполнения функции приоритетного управления ИМ типа регулирующей клапан по логике импульсного регулирования. [4]

Программные и функциональные блоки используются для организации пользовательских алгоритмов. Пользовательские алгоритмы, построенные с помощью данных блоков, исполняются непосредственно в процессоре автоматизации (ПА), поэтому для взаимодействия с ИМ не требуется специализированных модулей регулирования. Связь с ИМ может быть выполнена посредством модулей ввода/вывода дискретных или аналоговых сигналов. С помощью комбинации программных и функциональных блоков можно управлять объектами, требующими «непрерывного» или трехпозиционного управления. Алгоритмы данных блоков аналогичны алгоритмам модулей-регуляторов.

Решение проблемы оптимального согласованного управления оборудованием энергоблока АЭС

Реализованные в аппаратуре ТПТС П-, И-, ПИ- и ПИД- законы регулирования, являются достаточными с точки зрения традиционных практических методов синтеза и настройки регуляторов, позволяют добиваться заданного качества регулирования (быстродействия, перерегулирования, колебательности, астатизма требуемого порядка и т.д.). Вполне оправдано использование таких регуляторов в системах стабилизации типа «вход-выход», когда управление нацелено на поддержание малых отклонений некоторого параметра технологического процесса при наличии возмущений и медленном изменении задания во времени.

Перспективным направлением развития системы автоматизированного управления энергоблоком АЭС является применение регуляторов, которые позволили бы согласованно управлять основными агрегатами или в целом оборудованием энергоблока. Такая система регулирования позволила бы не только стабилизировать параметры в статических режимах энергоблока, но и формировать заданное движение в пространстве основных параметров для пусковых и переходных режимов, например, при изменении уровня мощности, притом оптимальное по некоторому критерию, например, по затрачиваемой на управление маневром энергии, и в условиях наличия ограничений в виде неравенств относительно координат указанного пространства параметров, отвечающих границам безопасной эксплуатации оборудования.

Проблему предлагается решать не путем применения типовых П-, И-, ПИ- и ПИД-алгоритмов регулирования, а методами аналитического конструирования линейных регуляторов состояния, например, методом А.М. Летова [5]. Решение смежной проблемы неполноты, или недостаточной надежности, или «зашумленности» получаемой путем измерений информации о состоянии системы – методами конструирования наблюдателей полного или неполного порядка, например, фильтров Калмана для восстановления состояния, при значительном проявлении технологического шума в показаниях датчиков, или наблюдателей Люенбергера, при малом его проявлении. Поскольку результат синтеза

наблюдателя и регулятора в общем случае чувствителен к параметрам примененной модели, может потребоваться уточнение значений этих параметров в процессе функционирования автоматизированной системы, для чего в состав регулятора предлагается включить параметрический идентификатор, построенный, например, на основе регрессионной модели объекта управления, разрешаемой методом наименьших квадратов.

В свою очередь для реализации указанных регуляторов нового типа в аппаратуре ТПТС необходимо сформулировать требования к аппаратному и программному обеспечению микропроцессорных модулей, ориентированных на решение этой задачи, создать и опробовать алгоритмическое обеспечение этих модулей, учитывающее необходимость горячего резерва, ввода-вывода полевых сигналов, метрологического обеспечения измерений, распределения задач, в том числе связанных с автоматическим регулированием, между создаваемым модулем и ПА или выполняющим аналогичные функции компьютером промышленного исполнения. На первом этапе предполагается, что такие модули будут предназначены для построения оптимального регулятора порядка, не превосходящего седьмой. По предварительным оценкам этого должно оказаться достаточно для реализации оптимального регулирования основных технологических параметров второго контура энергоблока АЭС с ВВЭР в статических и переходных режимах.

Перспективной целью этого направления научных исследований и разработки является такое развитие платформы ТПТС, которое позволит максимально привлечь все имеющиеся не только во ВНИИА, но и в целом в отрасли наработки для создания в конечном итоге надежного, цифрового общеплодного автоматического регулятора.

Список литературы

1. Нариц А. Д., Моисеев М.И., Карпов П.С., Новиков А. Н., Борзенко А.А., Рыжков А.В. Комплекс средств автоматизации ТПТС-НТ. Доклады БГУИР 2015; 2:33-37.
2. Нариц А. Д., Моисеев М.И., Карпов П.С., Новиков А. Н., Борзенко А.А., Рыжков А.В. Комплекс средств автоматизации ТПТС-СБ. Доклады БГУИР 2015; 2:38-42.
3. Модуль регулятор ТПТС55.1681 : техническое описание – М. : ВНИИА, 2017. – 137 с.
4. Модуль приоритетного управления регулирующим клапаном (МПУР) ТПТС57.1772: техническое описание – М. : ВНИИА, 2018. – 122 с.
5. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов. Автоматика и телемеханика, 1960, №4, стр. 436-441.

УДК 681.5

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТОПЛИВНОЙ КАМПАНИИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС ВВЭР-1200

ПУТИЛИН В.Н.

*Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники,
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Определены и обоснованы основные принципы реализации на АЭС безопасных и экономически эффективных топливных циклов энергоблока технологии ВВЭР. Исследованы факторы увеличения выгорания топлива, повышения эксплуатационной надежности и эксплуатационного ресурса ТВС. Рассмотрены условия для повышения тепловой мощности энергоблоков, увеличение длительности топливных кампаний, уменьшение нейтронной нагрузки на корпус реактора.

Ключевые слова: Топливная кампания, глубина выгорания ядерного топлива, активная зона реактора, перезагрузка ядерного топлива, поле энерговыделения.

WAYS TO IMPROVE THE FUEL CAMPAIGN NPP POWER UNIT VVER-1200

PUTILIN V.N.

*Belarusian State University of Informatics
and radio electronics,
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The basic principles of the implementation of safe and cost-effective fuel cycles of the VVER technology power unit at nuclear power plants are defined and justified. The factors of increasing fuel burn-up, increasing the operational reliability and operational life of fuel assemblies are investigated. The conditions for increasing the thermal power of power units, increasing the duration of fuel campaigns, and reducing the neutron load on the reactor vessel are considered.

Keywords: Fuel campaign, depth of nuclear fuel burnout, reactor core, nuclear fuel reset, energy release field.

Введение

В настоящее время имеется несколько направлений исследования задачи улучшения топливной кампании. Экономичность работы АЭС в значительной степени определяется эффективностью использования ядерного топлива. В тоже время единственным задаваемым параметром при расчетах топливной загрузки ядерного реактора служит длительность кампании, которая определяется планируемой нагрузкой энергоблока на предстоящий период.

Методика проведения исследований

В рабочей кампании главной задачей расчета топливной загрузки является получение схемы перестановки ТВС при перегрузке и расчет нейтронно-физических характеристик реактора для выбранной схемы расположения и порядка замены ТВС с учетом всех факторов, влияющих на глубину выгорания ядерного топлива. При этом представляет интерес решение задачи сохранения длительности кампании при снижении числа загружаемых тепловыделяющих сборок (ТВС) со свежим топливом, что позволит снизить совокупные эксплуатационные и топливные затраты

Результаты и обсуждение

В процессе эксплуатации ядерного реактора непрерывно изменяется нуклидный состав ядерного топлива, причем как во время работы ЯР, так и после его остановки. При этом происходит интенсивная реакция деления ^{235}U и других делящихся нуклидов, а также поглощение нейтронов ядрами ^{238}U и других изотопов урана. Параллельно с выгоранием ядерного топлива в активной зоне идут процессы воспроизводства вторичного ядерного топлива, шлакования и отравления ядерного реактора. Наиболее распространенной характеристикой глубины выгорания ядерного топлива служит количество выделенной за кампанию тепловой энергии, отнесенной к единице массы ядерного топлива, загруженного в

ядерный реактор - МВт-сут/т. Для получения 1 МВт - сут требуется выгорание 1,1 г ^{235}U . Если в первом приближении принять эту величину за единицу, то глубина выгорания ядерного топлива в мегаватт-сутках на тонну будет численно равна отношению массы продуктов деления в килограммах к полной топливной загрузке в тоннах. Для энергоблоков с ВВЭР глубина выгорания ядерного топлива достигает 3-5% (30 000-40 000 МВт - сут/т).

Глубина выгорания ядерного топлива зависит от большого числа факторов:

1. Необходимость иметь даже в конце кампании критическую массу топлива и определенный избыток над нею, создающий запас реактивности, необходимый для компенсации шлакования, отравления и, в случае необходимости, температурного эффекта реактивности;

2. Наличие ограничений по выбору избытка массы ядерного топлива над критической в момент перегрузки, поскольку имеющиеся в ядерном реакторе органы СУЗ не в состоянии компенсировать чрезмерно большой запас реактивности;

3. Стойкость оболочек ТВЭЛов, которая связана как с накоплением продуктов деления, так и с общей продолжительностью работы ТВЭЛов в ядерный реактор и режимами его работы. Накопление газообразных продуктов деления, особенно при большой глубине выгорания, приводит к большому увеличению внутреннего давления на оболочку ТВЭЛа. Этот эффект усиливается возможным распуханием топлива при накоплении в нем продуктов деления. В сочетании с термоциклическими нагрузками, а также радиационными и коррозионными повреждениями это может стать причиной разгерметизации ТВЭЛов.

Глубина выгорания ядерного топлива зависит также и от процесса его перегрузки, которая может быть полной или частичной. Нейтронное поле и энерговыделение неравномерны по радиусу и высоте активной зоны, и ТВЭЛы, расположенные в разных точках активной зоны, работают с неодинаковыми тепловыми потоками и температурами как сердечника, так и оболочки. Вследствие этого неравномерно происходит и выгорание ядерного топлива. Более интенсивно оно происходит в центре активной зоны, менее интенсивно - на ее периферии. Если проводить полную перегрузку, то наряду с ТВЭЛами, в которых достигнуто глубокое выгорание ядерного топлива, будут выгружены и ТВЭЛы с относительно небольшой степенью выгорания. Поэтому на практике полная перегрузка применяется редко, и используется режим частичных перегрузок ядерного топлива.

При частичной перегрузке из ядерного реактора выгружается и заменяется свежим лишь наиболее выгоревшая часть топлива. Остальное топливо, как правило, перемещается в другую часть активной зоны. Для выравнивания поля энерговыделения в активной зоне обычно ядерное топливо перемещается от периферии к центру активной зоны. Свежее топливо при частичной перегрузке размещают в периферийной части активной зоны. ТВС со слабовыгоревшим ядерным топливом последовательно перемещают к центральной зоне. Чем большее число перегрузок за одну топливную кампанию, тем с меньшими избытками топлива и с меньшими запасами реактивности, предназначенными для компенсации избытка топлива, может работать ядерный реактор.

Достижение заданной глубины выгорания топлива при допустимых удельных тепловых нагрузках целиком определяется продолжительностью пребывания твэлов в активной зоне. Профилирование топливной загрузки осуществляется персоналом ОЯБ АЭС расчетным путем на базе пакета прикладных программ (ППП), применительно к вычислительной технике, используемой на АЭС. Расчет топливной загрузки энергоблока предопределяет экономические показатели эксплуатации АЭС и уровень ядерной безопасности при последующей эксплуатации энергоблока.

Примером реализации такого подхода является ВВЭР-1200, в котором при повышенной на 20% мощностью предусмотрена возможность работы 18 месяцев без перегрузки топлива и проводятся работы по подготовке к дальнейшему удлинению цикла до 24-х месяцев. Увеличение мощности было достигнуто благодаря, в том числе, большей энергонапряженности ТВЭЛов, работающих с большим обогащением (среднее - 4,85, максимальное - 4,95% $\text{U}235$), увеличенным по возможности содержанием урана в ТВС (его количество в ТВС практически такого же размера поднято с 506 до 546 кг), новой технологией изготовления таблетки.

Заключение

Таким образом, можно определить основные направления совершенствования топливной кампании энергоблока: повышение эксплуатационной надежности и эксплуатационного ресурса ТВС; реализация на АЭС безопасных и экономически эффективных топливных циклов, включая увеличение выгорания топлива, создание условий для повышения тепловой мощности энергоблоков, увеличение длительности топливных кампаний, уменьшение нейтронной нагрузки на корпус реактора.

Список литературы

1. Марков Ю.В., Сидоренко В.А. Введение в разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации ядерных установок типа ВВЭР- М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013. -176с. Росэнергоатом.

УДК 004.052.42

**МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕЗНАЧИМЫХ СИГНАЛОВ ТРЕВОГИ**

БОГОМОЛОВ С.Л., АНОХИН А.Н.

*АО «Русатом Автоматизированные системы управления»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. В настоящее время является актуальной задача интеллектуальной обработки сработавшей сигнализации, которая позволяет привести объем сигнализации, требующей внимания оператора к человеческим возможностям без потери осведомленности о ситуации. Одним из наиболее часто применяемых методов обработки является подавление избыточных сигналов тревоги, которые либо не несут дополнительной информации в данной ситуации, либо не требуют никакой реакции от оператора. Для разработки алгоритмов подавления сигнализации требуется анализ статистики функционирования АЭС с целью выявления сигналов тревоги, которые могут быть классифицированы как избыточные и незначимые в определенной ситуации. В работе представлен метод анализа и результаты его применения на примере технологической системы АЭС.

Ключевые слова: избыточные сигналы тревоги, незначимые сигналы тревоги

**METHOD OF PRELIMINARY ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL ALARMS TO DETECT
POTENTIALLY INSIGNIFICANT ALARMS**

SERGEY.L. BOGOMOLOV, ALEXEY.N. ANOKHIN

*Rusatom automated control systems, Joint-stock company
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. Currently the task of intelligent processing of triggered alarms is actual. That task allows bringing the volume of alarms requiring the operator's attention to human capabilities without losing awareness of the situation. One of the most commonly used processing methods is the suppression of redundant alarms, i.e. alarms either do not provide additional information in a given situation, or do not require any response from operator. To develop alarm suppression algorithms, it is necessary to analyze the statistics of NPP operation in order to identify alarms that can be classified as redundant and insignificant in certain operation. This paper presents the analysis method and the results of its application on the example of a NPP technological system.

Keywords: redundant alarms, minor alarms.

Введение

Оператор энергоблока АЭС регулярно получает уведомления о возникших на станции событиях и на их основании выполняет корректирующие действия. Цикл возникновения и работы оператора с сигналом тревоги подробно описан в [1]. В случае, если число получаемых оператором сигналов тревоги в единицу времени становится значительным, повышается риск совершения ошибки [2]. Критические величины потока сигналов тревоги, выше которых возникает информационная перегрузка оператора, указаны в [3].

Избежать этой ситуации можно за счет уменьшения проектировщиком АЭС общего числа сигналов тревоги в БД, однако современная тенденция носит обратный характер [4]. В связи с этим приобретает актуальность задача интеллектуальной обработки сработавшей сигнализации, позволяющая минимизировать или, по крайней мере, привести объем сигнализации, требующей внимания операторов, к человеческим возможностям без потери общей осведомленности о ситуации. Одним из наиболее часто применяемых методов обработки является подавление избыточных сигналов тревоги, которые либо не несут дополнительной информации в данной ситуации, либо не требуют никакой реакции оператора [5, 6]. Однако разработка многочисленных алгоритмов подавления сигнализации – сложная и трудоемкая процедура. Снизить этот объем и сфокусировать внимание проектировщиков на первостепенных задачах позволяет предварительный анализ статистики функционирования АЭС, целью которого является выявление сигналов тревоги, которые могут быть квалифицированы как избыточные и незначимые в определенной ситуации. В настоящей статье рассмотрены метод и результаты такого анализа на примере системы продувки-подпитки (СПП), подробно описанной в [7]. Причинами выбора данной системы стали ее сложность,

разветвленность, взаимодействие с многими внешними системами, многофункциональность, присутствие разнородного оборудования и наличие различных физико-химических процессов. Все это делает данную систему репрезентативной и обеспечивает возможность масштабирования предлагаемого метода на всю АЭС.

Метод анализа

В качестве основных событий, формирующих сигналы тревоги, выступают:

- нарушение аналоговыми технологическими параметрами (такими как давление, температура, расход и др.) нижних и/или верхних регламентных, предупредительных и аварийных уставок;
- нарушения или нерегламентная работа оборудования.

Выявление сигналов-кандидатов для последующей разработки алгоритмов подавления предлагается выполнять на основе анализа переключений оборудования (изменений его состояния – включено/выключено, открыто/закрыто) в анализируемой и смежной с ней системах. Если такие переключения совершались в то время, когда сигнал тревоги оставался активированным, то можно предположить, что сигнал устранился вследствие вмешательства оператора (или автоматики). Если переключений не было, это означает, что событие и, как следствие, сигнал тревоги устранились сами собой, что можно рассматривать в качестве побудительного мотива для дальнейшего более тщательного анализа уставок срабатывания сигнала и необходимости его генерации в данных условиях.

Для реализации предложенного метода была разработана программа на языке программирования Python. Эта программа анализирует имеющиеся архивные данные, зарегистрированные SCADA-системой в ходе эксплуатации АЭС, осуществляет их статистическую обработку и идентифицирует потенциально незначимые сигналы тревоги.

Результаты и их обсуждение

Были проанализированы реальные архивные данные функционирования СПП и смежных систем АЭС (система заполнения теплоносителем трубопроводов и оборудования реакторной установки, система поддержания требуемого объема теплоносителя, система подачи теплоносителя на очистку и др.). Состав рассматриваемых смежных систем был выбран таким образом, чтобы осуществляемые в них управляющие воздействия могли оказывать непосредственное влияние на технологические параметры СПП. Интервал времени анализируемых архивных данных составил 65 суток. Выбранный временной интервал включает в себя как периоды стационарной работы энергоблока, так и переходные режимы.

Проектом АСУ ТП предусмотрено формирование сигнализации по 580 событиям, которые потенциально могут произойти в СПП. Из них за анализируемый интервал времени реализовались 357 событий. При этом в отдельные дни число реализаций (т.е. общее число сгенерированных сигналов тревоги) более чем в 9 раз превысило рекомендуемое значение, указанное в [3], из чего можно сделать вывод, что оператор, ответственный за данную систему – ведущий инженер управления реактором, работает в режиме информационной перегрузки.

Было выявлено, что основной поток сигналов тревоги сопровождает переходные режимы, что вполне логично и объясняется тем, что СПП принимает в них непосредственное участие. При этом основными вкладчиками в общий объем сигнализации стали 10 событий, которые вызвали 79 % общего числа сигналов тревоги. Статистика по четырем из этих событий, а также результаты выявления частоты событий, не потребовавших вмешательства оператора, показана в таблице, где:

P_i – вклад i -го события в общий объем сигнализации по СПП за 65 суток ($\sum_i P_i = 100\%$);

$P_i^{\text{исчез.}}$ – доля сигналов тревоги, сгенерированных по i -му событию, которые исчезли без прямого вмешательства оператора и действия автоматики в СПП и смежных системах.

Таблица. Перечень событий, внесших наибольший вклад в возникновение сигнализации

Сигнализируемое событие	P_i , %	$P_i^{\text{исчез.}}$, %
Запас до кавитации насоса большой производительности $1 < 7$ м	24	90
Ток электродвигателя насоса большой производительности $1 > 69$ А	18	67
Неисправность регулирования регулирующего клапана вывода теплоносителя 1	12	62
Давление масла в насосе малой производительности $2 < 35$ кПа	8	94

В ходе анализа архивных данных было установлено, что сигналы тревоги, снявшиеся без участия человека или автоматики, составляют 63 % от общего объема сигнализации, зарегистрированной за анализируемый период. Причинами их возникновения могут быть:

- неверно подобранные уставки, обуславливающие явление, получившее название «дребезг» сигнала;
- зависимость от режима работы оборудования;
- недостоверность средств и каналов измерения и др.

Учитывая, что значительная часть из самостоятельно исчезающих сигналов тревоги активировались на очень незначительное время, можно сделать вывод о флуктуации значения вокруг уставки и, как следствие, т.е. о «дребезге» параметра. Однако более достоверный вывод, а также выбор адекватного метода подавления каждого сигнала тревоги возможны лишь при дальнейшем анализе.

Заключение

В работе предложен метод выявления потенциально избыточных сигналов тревоги, основанный на перекрестном анализе возникающих событий и наличия ответных управляющих действий. На примере системы продувки-подпитки АЭС было выявлено следующее:

- проблема информационной перегрузки оператора потенциально незначимыми сигналами тревоги является крайне актуальной и это может привести к ошибкам и снижению бдительности;
- почти две трети событий, реализовавшихся за 65 суток, исчезли без участия человека или автоматики.

Применение описанного алгоритма позволит в режиме реального времени по мере эксплуатации технологического объекта автоматически выявлять сигналы тревоги, требующие более тщательного анализа, корректировки уставок и алгоритмов формирования сигнала, а также применения алгоритмов подавления избыточной сигнализации.

Список литературы

1. Stanton N. Human factors in alarm design. CRC Press, 1994.
2. Swain A.D., Guttman H.E. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant application (NUREG/CR-1278). – Springfield, VA: National Technical Information Service, 1983.
3. IEC 62682-2014 Management of alarm systems for the process industries.
4. Богомолов С.Л. Увеличение числа расчетных точек в БД новых СВУ АЭС // 18-я ежегодная Конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (Подольск, 30–31 марта 2016 г.).
5. Богомолов С.Л. Метод снижения объема сигнализации, выдаваемой оператору СВУ АЭС // XII отраслевой семинар «Современные программно-технические средства и технологии в АСУТП» (Обнинск, 25–27 окт. 2017 г.).
6. Богомолов С.Л., Анохин А.Н. Исследование эффективности методов и алгоритмов предотвращения избыточной и лавинообразной сигнализации на примере технологической системы АЭС // XII мультikonференция по проблемам управления: материалы (Геленджик, 23–28 сен. 2019г.). – Т. 1. – С. 155–157.
7. Андрущенко С.А. Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010.

УДК 004.052.42

**МЕТОД РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ
«ДРЕБЕЗЖАЩИХ» СИГНАЛОВ ТРЕВОГИ НА АЭС**

БОГОМОЛОВ С.Л., АНОХИН А.Н.

*АО «Русатом Автоматизированные системы управления»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. Оператор АЭС часто сталкивается с сигналами тревоги, которые не требуют от него действий, но отвлекают его внимание. Для снижения количества таких сигналов предлагается проводить их подавление в автоматическом режиме с помощью метода петли гистерезиса. В работе предлагается набор коэффициентов гистерезиса и алгоритм нахождения их оптимальных значений. По результатам проведенных экспериментов выполнена оценка объема снижения числа отображаемых оператору сигналов тревоги.

Ключевые слова: сигналы тревоги, гистерезис, информационная перегрузка, оптимизация, метод усреднения координат

**METHOD FOR CALCULATING THE VALUE OF HYSTERESIS FOR SUPPRESSING
«FLEETING» ALARM SIGNALS AT NPP**

SERGEY.L. BOGOMOLOV, ALEXEY.N. ANOKHIN

*Rusatom automated control systems, Joint-stock company
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The nuclear power plant operator is often confronted with alarms that do not require him to act, but distract his attention. To reduce the number of such signals, it is proposed to carry out their suppressing in automatic mode using the hysteresis loop method. The paper proposes a set of hysteresis coefficients and an algorithm for finding their optimal values. Based on the results of the experiments, the volume of the reduction in the number of alarms displayed to the operator was estimated.

Keywords: alarms, hysteresis, information overload, optimization, coordinate averaging method

Введение

Оператор энергоблока АЭС в ходе своей работы получает уведомления о возникших событиях (сигналах тревоги) и выполняет на их основе корректирующие действия. Часть поступающих сигналов тревоги не требует выполнения действий, а только отвлекает его внимание. Такие сигналы называются незначимыми. Для снижения их количества необходимо применение известных методов подавления.

Исследования проводились на примере технологической системы продувки-подпитки (СПП), подробно описанной в [1]. В результате предварительного анализа сработавших за 65 дней сигналов тревоги было выявлено, что более 80 % из них потенциально являются незначимыми, т.к. активировались на очень незначительное время и снялись без участия оператора или автоматики. Основной объем таких сигналов тревоги составляют частые флуктуации аналоговых технологических параметров вокруг уставки – данное явление получило название «дребезга сигнала».

В качестве методов подавления «дребезжащих» сигналов тревоги применяются [2]:

- использование петли гистерезиса;
- использование временной задержки.

Целью настоящей статьи является разработка принципов определения параметров гистерезиса, которые позволяют, с одной стороны, максимально отфильтровать «шум» и, с другой стороны, не пропустить важные отклонения, реально требующие вмешательства оператора.

Алгоритм расчета величины гистерезиса

Суть метода петли гистерезиса заключается в том, что для сброса сигнала тревоги технологический параметр, возвращаясь к нормальному значению, должен не только пересечь уставку, но продвинуться за уставку на величину гистерезиса.

Величина гистерезиса ($H_{\text{верх}}$ и $H_{\text{ниж}}$) рассчитывается независимо для верхних и нижних уставок ($B_{\text{верх}}^{(i)}$ или $B_{\text{ниж}}^{(i)}$). На рис. 1 проиллюстрирован метода гистерезиса для верхних уставок.

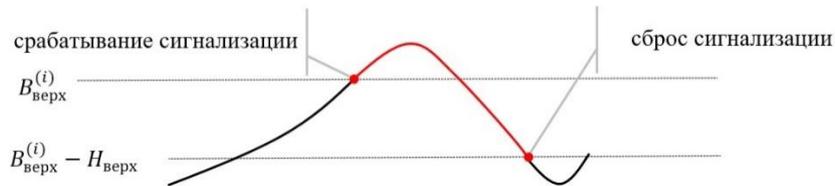


Рис. 1. Пример использования метода гистерезиса для верхних уставок

Величины гистерезисов ($H_{\text{верх}}$ и $H_{\text{ниж}}$) предлагается устанавливать для каждого технологического параметра на основании ряда его характеристик:

- диапазона изменения его значений ($L_{\text{верх}} - L_{\text{ниж}}$);
- физической природы (температура, уровень и др.);
- уставок, задаваемых технологами и производителями оборудования ($B_{\text{верх}}^{(i)}$, $B_{\text{ниж}}^{(i)}$);
- погрешности измерения $A_{\text{изм}}$.

Схематично перечисленные характеристики представлены на рис. 2.

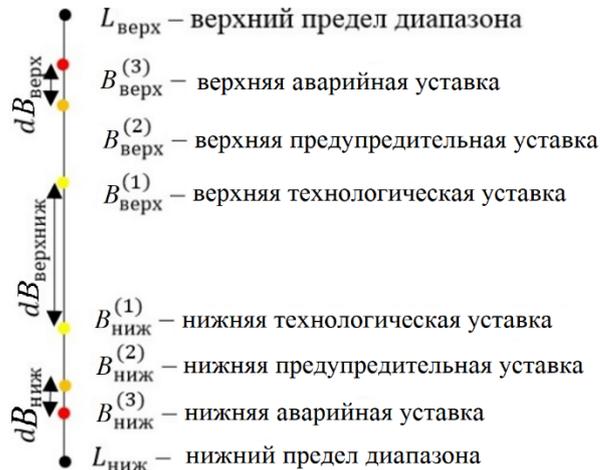


Рис. 2. Характеристики технологического параметра, участвующие в расчете гистерезиса

Значения $H_{\text{верх}}$ и $H_{\text{ниж}}$ предлагается определять по следующим формулам:

$$H_{\text{верх}} = \min(H_{\text{спр}} \cdot D_{\text{знач}} \cdot 10 \cdot K_1; dB_{\text{верх}} \cdot K_2; dB_{\text{верхниж}} \cdot K_3; A_{\text{изм}} \cdot 100 \cdot K_4), \quad (1)$$

$$H_{\text{ниж}} = \min(H_{\text{спр}} \cdot D_{\text{знач}} \cdot 10 \cdot K_1; dB_{\text{ниж}} \cdot K_2; dB_{\text{верхниж}} \cdot K_3; A_{\text{изм}} \cdot 100 \cdot K_4), \quad (2)$$

где:

$D_{\text{знач}}$ – диапазон изменения значений технологического параметра – разница между верхней $L_{\text{верх}}$ и нижней $L_{\text{ниж}}$ границами;

$H_{\text{спр}}$ – рекомендуемое в [3] значение величины гистерезиса для данного типа параметра, например: расход – 5%, уровень – 5%, давление – 2%, температура – 1%;

K_1, K_2, K_3, K_4 – неизвестные коэффициенты, принимающие значения в диапазоне [0; 1];

$dB_{\text{верх}}$ и $dB_{\text{ниж}}$ – минимальная разница между верхними и нижними уставками;

$dB_{\text{верхниж}}$ – расстояние от минимального значения среди верхних уставок $B_{\text{верх}}^{(i)}$ и верхней границы диапазона $L_{\text{верх}}$ до максимального значения среди всех нижних уставок $B_{\text{ниж}}^{(i)}$ и нижней границы диапазона $L_{\text{ниж}}$;

$A_{\text{изм}}$ – погрешность измерения технологического параметра.

Указанные формулы (1) и (2) были разработаны из следующих соображений:

- при выходе значения параметра за, например, нижнюю уставку $B_{\text{ниж}}^{(1)}$, сигнал тревоги по верхней уставке $B_{\text{верх}}^{(1)}$, гарантированно будет устранен;

– при нахождении значения параметра в диапазоне, соответствующем менее критичным уставкам, например, $[B_{\text{верх}}^{(1)}; B_{\text{верх}}^{(2)}]$ сигнал тревоги по выходу за более критичную уставку $B_{\text{верх}}^{(3)}$ также гарантировано будет устранен.

Значения коэффициентов K_1, K_2, K_3 и K_4 должны быть выбраны таким образом, чтобы число подавленных незначимых сигналов тревоги было максимально, а число подавленных значимых сигналов – минимально, т.е. возникает задача оптимизации.

Метод поиска оптимальных значений коэффициентов

Для оценки эффективности подавления сигналов тревоги при применении гистерезиса воспользуемся описанным ранее методом, который позволяет выявлять сигналы, устранившиеся во время изменений состояния оборудования (условно назовем их «значимыми» сигналами) и устранившихся самостоятельно («незначимые» сигналы).

Применив значения гистерезиса к имеющимся архивным данным, рассчитаем, какое число «значимых» и «незначимых» сигналов тревоги было бы подавлено гистерезисом. Примем, что подавление «значимого» сигнала тревоги носит в два раза больший негативный эффект, чем положительный эффект от подавления «незначимого» сигнала тревоги. Исходя из этого можно предложить следующий вид целевой функции:

$$F_{\text{цел}}(K_1, K_2, K_3, K_4) = \frac{0,667 \cdot N_{\text{подзнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4) + 0,333 \cdot (N_{\text{незнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4) - N_{\text{поднезнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4))}{0,333 \cdot N_{\text{незнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4)}, \quad (3)$$

где:

$N_{\text{подзнач}}$ и $N_{\text{поднезнач}}$ – число подавленных «значимых» и «незначимых» сигналов тревоги;
 $N_{\text{знач}}$ и $N_{\text{незнач}}$ – общее число «значимых» и «незначимых» сигналов тревоги;
 0,667 и 0,333 – весовые коэффициенты.

Для расчета $F_{\text{цел}}$ была использована программа на языке Python. На начальном этапе исследований была предпринята попытка применения градиентного метода [4] с приближенным вычислением производных, но поскольку $F_{\text{цел}}$ является вычисляемой функцией, то она вполне может являться многоэкстремальной недифференцируемой функцией. Следовательно, применение градиентного метода оптимизации привело бы к нахождению локальных экстремумов, а не глобального. Поэтому, для поиска экстремума $F_{\text{цел}}$ предлагается применять известные в мировой практике методы глобальной оптимизации для недифференцируемых многоэкстремальных функций, основанные на селективном усреднении функции и на селективном усреднении координат. Методы второго типа являются более современными и перспективными ([5]), поэтому для решения поставленной задачи был применен метод селективного усреднения координат, который был реализован в виде программного кода на языке Python.

Результаты и их обсуждение

В методе селективного усреднения координат используется равномерное распределение точек в гиперкубе размером 1. В качестве такого распределения точек был выбран «римский гиперкуб» [6].

Проведенные исследования показали, что при использовании гиперкуба размерности 4, гарантированное нахождение размещения точек в кубе, близкого к оптимальному (разница менее 0,1 %), обеспечивается при числе итераций построения гиперкуба не менее 20000.

Кроме того, было выявлено, что для того, чтобы метод находил экстремальное значение $F_{\text{цел}}$ с высокой точностью (разброс значений не более 1,1%) независимо от начальных условий, его параметры ([3]) должны иметь следующие значения:

- значение коэффициента q – не менее 2;
- ядро – экспоненциальное « $p_s(g) = e^{-10g}$ »;
- число тестовых точек должно – не менее 300;
- число итераций – не менее 5.

Достаточно любопытным оказался тот факт, что оптимум был найден для фиксированного значения K_2 , другие же коэффициенты принимали значения из некоторого диапазона $\Delta K_{(i)}$:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= [0,276...1,000], \Delta K_1 = 0,72 \\
 K_2 &= [0,145...0,145], \Delta K_2 = 0 \\
 K_3 &= [0,063...0,306], \Delta K_3 = 0,24 \\
 K_4 &= [0,235...1,000], \Delta K_4 = 0,77
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Использование таких значений коэффициентов позволяют уменьшить число отображаемых оператору незначимых сигналов тревоги на 8 %

Заключение

В работе описан метод выявления потенциально избыточных сигналов тревоги, основанный на перекрестном анализе возникающих событий и наличия ответных управляющих действий. На примере системы продувки-подпитки АЭС было выявлено следующее:

- значительная часть сигналов тревоги, которые были сняты без вмешательства оператора были вызваны флуктуациями значения параметра около уставок («дребезг»);
- был выбран метод подавления сигналов тревоги, вызванных «дребезгом» значений параметра – использование петли гистерезиса;
- разработаны формулы для расчета величины гистерезиса, использующие неизвестные коэффициенты K_1 – K_4 ;
- для грубой оценки эффективности применения рассчитанной величины гистерезиса предложено использование числа подавленных сигналов тревоги, устранившихся самостоятельно («незначимых» сигналов) и во время изменений состояний оборудования («значимых» сигналов);
- была предложена целевая функция $F_{\text{цел}}$, для которой подавление «значимого» сигнала тревоги носит в 2 раза больший негативный эффект, чем положительный эффект от подавления «незначимого» сигнала;
- выполнен анализ и выбор применяемых к такого рода функциям методов оптимизации, и выбран подходящий метод селективного усреднения координат;
- были определены значения его параметров, позволяющие находить минимум $F_{\text{цел}}$ независимо от начальных условий;
- получены оптимальные значения коэффициентов K_1 – K_4 (4).

Есть основания утверждать, что дальнейшая работа в этом направлении позволит определить возможность более существенного повышения полученного процента подавленных сигналов тревоги, вызванных «дребезгом» значений технологических параметров и другими причинами.

Список литературы

1. Андрушенко С.А. Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010.
2. Десятников И.И., Ермолаев А.Д., Ракитин И.Д. Повышение качества информационного обеспечения оператора АЭС в аномальных ситуациях // Атомная техника за рубежом. – 1986. – № 7. – С. 15–17.
3. Engineering equipment materials users' association, alarm systems. A guide to design, management and procurement. EEMUA Publication No 191, 2nd edition. – London: EEMUA, 2007.
4. Салмин И.Д. Математические методы решения оптимизационных задач. – М.: МИФИ, 2004. – 156 с.
5. Рубан А.И. Метод глобальной оптимизации, основанный на селективном усреднении координат при наличии ограничений // Вестник ТГУ. – 2013. – Вып. 1 (22). – С. 114–123.
6. Гальперин Г.А. Многомерный куб. – М.: МЦНМО, 2015. – 80 с.

УДК 621.039-78

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Травенко Н.Г., Краснобородько А.А.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. В настоящее время физическая защита представляет собой сложную человеко-машинную систему. Глядя на современные угрозы, возникает потребность в поиске перспективных технических решения по использованию роботизированных устройств на ядерных объектах. В статье рассмотрены возможности роботизированных устройств и комплексов.

Ключевые слова: система физической защиты, роботизированные устройства, эффективность защиты, улучшение обнаружительных и тактико-технических характеристик.

ROBOTIC DEVICES IN THE PHYSICAL PROTECTION SYSTEM

N. G. Travenko, A. A. Krasnoborodko

*National Research Nuclear University MEPhI,
(Moscow, Russian Federation)*

Annotation. Currently, physical protection is a complex human-machine system. Looking at the current threats, there is a need to find promising technical solutions for the use of robotic devices at nuclear facilities. The article considers the possibilities of robotic devices and complexes.

Keywords: physical protection system, robotic devices, protection efficiency, improvement of detection and tactical and technical characteristics.

Введение

Снижение рисков, повышение эффективности защиты и адекватное парирование угроз является постоянным направлением работы сотрудников систем безопасности. Помимо прочего, важным элементом этой деятельности является освоение и внедрение самых передовых технологий в известные системы физической защиты (СФЗ). Последнее десятилетие подарило злоумышленникам большое количество технически сложных, но финансово доступных средств для решения своих задач. Это, прежде всего, беспилотные устройства, которые могут самостоятельно или с минимальным управлением летать, плавать, ездить, объединяться в группы и использовать друг друга. Вдобавок, существенно повышается качество решаемых ими задач по сбору чувствительной информации, оперативному наблюдению и воздействию на наиболее уязвимые элементы защищенного объекта. Важно понимать, что при реализации сценариев с использованием беспилотных устройств, центры управления и планирования злоумышленными действиями могут находиться на значительном расстоянии от объекта.

Физическая защита любого объекта представляет собой сложную человеко-машинную систему, применяющую совокупность ресурсов, средств и методов для предотвращения, обнаружения и последующей ликвидации угрозы объекту защиты. При этом должна поддерживаться адекватность степени защиты существующим проектным угрозам. Изменение характера угроз, а также степени их опасности требует постоянного поиска новых решений и методов эффективной защиты объектов от этих угроз.

Любая СФЗ использует известные средства безопасности, например, средства пожарно-охранной сигнализации, оптико-электронного наблюдения, контроля и управления доступом, всевозможные инженерные сооружения и многое другое. Все эти системы помогали и помогают эффективно решать вопросы безопасности в различных задачах, в том числе и в обеспечении физической ядерной безопасности. Появление новых технологий, их распространение, повышение доступности, должно использоваться для выполнения задач СФЗ с меньшими затратами. Автоматизация рабочих мест и операций, позволяет обеспечить более высокую рентабельность. К таким передовым технологиям можно отнести роботизированные устройства (РТУ). Согласно приведенному анализу International Data Corporation (IDC) к 2023 году рынок роботизированных систем более чем удвоится. В 2020 году мировой объем продаж роботизированных систем поднимется на 17.1%. [1]

Структура, задачи и функции систем физической защиты ядерного объекта

Построение современных СФЗ основывается на широком применении инженерно-технических и программных средств, для того чтобы обеспечить контроль доступа людей и их перемещения в защищенные и особо важные зоны объекта, и исключения несанкционированного доступа к предметам физической защиты [2].

Инженерно-технические средства включают в себя технические средства (устройства, предназначенные для повышения надежности обнаружения нарушителей и обеспечения санкционированного доступа на объект) и физические барьеры - специально разработанные строительные конструкции объекта, иными словами, физические препятствия. Для повышения живучести и надежности используется принцип структурной, функциональной и временной избыточности.

Характерной особенностью ядерного объекта является зонирование территории с разграничением уровней доступа персонала в разные зоны. Как правило, на территории могут быть выделены несколько зон: [3]

- техническая территория (тот участок, где расположены различные сооружения, обеспечивающие эксплуатацию объекта);
- защищенная зона (локальная зона внутри технической территории, на которой расположены сооружения ограниченного доступа);
- внутренняя зона (сооружения объекта, вход в которые посторонним строго ограничен);
- особо важная зона (здания или помещения с особым режимом обеспечения безопасности).

Соответственно, необходимый уровень безопасности объекта может быть достигнут за счет использования многочисленного штата персонала охраны или установки нескольких рубежей с системами обнаружения.

К основным функциям СФЗ относят [4]:

- обнаружение вторжения (срабатывание технических средств, оценка ситуации);
- задержку (замедление продвижения нарушителей к цели);
- действие сил охраны (развертывание, пресечение действий нарушителей).

Возможности роботизированных устройств и комплексов

Анализируя современное состояние и развитие роботизированных средств, можно отметить, что на сегодняшний день в мире активно ведутся работы по созданию РТУ для обеспечения безопасности объектов и функционирования в смежных областях (действия в условиях чрезвычайных ситуаций). Уже определился ряд задач, где использование РТУ носит рутинный характер:

1. Выполнение работ в опасных зонах (разведка, транспортирование опасных грузов)
2. Выполнение работ при чрезвычайных ситуациях (осмотр территории, передача информации оператору, анализ и прогноз дальнейшей ситуации)
3. Проведение антитеррористических действий (поиск, идентификация, ликвидация).

Опыт применения делает привлекательными их использование для охраны, особенно для предприятий атомной и химической промышленности. Представляется актуальной проблема анализа возможностей РТУ в этой области и поиск решений, направленных на улучшение обнаружительных и тактико-технических характеристик СФЗ, повышения информативности, оперативности и достоверности контроля над объектом, автоматизации и интеллектуализации процессов охраны и реагирования, обеспечения устойчивости к внешним воздействующим факторам.

Применение РТУ должно решать такие задачи, как:

1. Повышение быстродействия и улучшение характеристик имеющихся СФЗ;
2. Повышение эффективности СФЗ и вероятности нейтрализации нарушителя на внешних рубежах до его проникновения во внутренние зоны (с учетом времени преодоления физических барьеров);
3. Обеспечение защиты жизни и здоровья личного состава охраны за счет оказания воздействия на нарушителей до прибытия сил реагирования;

4. Дополнение существующих на периметре технических средств обнаружение и полная интеграция в них;

5. Минимизация уязвимостей и увеличение запаса времени силам реагирования.

В настоящее время существует несколько типов автоматизированных охранных систем:

1. Фиксированные – закрепленные роботизированные консоли, позволяющие выявлять подвижные объекты с удаленным видеонаблюдением сканирования лиц, а также передачи информации оператору в случае несанкционированного вторжения на объект охраны.

2. Мобильные – подвижные роботы, оснащенные инфракрасными датчиками и камерами слежения. Помещаются данные устройства на двухколесные гусеничные платформы, которые применяются внутри помещений или 4-х и 6-ти колесные платформы, обеспечивающие высокую проходимость для работы на открытой местности.

Первые, как правило, являются составной частью подсистемы оптико-электронного наблюдения с расширенным функционалом. Второй тип РТУ пока является новым и активно разрабатываемым для использования на критически важных и ядерных объектах.

Использование мобильных РТУ позволит повысить эффективность СФЗ, например, обеспечит максимальную обзорность больших площадей, в том числе и труднопросматриваемых человеком участков. Применение РТУ позволит избежать рисков, которые могут возникнуть во время патрулирования территории площадки. Человеческий фактор играет немаловажную роль, ведь сотрудники службы безопасности могут оказаться в опасной ситуации, либо подвергнуться угрозе жизни других людей, в то время как РТУ жестко ограничены в своих действиях. Даже в случае оснащения устройств летальным оружием имеется возможность многоступенчатого контроля его применения.

Современные системы СФЗ на ядерных объектах имеют высокую степень компьютеризации и РТУ, могут быть интегрированы в уже используемые алгоритмы и сценарии реагирования.

Большинство РТУ, представленные на современном этапе, как на отечественном, так и на зарубежном рынке оснащены набором схожих функций:

- комплект оптических и инфракрасных камер;
- датчик LIDAR (лазерный радар), предназначенный для определения глубины пространства и расчета точного расстояния до объектов;
- датчики оценки обстановки (контроль пожарной и биологической безопасности);
- средства связи и навигации (GPS/ГЛОНАСС, WiFi, 4G(VoLTE) модули).

Примером может служить автономный робот компании *SMP Robotics* «Трал Патруль» (Рис. 1). [5]. Данные РТУ созданы для патрулирования охраняемых территорий с целью видеонаблюдения за ними, причем видеонаблюдение осуществляется как в движении, так и при остановках в позициях, оптимальных для контроля критически важных участков обозреваемой территории. Серия представлена несколькими моделями, которые предназначены для решения различных задач. РТУ могут быть оснащены различными системами видеонаблюдения, в том числе и интеллектуальной, которая способна распознавать и сопровождать людей посредством панорамных камер.

Использование принципов зонирования и многорубежности [4] делает перспективным еще один тип мобильных РТУ - рельсовых комплексов охраны, которые представляют собой каретку с камерой, осуществляющей мониторинг ситуации на объектах. При этом, проходя десятки тысяч километров за долгое время эксплуатации по уровню своей надежности должна превосходить существующие колёсные аналоги.



Рис. 1. Внешний вид автономного робота компании *SMP Robotics* «Трал Патруль»

Рельсовая трасса может быть проложена рядом с ограждениями рубежа зоны. Скорость такого комплекса может обеспечивать минимальное время прибытия в необходимую зону, определяемую датчиками систем обнаружения. При штатном «патрулировании» рубежа защиты рельсовое РТУ может обеспечивать уточнение оперативной обстановки, транспортировку грузов и воздействие на проникновение нарушителя с целью задержки или устранения опасности проникновения на объект. Возможность движения с высокой скоростью в сочетании с круговым видеонаблюдением позволит контролировать протяженные рубежи, практически полностью решая «вечный» вопрос видеонаблюдения – наличие слепых/мертвых зон.

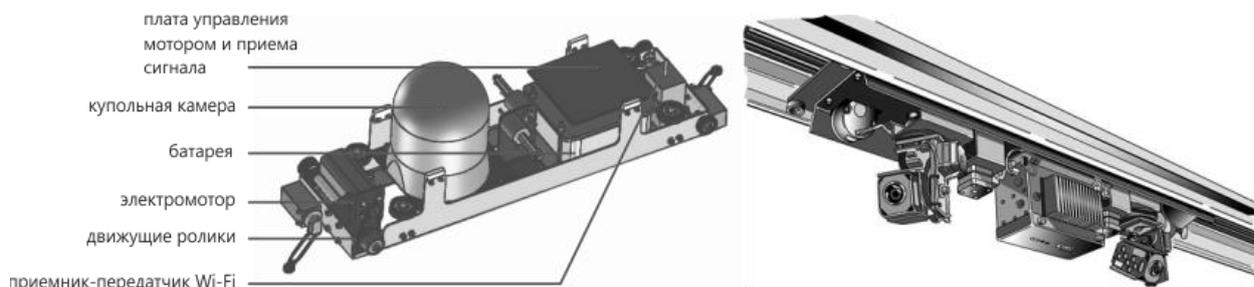


Рис. 2. Внешний вид рельсового охранного устройства



Рис. 3. Схема общего вида адаптируемой под конкретный объект трассы рельсового охранного устройства

Заключение

Конечно, на современном этапе, функциональность РТУ ограничена и мало отличается от стандартных устройств СФЗ, при этом превосходя их в стоимости. Однако, применение специализированных мобильных РТУ, как надежного и экономичного дополнения или даже альтернативы персоналу охраны может повысить эффективность СФЗ. Действующий по программе РТУ способен выполнять монотонную и опасную работу круглосуточно, снижая влияние человеческого фактора.

Список литературы

1. URL: <https://www.secuteck.ru/news/idc-k-2023-godu-rinok-robotisirovannih-sistem-bolee-chem-udvoitsia>
2. Ушаков, В. С. Обеспечение безопасности объектов. Физическая защита / В. Ушаков — «Издательские решения»
3. Постановление Правительства РФ от 19.07.2007 N 456 (ред. от 05.07.2018) "Об утверждении Правил физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов"
4. Бондарев П.В., Измайлов А.В., Погожин Н.С., Толстой А.И. Физическая защита ядерных объектов Физическая защита ядерных объектов. Учебник для высших учебных заведений/ Под ред. Н.С.Погожина. М.: МИФИ, 2004. - 483 с.
5. URL: <https://securityrobot.ru/produkcija/>

УДК 681.5

ВЫБОР МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АЭС В РАМКАХ НЕЗАВИСИМОЙ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ

АКОЛОВИЧ А.В., КРЮК Ю.Е.

Государственное научное техническое учреждение «Центр по ядерной и радиационной безопасности»,

(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В работе рассмотрен выбор метода для анализа надёжности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Анализ надёжности предполагает использование различных методов, обусловленных определёнными критериями. В рамках выбранного метода выявляются наиболее уязвимые части и элементы энергоблока АЭС, ошибки персонала, которые требуют пристального внимания в рамках решения задачи повышения безопасности.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности, анализ надёжности, деревья отказов, АСУ ТП.

SELECTION OF A METHOD FOR ANALYSIS OF RELIABILITY OF AUTOMATED PROCESS COMPUTER SYSTEMS NPP IN THE FRAMEWORK OF AN INDEPENDENT SAFETY ASSESSMENT

AKOLOVICH A.V., KRUK Y.E.

State Scientific Technical Institution "Center for Nuclear and Radiation Safety,

(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers the choice of a method for analyzing the reliability of automated process computer systems (APCS). Reliability analysis involves the use of various methods, conditioned by the established criteria. Whiting the chosen method, the most vulnerable parts and elements of the NPP, personal errors which require close attention to solving the problem of improving safety.

Keyword: probabilistic safety analysis, reliability analysis, fault tree, APCS.

Введение

Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) являются важной и в то же время сложной составной частью промышленного производства.

АСУ ТП – это комплекс систем, предназначенный для управления различными производственными процессами, включающий в себя работу человека и автоматизированный сбор и обработку информации. В отличие от автоматических систем, автоматизированная система управления предполагает активное участие человека. Применение АСУ ТП позволяет значительно увеличить производительность технологических процессов и их эффективность. Степень эффективности автоматизированных систем зависит от параметров и показателей АСУ ТП. Одним из существенных факторов, оказывающих влияние на эффективность управления АСУ ТП, является надёжность. Безопасность и безотказность систем характеризуется показателями надёжности. Следовательно, возникает потребность в проведении анализа надёжности АСУ ТП. Надёжность прямо влияет на такие свойства, как эффективность, живучесть и безопасность, так как отказы компонентов АСУ ТП приводят к ухудшению или потере способности обеспечивать поддержание данных свойств на должном уровне.

Целью работы является выбор метода для анализа надёжности АСУ ТП и обоснование его применения, как наилучшего метода для данного анализа.

Выбор метода анализа надёжности для АСУ ТП

Обеспечение необходимого уровня надёжности требует проведения специального комплекса работ, выполняемых на разных стадиях создания и эксплуатации АСУ ТП. В качестве показателей надёжности АСУ ТП используют показатели, характеризующие надёжность реализации функций системы и опасность возникновения аварийных ситуаций в самой системе [1].

При решении вопросов, связанных с обеспечением требуемого уровня надёжности АСУ, учитываются следующие особенности:

- каждая АСУ является многофункциональной системой, функции которой различны и, соответственно, характерны разным уровнем требований к надёжности;
- в функционировании АСУ участвует персонал, который может в той или иной степени влиять на уровень надёжности системы управления;
- в состав АСУ входит большое количество разнородных элементов. Один и тот же элемент может участвовать в выполнении нескольких функций системы или наоборот, в выполнении – одной функции АСУ участвует несколько различных элементов.

Основные используемые методы анализа надёжности, которые могут дать ответ на вопрос: будет ли система в состоянии выполнить возложенные на нее функции, следующие:

1. Анализ дерева отказов;
2. Марковский анализ;
3. Анализ видов и последствий отказов;
4. Метод логических блок-диаграмм

Выбор метода может быть упрощён при использовании следующих критериев [2]:

- сложность системы. Системы, включающие в себя резервирование, разнообразие и другие особенности, требуют более глубоко уровня анализа, чем простые.
- новизна системы. Вновь разрабатываемая система требует более детального и тщательного анализа, чем система, разработанная ранее и уже эксплуатирующая.
- необходимость количественного и качественного анализа.
- неисправности системы: единичные или многократные.
- зависимость системы от времени и последовательности иных событий.
- наличие зависимых событий.
- восходящий или нисходящий анализ.
- квалификация исполнителя анализа.
- проверка истинности результатов вручную.
- стандартизация.

Марковский анализ на практике используется очень редко из-за сложности систем дифференциальных уравнений, которые имеют место быть при анализе реальных систем.

Метод логических блок-диаграмм и анализ видов последствий и отказов применим лишь к простым системам, что не применимо к АСУ ТП.

Метод анализа дерева отказов (ДО) применяют для анализа видов, последствий и критичности отказов технической диагностики отказавшего элемента системы. Некоторые эксперты рассматривают данный метод как компромисс между простотой метода логических блок-диаграмм и полнотой Марковского анализа для вычисления уровня надёжности системы [3].

Применение анализа дерева отказов при замене элемента системы АСУ ТП позволит учесть известные неблагоприятные воздействия и рассчитать методом вероятностного анализа безопасности надёжность системы, и как следствие сделать вывод о влиянии на безопасность и пригодности использования данного элемента для АСУ ТП.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующий вывод, что оптимально подходящим методом для анализа надёжности систем, применим метод анализа дерева отказов, который является частью логического метода вероятностного анализа безопасности.

В таблице 1 приведён краткий обзор используемых методов анализа надёжности, их характеристики и особенности.

Таблица 1. Характеристики методов анализа надёжности [2]

Метод	Подходит для сложных систем	Подходит для новых проектов	Количественный анализ	Подходит для комбинаций неисправностей	Подходит для обработки с учётом значимости от времени	Учёт зависимых событий	Восходящий или нисходящий	Применимость и унифицированность	Проверка правоподобия результатов	Обозначение стандарта
Анализ дерева отказов (неисправностей)	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нисходящий	Высокая	Да	ГОСТ Р 27.009-2009
Марковский анализ	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Нисходящий	Средняя	Нет	ГОСТ Р 51901.15
Анализ видов и последствий отказов	Только для простых систем	Только для простых систем	Да	Нет	Нет	Нет	Восходящий	Высокая	Да	ГОСТ 27.310
Метод логических блок-диаграмм	Только для простых систем	Только для простых систем	Да	Да	Нет	Нет	Нисходящий	Средняя	Да	ГОСТ Р 51901.14

Метод анализа дерева отказов для оценки анализа надёжности

Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) представляет собой всесторонний, структурированный метод определения сценариев отказов, для получения численных оценок риска, в процессе которого разрабатываются вероятностные модели для определения конечных состояний системы с повреждением источников радиоактивного излучения [4]. Вероятностный анализ безопасности (ВАБ) содержит ответ на вопрос о частотах проявления переходных процессов, приводящих к конечным состояниям, характеризующийся нарушением пределов и условий безопасной эксплуатации.[5]. Основной целью ВАБ является оценка влияния инициирующих событий, возможных на энергоблоке АЭС, на безопасность этого энергоблока. Указанная цель может быть разделена на несколько отдельных целей ВАБ, достижение которых преследуется в зависимости от поставленных задач, например, оценка обеспечения достаточного уровня надёжности систем. Для данной цели и определения множества конечных состояний с повреждением оборудования, элементов и систем применяется логический метод дерева отказов (ДО).

Дерево отказов визуально представляет собой графическую схему, по которой определяются основные или вершинные события, заключающихся в отказе системы выполнить заданную функцию, вследствие комбинации элементарных или первичных событий, которые являются отказами отдельных элементов системы [5]. Анализ дерева отказов может использоваться для прогнозирования надёжности при проведении альтернативных исследований и на стадии проектирования систем. Данный метод предназначен для реализации заранее определённого нежелательного события, и позволяющий находить все возможные пути его достижения. Проводя соответствующий анализ системы, можно показать, что достигнуты заданные количественные или качественные показатели надёжности.

Этапы проведения анализа ДО для АСУ ТП:

- описание каждой части системы, входящий в состав АСУ ТП. Описание должно включать в себя технологические и структурные схемы с определением границ системы;
- выполнение декомпозицию системы, т.е. разделение ее на отдельные каналы или части, для которых будет разработано самостоятельное ДО;
- определение верхних событий в соответствующих ДО;
- определение для каждого элемента с учётом условий его функционирования присущие ему виды отказов. Каждый вид отказа должен быть определён показателем надёжности;
- выполнение анализа зависимостей от других систем и элементов;
- выполнение анализа ошибочных действий персонала;
- построение ДО по полученным результатам. Для оценки надёжности и работоспособности системы в методе анализа дерево отказов применяется Булева алгебра (математическая система позволяющая манипулировать с событиями). Основными исходными данными являются интенсивности отказов, вероятности появления неисправностей для элементов. Дерево отказов должно включать следующие компоненты: вершинное событие, логические операторы, разрабатываемые события, первичные события, ссылки на другие деревья отказов;
- определение множество минимальных сечений, представляющих собой логическое произведение первичных событий, являющиеся отказами системы, рассчитать параметры надёжности элементов.

Вывод

Автоматизированные системы управления являются сложными техническими системами, в процессе которых могут возникать отказы, имеющие негативные последствия для производственного цикла, персонала и инфраструктуры. Вероятность отказа определяется показателями надёжности системы в целом, а также ее элементов.

Для повышения надёжности АСУ применяют различные аналитические методы. Одним из таких методов является метод дерева отказов. Он учитывает сложные взаимодействия частей системы, моделируя их зависимые отказы, события, а также позволяет сформировать общее представление о системе.

При проектировании системы контроля и управления должен применяться подход, включающий набор технических средств, методов контроля и качества, которые должны учитывать принципы: разнообразия, единичного отказа, защиты от отказов по общей причине, резервирования, независимости, а также учёт человеческого фактора, качество, надёжность элементов, квалификацию оборудования.

Список литературы

1. ГОСТ 24.701-86 Надёжность автоматизированных систем управления. Основные положения, 2009 г. – 12 с.
2. ГОСТ Р 51901.5 Руководство по применению методов анализа надёжности, 2005 г. – 48 с.
3. Солонин В.И. Безопасность и надёжность реакторных установок. Учебное пособие по курсу «расчёты и проектирование ядерных установок». – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. Т6– 80с.
4. Разработка и применение вероятностной оценки безопасности уровня 1 для атомных электростанций, Специальное руководство по безопасности МАГАТЭ, № SSG-3, 2014 г. – 243 с.
5. Швыряев Ю.В., Острейковский В.А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 352 с.

УДК 621.039, 621.38

НОВЫЕ ТИПЫ ДОЗИМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОГО И ИМПУЛЬСНОГО ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ

БОГДАН М.А., КАРАЙКОЗА Т.М.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье представлены принцип работы и характеристики дозиметра ДКГ-АТ2533 и устройства детектирования УДКГ-37, разработанных и выпускаемых предприятием «АТОМТЕХ». Данные изделия предназначены для работы в полях как непрерывного, так и импульсного фотонного излучения в жестких условиях эксплуатации.

Ключевые слова: мощность амбиентного эквивалента дозы, фотовольтаический канал, радиационный ресурс, регистрация импульсного излучения.

NEW TYPES OF CONTINUOUS AND PULSED PHOTON RADIATION DOSIMETERS FOR NUCLEAR TECHNOLOGY

MIKHAIL A. BOHDAN, TATSIANA M. KARAIKOZA

*Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX»,
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The article presents the principle of operation and characteristics of the dosimeter AT2533 and detection device UDKG-37, developed and manufactured by ATOMTEX. These products are designed to work in the fields of both continuous and pulsed photon radiation in harsh operating conditions.

Keywords: ambient dose equivalent power, photovoltaic channel, radiation resource, pulse radiation registration.

Введение

В сфере атомной энергетики, ядерной техники, медицины и радиационных технологий существует потребность в дозиметрической аппаратуре, предназначенной для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы как непрерывного, так и импульсного фотонного излучения. Как правило, к подобным средствам контроля предъявляются и жесткие требования, такие как широкий диапазон измерений (вплоть до сотен и тысяч Зв/ч), большой радиационный ресурс, широкий диапазон рабочих температур и относительной влажности, механическая прочность, возможность работы в жидких средах. Создание новых приборов, удовлетворяющих всем этим требованиям и превосходящих известные аналоги [1–3] являлось целью данной разработки.

Принцип работы и технические характеристики

Предприятием «АТОМТЕХ» разработан дозиметр ДКГ-АТ2533, предназначенный для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы и амбиентного эквивалента дозы непрерывного рентгеновского и гамма-излучения, а также дозы и средней мощности дозы импульсного излучения в широком диапазоне (рис.1).



Рис. 1. Внешний вид дозиметра ДКГ-АТ2533

В состав дозиметра входят внешний блок детектирования гамма-излучения БДКГ-33 и блок обработки информации БОИ-33, соединённые между собой радиационнотойким кабелем. При этом БОИ-33 содержит внутренний детектор гамма-излучения, что позволяет осуществлять контроль радиационной обстановки в месте расположения оператора. Органы управления дозиметра позволяют работать в защитных перчатках.

Конструктивно блок детектирования БДКГ-33 выполнен в герметичном малогабаритном корпусе из нержавеющей стали (степень защиты IP68). Это позволяет применять его в жестких механических и климатических условиях, в том числе и в труднодоступных местах. Блок детектирования БДКГ-33 устойчив к воздействию статического гидравлического давления до 400 кПа, т.е. работоспособен в водных средах на глубине до 40 м.

Широкий диапазон измерения мощности дозы от 1 мкЗв/ч до 1000 Зв/ч (9 порядков) обеспечивается за счет того, что в блоке детектирования БДКГ-33 реализовано два измерительных канала: счетный и фотovoltaический. Счетный канал выполнен на энергоскомпенсированном счетчике Гейгера-Мюллера с применением радиационнотойких компонентов производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь) и работает при низких нагрузках от 1 мкЗв/ч до 100 мЗв/ч. Фотovoltaический канал реализован на энергоскомпенсированном кремниевом полупроводниковом детекторе, работающем в токовом режиме при высоких нагрузках от 100 мЗв/ч до 1000 Зв/ч. Благодаря программным алгоритмам, переход между двумя измерительными каналами осуществляется как автоматически, так и вручную. Энергетический диапазон регистрируемого гамма-излучения для обоих каналов от 50 кэВ до 10 МэВ.

Радиационный ресурс блока детектирования БДКГ-33 и кабеля составляет не менее 25 000 Зв. Он обеспечивается за счет того, что вся радиационнотойкая электроника располагается в блоке обработки информации БОИ-33 на удалении от блока детектирования БДКГ-33, при этом используется радиационнотойкий кабель, длина которого варьируется от 20 до 50 м. Кроме того, во время работы фотovoltaического канала блока детектирования БДКГ-33, вся электроника счетного канала, где применены радиационнотойкие компоненты, отключена от источника питания.

При подключении БДКГ-33 к БОИ-33 посредством радиационнотойкого кабеля, прибор автоматически переходит к измерению мощности дозы в месте расположения блока детектирования и сравнению измеренного значения с заранее заданным пороговым уровнем, при превышении которого срабатывает звуковая и световая сигнализация. В приборе ведется журнал измерений, при этом в энергонезависимую память записывается до 1000 значений максимальной мощности дозы на заранее выбранном временном интервале (от 1 до 255 мин). Кроме того, записывается дата и время включения/выключения дозиметра, подключения/отключения блока детектирования, срабатывания сигнализации и другая служебная информация, которой дозиметр может обмениваться с персональным компьютером по интерфейсу *USB 2.0* с помощью прикладного программного обеспечения.

Дозиметр также имеет исполнение ДКГ-АТ2533/1, где в БОИ-33/1 предусмотрено наличие беспроводного модуля *Bluetooth 5.0*. Благодаря этому, используя прикладное программное обеспечение, оператору предоставляется возможность управления прибором на большем безопасном расстоянии.

В настоящее время дозиметр ДКГ-АТ2533 прошел государственные приемочные испытания в Республике Беларусь на соответствие требованиям ГОСТ 27451 [4] и требованиям Международных стандартов *IEC 60846-1,-2* [5, 6], а также внесен в Федеральный реестр средств измерений Российской Федерации.

Также на предприятии серийно выпускается стационарный аналог дозиметра ДКГ-АТ2533 – широкодиапазонное устройство детектирования УДКГ-37 (рис.2), предназначенное для работы как в составе автоматизированных систем контроля радиационной обстановки, так и автономно. Оно состоит из блока детектирования гамма-излучения БДКГ-37, блока сопряжения БС-37 и радиационнотойкого кабеля. Данное устройство, в зависимости от исполнения, позволяет подключаться к любой системе по интерфейсу *RS-485* или *RS-232* с помощью универсального протокола обмена *Modbus RTU*. Отличительной особенностью блока детектирования БДКГ-37 от БДКГ-33 является его расширенный диапазон измерения мощности дозы (1 мкЗв/ч – 5000 Зв/ч) и радиационный ресурс (до 50000 Зв).

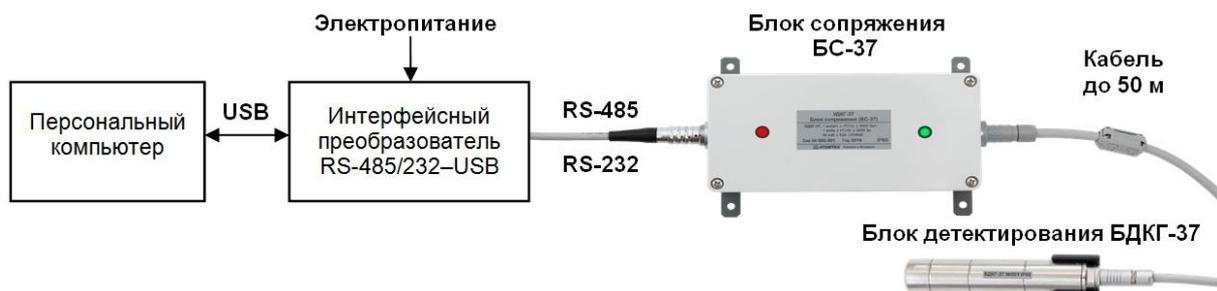


Рис. 2. Устройство детектирования УДКГ-37 при автономной работе

Основные технические характеристики дозиметра ДКГ-АТ2533 и устройства детектирования УДКГ-37 представлены в табл.1.

Таблица 1. Технические характеристики ДКГ-АТ2533 и УДКГ-37

Технические характеристики	ДКГ-АТ2533, ДКГ-АТ2533/1	УДКГ-37, УДКГ-37/1
Детектор	Кремниевый полупроводниковый детектор Счетчик Гейгера-Мюллера	
Энергетический диапазон	50 кэВ – 10 МэВ, с энергетической зависимостью $\pm 30\%$	
Диапазон измерений мощности дозы	1 мкЗв/ч – 1000 Зв/ч (БДКГ-33) 0,1 мкЗв/ч – 10 мЗв/ч (БОИ-33)	1 мкЗв/ч – 5000 Зв/ч
Диапазон измерений дозы	1 мкЗв – 5000 Зв (БДКГ-33) / 1 мкЗв – 2 Зв (БОИ-33)	1 мкЗв – 5000 Зв
Предел основной относительной погрешности	$\pm 25\%$ при мощности дозы ≤ 10 мкЗв/ч $\pm 15\%$ при мощности дозы > 10 мкЗв/ч	
Чувствительность к гамма-излучению источника ^{137}Cs , не менее	2,6 имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹ (БОИ-33) 0,15 имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹ (БДКГ-33, БДКГ-37 $\leq 0,2$ Зв/ч) 58 мВ/Зв·ч ⁻¹ (БДКГ-33, БДКГ-37 $> 0,2$ Зв/ч)	
Радиационный ресурс	> 100 Зв (БОИ-33) / > 25000 Зв (БДКГ-33)	> 50000 Зв
Интерфейс обмена	USB 2.0, Bluetooth 5.0 (для ДКГ-АТ2533/1)	RS-485 (УДКГ-37) / RS-232 (УДКГ-37/1)
Электроснабжение	2×AA = 1,5В	= 9-30В (УДКГ-37) / = 4-12В (УДКГ-37/1)
Время работы	1000 ч (БОИ-33) / 250 ч (БОИ-33 с подключенным БДКГ-33) 50 ч (БОИ-33/1 с включенным модулем <i>Bluetooth</i>)	-
Степень защиты	IP54 (БОИ-33) / IP68 (БДКГ-33)	IP65 (БС-37) / IP68 (БДКГ-37)
Диапазон рабочих температур	-30°C... +60°C	-40°C... +60°C
Относительная влажность воздуха	98% при температуре $\leq 35^\circ\text{C}$	
Габаритные размеры/ масса	85×155×35 мм / 0,3 кг (БОИ-33) Ø25×135 мм / 0,25 кг (БДКГ-33)	170×80×55 мм / 0,3 кг (БС-37) Ø25×135 мм / 0,25 кг (БДКГ-37)

Работоспособность в полях импульсного излучения

На сегодняшний день основными источниками импульсного излучения являются рентгеновские аппараты (ангиографы, дентальные, дефектоскопические, досмотровые и т.д.), ускорители и специальные импульсные генераторы [7]. Анализ характеристик показывает, что источники импульсного излучения, как правило, вырабатывают повторяющиеся импульсы с частотой от 1 до 400 Гц и длительностью от 1,5 нс до 1 с.

Благодаря применению кремниевого полупроводникового детектора, работающего в токовом режиме фотovoltaического канала, в дозиметре ДКГ-АТ2533 и устройстве детектирования УДКГ-37 реализована возможность эффективно функционировать в полях импульсного излучения, т.к. данные детекторы обладают быстрым откликом на воздействие ионизирующего излучения и по принципу действия схожи с работой ионизационных камер. Изделия измеряют дозу и среднюю мощность дозы импульсного повторяющегося излучения, которое генерирует широкий круг установок.

Счетный канал дозиметра ДКГ-АТ2533 и устройства детектирования УДКГ-37 непригоден для регистрации импульсного излучения, так как счетчик Гейгера-Мюллера обладает большим «мертвым временем» и регистрирует только частоту генерируемых импульсов. Поэтому в счетном канале была программно реализована возможность регистрации повторяющихся генерируемых импульсов с автоматическим либо ручным переходом в фотovoltaический канал.

Проверка функционирования изделий в полях импульсного излучения осуществлялась на нескольких установках с различными характеристиками. Так, на медицинских линейных ускорителях *Elekta Versa HD* и *Varian Clinac 2300C/D* генерируется импульсное излучение с энергией 6, 15 и 18 МэВ, длительностью от 1 до 3 мкс и частотой повторения импульсов от 25 до 400 Гц. На рентгеновских аппаратах «Шмель-250» и «Памир-250» генерируется импульсное излучение с энергией 60 кэВ, длительностью от 15 до 50 нс и частотой повторения импульсов 14 и 7 Гц соответственно.

Результаты испытаний дозиметра ДКГ-АТ2533 и устройства детектирования УДКГ-37, проведенных в полях импульсного излучения различного характера [8], позволяют сделать вывод о возможности и целесообразности их применения в подобных условиях. Так, на рис. 3 представлен пример использования устройства детектирования УДКГ-37 в составе системы радиационного контроля импульсного излучения ускорителей. В состав системы входят дозиметр ДКС-АТ1123 для регистрации низких и устройство детектирования УДКГ-37 для регистрации высоких уровней мощности дозы импульсного излучения.



Рис. 3 Устройство детектирования УДКГ-37 в составе системы радиационного контроля импульсного излучения ускорителей

Заключение

Таким образом, новые типы дозиметров непрерывного и импульсного фотонного излучения, выпускаемые предприятием «АТОМТЕХ», по своим характеристикам ничем не отличаются от известных мировых аналогов, а в некоторых параметрах и превосходят их. Данные преимущества, а также соответствие требованиям международных стандартов позволяют изделиям быть конкурентоспособными на мировом рынке. Особенно актуально их использование в следующих областях:

- аварийные и поставарийные ситуации;
- контроль при утилизации и захоронении радиоактивных отходов;
- радиационный мониторинг окружающей среды, территорий и объектов;
- атомная промышленность и АЭС;
- контроль безопасности при радиационной обработке высокоактивными источниками ионизирующего излучения сельскохозяйственного сырья, сырья для лекарственных средств, фармацевтических препаратов;
- контроля полей импульсного излучения в непосредственной близости от линейных ускорителей в медицинских учреждениях;
- научные исследования.

Список литературы

1. STHF-R Gamma High Flux Probe. URL: <https://www.mirion.com/products/sthf-gamma-high-flux-probe>.
2. AMP-300 Meter. URL: <https://www.rotam-radiation.co.il/product/amp-300-meter/>
3. БДРС-09П. URL: <https://sniipplus.ru/products/%d0%b1%d0%b4%d1%80%d1%81-09%d0%bf/>
4. ГОСТ 27451-87, Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия.
5. IEC 60846-1, 2009-04, Radiation protection instrumentation -Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors.
6. IEC 60846-2, 2015-12, Radiation protection instrumentation -Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 2: High range beta and photon dose and dose rate portable instruments for emergency radiation protection purposes.
7. IEC/TS 63050 2019-10, Radiation protection instrumentation - Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation
8. Богдан М.А., Курдя Ю.Ф., Карайкоза Т.М., Лукашевич Р.В., Лазаренко С.В. Широкодиапазонное устройство детектирования для дозиметрии непрерывного и импульсного фотонного излучения в жестких условиях эксплуатации. // АНРИ. 2021. №1(104). С. 21-30.

УДК 539.1.08: 539.16.08

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОМЕТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ NaI(Tl) ДЕТЕКТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ ^{131}I В ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЕ^{1,2}А.А. ЗАГОРОДНЮК¹Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», Минск, Республика Беларусь²Белорусский государственный университет,

(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В работе рассчитывается эффективность регистрации спектрометра излучения человека, предназначенного для определения содержания радионуклида ^{131}I в щитовидной железе. Исследуется зависимость эффективности регистрации прибора от его расположения относительно щитовидной железы для различных половозрастных групп. Расчет эффективности регистрации происходит при помощи Монте-Карло моделирования в программе *Fluka* путем построения компьютерной модели прибора и моделей фантома человека.

Ключевые слова: Монте-Карло моделирование, компьютерная модель человека, спектрометрия излучения человека, *Fluka*.

DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF A WHOLE BODY COUNTER BASED ON NaI(Tl) DETECTOR WHEN MEASURING THE ^{131}I CONTENT IN THE THYROID GLAND^{1,2}A.A. ZAHARADNIUK¹Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX», Belarus, Minsk²Belarusian state university,

(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper assesses the efficiency of a whole body counter designed to determine the content of the ^{131}I radionuclide in the thyroid gland. The dependence of the efficiency of the device is investigated with respect to its location relative to the thyroid gland for different age and gender groups. Efficiency calculation is carried out by using Monte Carlo simulation in the *Fluka* program by creating a computer model of the device and models of a human phantoms.

Keywords: Monte-Carlo modeling, computer model of human body, whole body counter, *Fluka*

Введение

Радионуклид ^{131}I является бета- и гамма-радиоактивным изотопом йода с периодом полураспада примерно равным 8 суткам, выделяющимся в реакторе атомной электростанции при делении ядер урана в ядерном топливе [1]. Из-за специфики работы реакторной установки, выброс ^{131}I в окружающую среду происходит даже при нормальной эксплуатации АЭС [2, 3]. Йод, являясь важным для организма микроэлементом, поглощается человеческим телом из внешней среды и накапливается в щитовидной железе [4]. Из-за невозможности химического разделения изотопов одного элемента, в щитовидной железе происходит накопление всех разновидностей йода, поглощенных из окружающей среды. Поэтому на АЭС и близлежащих территориях необходим постоянный мониторинг этого радионуклида, в том числе посредством измерения его накопления в щитовидной железе для различных половозрастных категорий.

Одним из приборов, позволяющих оценить количество ^{131}I в щитовидной железе *in vitro* является спектрометр излучения человека (СИЧ). Измеряя спектр гамма-излучения ^{131}I , данный прибор позволяет определить активность радионуклида в щитовидной железе.

Количество гамма-квантов, попадающих в детектор (и как следствие эффективность регистрации прибора) зависит как от расположения детектора относительно щитовидной железы, так и от ее размера. В данной работе исследуется зависимость эффективности регистрации гамма-излучения ^{131}I СИЧ СКГ-АТ1322 [5] (производства УП «Атомтех») при различном положении блока детектирования относительно щитовидной железы для различных половозрастных групп.

Методика определения эффективности

Определение эффективности регистрации СИЧ [6] выполнено при помощи компьютерного моделирования методом Monte-Carlo в программе *Fluka* [7]. В данной программе была создана модель блока детектирования СИЧ AT1322 (в основе блока детектирования лежит детектор на основе сцинтиллирующего кристалла NaI(Tl) с размерами 63х63 мм, работающего в спектрометрическом режиме: количество каналов равно 1024, максимальная энергия 3.086 МэВ, цена деления канала 3.013 кэВ, рис. 1) и компьютерная модель фантома человека (рис. 2), расположенные друг относительно друга на заданном расстоянии. Под эффективностью регистрации прибора понимается следующая величина:

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot \eta}, \quad (1)$$

где N – скорость счета импульсов в пике полного поглощения;

A – активность радионуклида в щитовидной железе;

η – квантовый выход фотонов с заданной энергией.



Рис. 1. Компьютерная *Monte-Carlo* модель блока детектирования СИЧ AT1322, состоящая из детектора, помещенного внутрь свинцового коллиматора

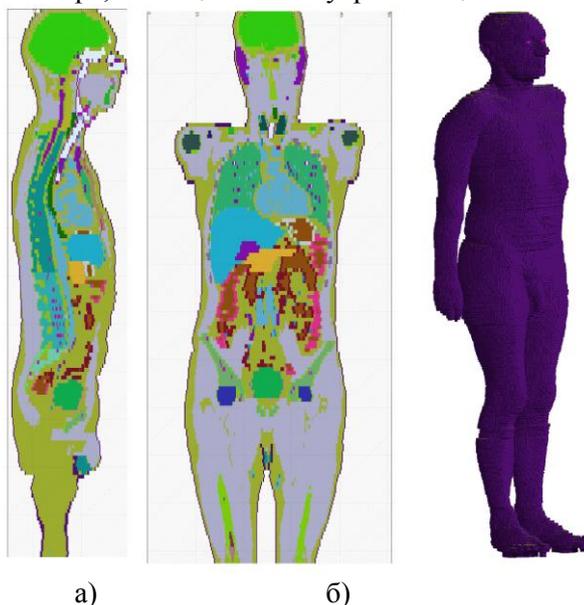


Рис. 2. Компьютерная модель фантома взрослого человека мужского пола (М А): а – сечение плоскостью YZ; б – сечение плоскостью XY; в – трехмерная модель человека

Рассмотрены следующие модели фантома человека: модель фантома человека мужского пола возрастом 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослый человек; модель фантома человека женского пола возрастом 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослый человек [8, 9]. Основные характеристики для каждого фантома приведены в таблице 1. Первая буква названия означает гендерную

принадлежность (M – male, F – female), следующие цифры означают возраст фантома (5y - 5 years, 10y - 10 years, 15y - 15 years, A - adult).

Таблица 1. Основные характеристики фантомов человека

Фантом	M 5y	F 5y	M 10y	F 10y	M 15y	F 15y	M A	F A
Рост, см	109	109	138	138	167	161	176	163
Масса, кг	19	19	32	32	56	53	73	60
Кол-во вокселей, миллион	55.1	55.1	54.5	54.5	53.6	54.0	7.1	14.2
Толщина вокселя, мм	0.85	0.85	0.99	0.99	1.25	1.2	2.137	1.775
Высота вокселя, мм	1.928	1.928	2.425	2.425	2.832	2.828	8.0	4.84
Объем щитовидной железы, см ³	3.2	3.2	7.5	7.5	11.4	11.4	19.2	16.4
Масса щитовидной железы, г	3.4	3.4	7.9	7.9	12.0	12.0	20.0	17.0

Для каждого фантома в области расположения щитовидной железы создан равномерно распределенный изотропный источник фотонного излучения, со спектром аналогичным спектру радионуклида ¹³¹I (рисунок 3, в). Коллиматор прибора, предназначенный для выделения телесного угла, в границах которого расположен источник излучения, центрируется относительно щитовидной железы фантома человека (рисунок 3, а, б) на пяти различных расстояниях: 1 см, 3 см, 5 см, 7 см, 10 см. Для каждого расположения коллиматора относительно фантома человека исследуется эффективность регистрации при нескольких различных положениях детектора относительно переднего края коллиматора: 0 см, 2 см, 4 см, 6 см, 8 см, 10 см. Программа рассчитывает энергетический спектр фотонного излучения, поглощенного в активном объеме детектора. Далее программа определяет количество импульсов в пике полного поглощения и находит его отношение к количеству испущенных источником частиц. Результаты расчета эффективности регистрации при различных положениях детектора относительно поверхности кожи фантома человека для различных половозрастных групп для радионуклида ¹³¹I (квантовый выход фотонов с энергией 364.5 кэВ равен 81.5%) представлены в таблицах 2, 3.

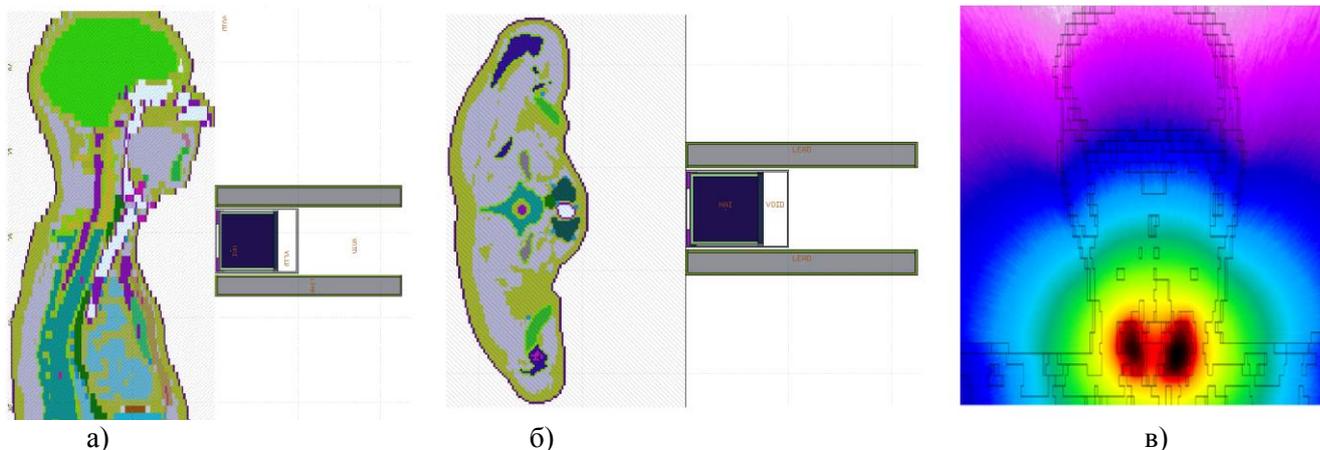


Рис.3. Пример расположения модели блока детектирования относительно щитовидной железы: а – сечение XZ; б – сечение XY; в – источник излучения, распределенный в щитовидной железе

Таблица 2. Эффективность регистрации для фантомов мужского пола, имп/фотон $\cdot 10^2$

DCD, см	SCD, 1 см	SCD, 3 см	SCD, 5 см	SCD, 7 см	SCD, 10 см
Мужской фантом человека в возрасте 5 лет					
0	4.573	2.652	1.698	1.173	1.113
2	2.564	1.702	1.191	0.864	0.817
4	1.625	1.175	0.871	0.663	0.625
6	1.129	0.866	0.665	0.526	0.492
8	0.826	0.663	0.528	0.426	0.400
10	0.631	0.524	0.428	0.355	0.333
Мужской фантом человека в возрасте 10 лет					
0	4.319	2.674	1.717	1.188	1.001
2	2.469	1.709	1.184	0.870	0.747
4	1.588	1.180	0.866	0.661	0.572
6	1.098	0.867	0.666	0.526	0.458
8	0.812	0.665	0.528	0.426	0.375
10	0.621	0.529	0.428	0.353	0.312
Мужской фантом человека в возрасте 15 лет					
0	3.757	2.626	1.623	1.121	0.643
2	2.204	1.675	1.125	0.825	0.507
4	1.434	1.153	0.823	0.632	0.410
6	1.001	0.842	0.632	0.502	0.339
8	0.744	0.647	0.499	0.406	0.282
10	0.580	0.513	0.407	0.340	0.242
Мужской фантом взрослого человека человека					
0	2.909	1.756	1.242	0.897	0.626
2	1.816	1.207	0.899	0.680	0.493
4	1.232	0.875	0.680	0.530	0.399
6	0.891	0.664	0.535	0.428	0.328
8	0.671	0.524	0.434	0.353	0.276
10	0.520	0.423	0.356	0.294	0.234

Таблица 3. Эффективность регистрации для фантомов женского пола, имп/фотон *10²

DCD, см	SCD, 1 см	SCD, 3 см	SCD, 5 см	SCD, 7 см	SCD, 10 см
Женский фантом человека в возрасте 5 лет					
0	4.588	2.666	1.706	1.177	1.119
2	2.564	1.709	1.189	0.861	0.817
4	1.628	1.178	0.870	0.659	0.625
6	1.124	0.864	0.664	0.526	0.494
8	0.818	0.663	0.526	0.428	0.399
10	0.628	0.518	0.427	0.356	0.331
Женский фантом человека в возрасте 10 лет					
0	4.337	2.677	1.710	1.185	1.004
2	2.455	1.708	1.182	0.872	0.745
4	1.582	1.180	0.865	0.665	0.579
6	1.099	0.870	0.666	0.526	0.458
8	0.810	0.665	0.528	0.428	0.377
10	0.622	0.525	0.428	0.356	0.317
Женский фантом человека в возрасте 15 лет					
0	4.217	2.395	1.578	1.119	0.720
2	2.429	1.558	1.103	0.821	0.558
4	1.562	1.096	0.815	0.629	0.444
6	1.087	0.813	0.633	0.502	0.363
8	0.805	0.628	0.503	0.409	0.307
10	0.616	0.498	0.411	0.340	0.261
Женский фантом взрослого человека					
0	3.795	2.166	1.437	1.026	0.659
2	2.209	1.422	1.017	0.762	0.509
4	1.433	1.006	0.755	0.588	0.410
6	1.001	0.745	0.584	0.466	0.337
8	0.741	0.578	0.469	0.384	0.283
10	0.574	0.460	0.380	0.319	0.242

DCD (Detector Collimator Distance) – расстояние от края коллиматора до передней поверхности детектора;

SCD (Skin Collimator Distance) – расстояние от края коллиматора до поверхности кожи фантома человека.

Обсуждение результатов моделирования

Результаты моделирования показывают, что наибольшую эффективность регистрации СИЧ имеет при минимальном расстоянии между передней поверхностью детектора и поверхностью кожи (эффективность регистрации достигает 0.046 имп/фотон при измерении спектра гамма-излучения ^{131}I от щитовидной железы фантома ребенка). Минимальную эффективность регистрации система имеет при измерении гамма-излучения ^{131}I от щитовидной железы фантома взрослого человека при максимальном расстоянии между поверхностью детектора и поверхностью кожи (для радионуклида ^{131}I эффективность регистрации в этом случае 0.0024 имп/фотон). Это объясняется различным средним телесным углом [10], под которым виден источник детектору: чем ближе детектор к источнику, тем больше частиц попадает в него. Однако данный результат верен только при условии локализации радионуклида в области щитовидной железы, а также полного отсутствия фонового излучения. Если радионуклид помимо щитовидной железы распределен и в других органах, либо в непосредственной близости от детектора (например, на одежде), то результат моделирования, ввиду сложности разделения излучения от различных источников, может не отражать реальную эффективность прибора. Более детальная оценка абсолютной эффективности прибора для каждого конкретного случая требует уточнения условий измерения. Результаты моделирования, представленные в настоящей работе, можно считать пороговым случаем идеального измерения при отсутствии фонового излучения и дополнительных источников ионизирующего излучения, распределенных вне щитовидной железы (верхняя граница эффективности регистрации).

Исходя из результатов моделирования можно сделать вывод, что эффективность регистрации СИЧ при измерении ^{131}I слабо зависит от возраста измеряемого человека. Максимальная разница между значениями эффективности регистрации наблюдается при сравнении результатов измерения фантома ребенка в возрасте 5 лет и фантома взрослого человека при условии, что все остальные параметры измерения одинаковые (одинаковое расстояние от поверхности кожи до коллиматора, одинаковое расстояние от торца коллиматора до передней поверхности детектора, одинаковая активность радионуклида). Максимальное отклонение в этом случае не превышает 42% (для случая SCD = 10см, DCD = 0 см, фантом ребенка, фантом взрослого), причем в большинстве случаев чем меньше абсолютный размер щитовидной железы (чем меньше возраст измеряемого человека) тем выше эффективность. Это можно объяснить тем, что при одинаковой активности источника и примерно одинаковом его расположении, более компактное размещение (распределенный источник становится больше похож на точечный) увеличивает средний телесный угол, под которым он виден детектору [10, 11].

Список литературы:

1. Кочнов, Ю. Оценка увеличения производства ^{131}I при использовании теллурических мишеней усовершенствованной конструкции на реакторе ВВР-ц / О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, Р.В. Фомин, Г.М. Жердев // Физика и техника ядерных реакторов. - 2014. - №4. - с. 102-110.
2. Полянцев, С. Актуальные вопросы контроля газоаerosольных выбросов на АЭС / С.С. Полянцев, И.В. Пырков, Е.И. Григорьев // АНРИ. - 2009. - № 2. - с. 37-46.
3. Верещако, Г.Г. Радиобиология: термины и понятия: энцикл. Справ. / Г.Г. Верещако, А.М. Ходосовская. - Нац. Акад. Наук Беларуси. : Минск: Беларуская навука, 2016. – 340 с.
4. Preedy, V. Comprehensive Handbook of Iodine / V. Preedy, G. Burrow, R. Watson. - New York; Oxford: Oxford Univ. Press, 2009. – 1334 p.
5. Спектрометры излучения человека СКГ-АТ1322, СКГ-АТ1322/1. URL: <https://atomtex.com/ru/spektrometry-izlucheniya-cheloveka-skg-at1322-skg-at13221> (accessed March 17, 2021).
5. Reily, D/ Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials / D. Reily, N. Enssin, H. Smith. – Los Alamos; US: Los Alamos, 1991. – 723 p.

6. Fluka-4 Manual. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/fluka.html> (accessed January 20, 2021).
7. ICRP 110 Adult Reference Computational Phantoms, 2009
8. ICRP 143 The Reference Computational Phantom Family, 2020
9. Welopolski, W. The Monte Carlo Calculation of the Average Solid Angle Subtended by a Right Circular Cylinder From Distributed Sources/ W. Welopolski // Nuclear Instruments and Methods. – 1977. - vol.143. – p. 577-581
10. Abbas, M. Analytical Calculations of the Solid Angles Subtended by a Well-Type Detector at Point and Extended Circular Sources / M. Abbas // Applied Radiation and Isotopes. – 2006. - vol.4. – p.1048-1056

УДК 53.089.68

**СОВРЕМЕННОЕ ЭТАЛОННОЕ ПОВЕРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ
ГРАДУИРОВКИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

ГУЗОВ В.Д., ЗАЙЦЕВ В.Д., КОЖЕМЯКИН В.А., ЛУКАШЕВИЧ Р.В., НИКОЛАЕВ
В.А., РАСКОША В.Л., СЕНЬКОВСКИЙ К.Г.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В докладе представлены материалы, касающиеся разработки и внедрения автоматизированных эталонных поверочных дозиметрических установок нового поколения, предназначенных для калибровки средств измерений в полях гамма-, бета-, нейтронного и рентгеновского излучения. Представлена информация о разработанной и созданной предприятием ядерно-физической аппаратуре, используемой для калибровки полей ионизирующего излучения.

Ключевые слова: установки поверочные дозиметрические, дозиметр, калибровка поля фотонного излучения, установка дозиметрическая поглощенной дозы бета-излучения.

**MODERN REFERENCE TESTING EQUIPMENT FOR GRADUATING
DOSIMETRIC DEVICES**

HUZOV V.D., ZAITSEV V.D., KOZHEMYAKIN V.A., LUKASHEVICH R.V.,
NIKOLAYEV V.A., RASKOSHA V.L., SENKOVSKY K.G.

*Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEH»,
(Minsk, Republic of Belarus)*

Annotation. The report presents materials related to the development and implementation of automated standard calibration bench of a new generation, intended for the calibration of measuring instruments in the fields of gamma, beta, neutron and X-ray radiation. The information about the designed and created by nuclear-physical equipment used for calibration of ionizing radiation fields.

Keywords: calibration bench, dosimeter, calibration of the photon radiation field, beta calibration facility.

В докладе рассматриваются установки дозиметрические гамма-излучения УДГ-АТ130 и УДГ-АТ110, предназначенные для передачи рабочим эталонам и средствам измерений единиц кермы в воздухе и ее мощности, а также дозиметрических величин: экспозиционной дозы, AMBIENTНОГО ЭКВИВАЛЕНТА ДОЗЫ, индивидуального эквивалента дозы и их мощности.

Представлена установка поверочная нейтронная УПН-АТ140, предназначенная для передачи единиц плотности потока, мощности AMBIENTНОГО и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения. Установка обеспечивает создание полей быстрых и тепловых нейтронов в коллимированном пучке, поля быстрых нейтронов в «открытой» геометрии и предназначена для поверки и градуировки нейтронных дозиметров и радиометров в лабораторных условиях.

Рассказывается о завершении разработки установки поверочной рентгеновского излучения УПР-АТ300, обеспечивающей создание полей рентгеновского излучения в соответствии с национальными и международными стандартами с использованием рентгеновского аппарата ISOVOLT 320 M2/4.5-13. Данной разработке предшествовало выполнение проекта калибровочного стенда для ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», для использования в составе установки низкоэнергетического рентгеновского излучения УЭД 5-50М Государственного эталона Российской Федерации ГЭТ 8-2011. В соответствии с техническим заданием ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» разработана и введена в эксплуатацию эталонная дозиметрическая установка поглощенной дозы бета-излучения на основе автоматизированной экстраполяционной ионизационной камеры МЭК-1 и калибровочного стенда С-1 для использования в составе Государственного эталона Российской Федерации ГЭТ 9-82. Аналогичная установка изготовлена и введена в эксплуатацию для Белорусского государственного института метрологии в составе Национального эталона Республики Беларусь на основе калибровочного стенда С-1. На предприятии изготовлена поверочная дозиметрическая установка поглощенной дозы бета-излучения УДБ-АТ200. Основными свойствами установки УДБ-АТ200 являются: использование набора источников с

дозиметрическими характеристиками, полученными от высокоточного экстраполяционного метода; автоматическое прецизионное позиционирование источника относительно детектора с погрешностью 0,1 мм; идентификация типа источника и выравнивающего фильтра, обеспечивающих эталонное излучение в соответствии с ИСО 6980.

В докладе представлена информация о разработанной и созданной предприятием ядерно-физической аппаратуре, используемой для калибровки полей ионизирующего излучения:

1. Дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ5350/1 и ДКС-АТ5351;
2. Линейка сцинтилляционных высокочувствительных блоков-компараторов на основе NaI(Tl)-детекторов, а также тканезквивалентной пластмассы, предназначенных для аттестации полей фотонного излучения от 0,03 мкЗв/ч с различной верхней границей диапазона по мощности дозы и энергии фотонов (до 10 МэВ);
3. Интеллектуальный спектрометрический блок детектирования на основе LaBr₃(Ce)-сцинтиллятора с высоким энергетическим разрешением (менее 3,5 %) и энергетическим диапазоном от 30 кэВ до 10 МэВ, предназначенного для анализа спектра захватного гамма-излучения из мишеней, облучаемых нейтронами на установке УПН-АТ140;
4. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М в новом варианте – со сферическим замедлителем и учитывающем возможность дополнения набором из сфер «Боннера» различного диаметра.

Все перечисленное оборудование ориентировано на соответствие требованиям стандартов ИСО и МЭК.

Список литературы

1. Новое оборудование для градуировки дозиметрических приборов и аппаратуры / В. А. Кожемякин, Р. В. Лукашевич // Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации : материалы X Всерос. науч.-техн. конф., Мытищи, 27–29 октября 2014 г. / М-во обороны России. – Мытищи, 2014. – С. 59–62.

УДК 614.842:62.384.3

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РАДИАЦИОННОЙ
ОБСТАНОВКИ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ИГНАЛИНСКОЙ, РОВЕНСКОЙ,
ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС**

НОВИК А.Н., КУЧИНСКИЙ П.В., ХИЛЬКО Г.И., КРЕКОТЕНЬ О.В.

НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ,

(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Автоматизированная система осуществляет метеорологический мониторинг окружающей среды и контроль радиационной обстановки в зонах влияния Ровенской, Игналинской и Чернобыльской АЭС. Использование в составе системы высокочувствительных быстродействующих спектрометрических блоков детектирования гамма-излучения позволило накапливать измеренные спектры гамма-излучения в базе данных центра реагирования и производить автоматическую идентификацию радионуклидов, фиксировать малейшие изменения радиационного фона.

Ключевые слова: Автоматизированная система контроля радиационной обстановки, детекторы гамма-излучения, пункт измерения метеорологических параметров и гамма-излучения.

**AUTOMATED RADIATION MONITORING SYSTEM IN ZONES OF INFLUENCE
OF IGNALINE, RIVNE, CHERNOBYL NPP**

ALEKSANDR.N. NOVIK, PETR.V. KUCHINSKY, GENNADY.I. KHILKO,

OLEG.V. KREKOTEN

NIIPFP BSU,

(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The automated system carries out meteorological monitoring of the environment and monitoring of the radiation situation in the influence zones of the Rivne, Ignalina and Chernobyl nuclear power plants. The use of highly sensitive high-speed spectrometric units for detecting gamma radiation in the system made it possible to accumulate the measured spectra of gamma radiation in the database of the reaction center and automatically identify radionuclides, and record the slightest changes in the radiation background.

Keywords: Automated radiation environment monitoring system, gamma radiation detectors, point of meteorological parameters and gamma radiation measurement.

Автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО) является необходимым элементом эксплуатации любой АЭС. АСКРО выполняет информационно-вычислительные, управляющие и вспомогательные функции по контролю состояния радиационной безопасности на АЭС и в районе их расположения в нормальном режиме эксплуатации и в аварийных ситуациях.

АСКРО представляет собой иерархическую информационную сеть с территориально разнесенными автоматическими пунктами измерения (АПИ), которые имеют в своем составе программные и аппаратные средства, обеспечивающие функционирование модулей по заданным алгоритмам сбора, обработки, хранения и отображения информации [1, 2]. Кроме того каждый модуль поддерживает коммуникационные свойства для обеспечения доставки информации в пределах информационной сети.

В качестве технологии обмена данными между АПИ и центром реагирования (ЦР) выбрана GSM/GPRS технология, которая обеспечивает простоту и надежность аппаратных средств коммуникационных модулей АСКРО, возможность доставки информации в любую точку Республики Беларусь, используя современные средства приемо-передачи посредством глобальной сети Интернет.

В качестве протокола обмена информацией выбран протокол сетевого уровня IP-протокол, имеющий такие отличительные выгодные особенности, как повсеместная распространённость в сети Интернет, отличающийся простотой настройки, диагностики и высокой производительностью в работе. В качестве протоколов транспортного уровня выбраны протоколы TCP и UDP. Для обеспечения надежной маршрутизации при работе протоколов транспортного уровня (по классификации сетевой модели OSI) каждый из коммуникационных

модулей АПИ, имеет статический IP-адрес. Это обеспечит надежную, не зависящую от сбоев в реальной работе и последующей инициализации GSM-модемов, маршрутизацию информационного обмена между АПИ и ЦР.

Программный коммуникационный модуль терминального контролера АПИ взаимодействует через сеть Интернет с программным коммуникационным модулем сервера ЦР. Разработана система команд информационного взаимодействия, формат пакетов и алгоритмы обеспечения достоверности представительского уровня (поверх протокола UDP). Синхронизация взаимодействия коммуникационного модуля терминального контролера АПИ и коммуникационного модуля сервера ЦР со стороны ЦР осуществляется с помощью низкоуровневых UDP-сокеты обмена дейтаграммами, создание и применение которых предусмотрено в операционной системе Windows.

Программный коммуникационный модуль терминального контролера АПИ производит соединение с Интернет и информационное взаимодействие с ЦР через GSM-модемы.

ПО АПИ поддерживает функционирование оборудования терминального контролера, работу системного временного синхронизатора выполнения программных модулей, которые выполняют функции коммуникации с центром реагирования, функции опроса внешних интеллектуальных устройств (датчик гамма-фона, метеостанция, информационное табло и т.п.). Кроме того, ПО АПИ отвечает за поддержание микроклимата в аппаратном шкафу, работой сторожевого таймера, управление энергонезависимой памятью, функционирование с учетом дистанционных настроек и некоторые другие функции. Структурная схема АСКРО приведена на рис. 1.

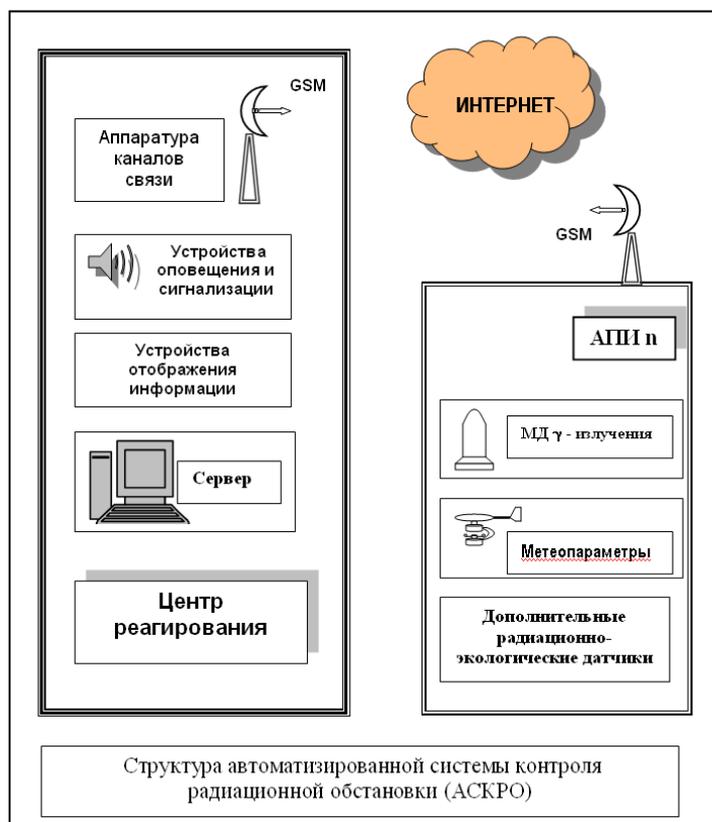


Рис. 1. Структурная схема АСКРО

Функционал АСКРО определяется оборудованием АПИ под управлением ПО АПИ, а также ПО Центра реагирования.

В системе используются интеллектуальные блоки детектирования гамма-излучения (ИБД) - УП «АТОМТЕХ» [3, 4, 5]. Блоки детектирования гамма-излучения имеют сертификат средств измерений РБ. Их характеристики приведены в таблице.

Таблица. Характеристики блоков детектирования гамма-излучения

Блок детектирования	БДКГ-224	БДКГ-211М
Детектор	Пластиковый сцинтиллятор 50*40 мм.	Сцинтилляционный NaI Ø63x63 мм
Диапазон энергий	30 кэВ - 10 МэВ	20 кэВ - 3 МэВ
Диапазон измерения мощности дозы гамма-излучения	40 нкЗв/ч - 1 Зв/ч	30 нЗв/ч – 150 мкЗв/ч
Предел основной относительной погрешности измерения МД	±15%	±20%
Энергетическая зависимость чувствительности относительно энергии 662 кэВ	от -25% до +40% 30 кэВ - 3 МэВ	±20% 40 кэВ – 3 МэВ
Чувствительность к гамма-излучению ¹³⁷ Cs, (имп·с ⁻¹ /мкЗв·ч ⁻¹)	530	2450
Степень защиты	IP67	IP67
Интерфейс	RS485	RS485
Диапазон рабочих температур	-40...+70°C	-35...+55°C
Относительная влажность воздуха (≤35°C без конденсации влаги)	≤98%	≤98%
Габаритные размеры, масса	Ø60x250мм, 0,6 кг	Ø90x350мм, 2 кг

Использование в составе системы высокочувствительных быстродействующих спектрометрических блоков детектирования гамма-излучения, позволило накапливать измеренные спектры гамма-излучения в базе данных центра реагирования и производить автоматическую идентификацию радионуклидов, фиксировать малейшие изменения радиационного фона.

Метеорологический мониторинг осуществляется метеостанциями WXT-520 (Финляндия), установленными в местах развертывания АПИ.

Программное обеспечение сервера ЦР функционирует в среде операционной системы Windows и состоит из пакетов программных модулей. Каждый из модулей функционирует в своем адресном пространстве.

Накопление информации происходит в таблицах СУБД FireBird. СУБД функционирует на основе клиент-серверной архитектуры. При конфигурации программно-аппаратных средств АСКРО, можно выбрать локальную установку сервера СУБД на компьютеры сервера ЦР, или выделить отдельный сервер баз данных. В любом случае модуль коммуникаций, модуль графического отображения и модуль управления и просмотра таблиц СУБД связаны с сервером FireBird при помощи сокетов на основе протоколов TCP/IP и являются его клиентами. Запись и чтение информации осуществляется при помощи SQL-запросов, которые обрабатывает сервер FireBird. Таким образом, ПО, функционирующее на основе клиент-серверной архитектуры, позволяет гибко конфигурировать аппаратно-программные средства базового комплекса в зависимости от потребностей заказчика.

АСКРО обеспечивает контроль радиационной обстановки в зонах влияния Ровенской, Игналинской и Чернобыльской АЭС. АПИ установлены в 12-ти пунктах, места расположения АПИ определены Заказчиком. АПИ системы контроля радиационной обстановки показаны на рис. 2. Данные с АПИ поступают в ЦР на территории Белгидромета. АСКРО введена в опытную эксплуатацию.



Рис. 2. АПИ системы контроля радиационной обстановки

Автоматизированная система контроля радиационной обстановки в автоматическом режиме обеспечивает:

- опрос АПИ через задаваемые программно интервалы времени;
- накопление информации в базах данных;
- отображение данных АПИ с использованием MapInfo MapX карты;
- сравнение величин параметров с заданными порогами, перевод системы в тревожный режим и выдача звуковой сигнализации;
- коммуникацию между серверами ЦР различных уровней иерархии;
- управление режимами работы как отдельного сервера, так и системы в целом;
- визуализацию данных в удобном для оператора виде, с возможностью настройки характеристик отображения;
- использование современной СУБД (FireBird) на основе клиент-серверной архитектуры;
- самотестирование аппаратных средств с выдачей сообщений о неисправностях;
- протоколирование событий работы сервера;
- обеспечение санкционированного доступа;
- контроль запросов и дистанционного изменения параметров и установок АПИ из ЦР;
- просмотр оператором ЦР истории поступления данных по заданным параметрам, истории действий оператора (перезапуск, изменение параметров работы и т.п.).

Разработанная система позволяет способствовать решению задач административного управления в случае чрезвычайных ситуаций.

В местах размещения аппаратуры автоматических пунктов измерения предусмотрена установка информационных электронных табло для отображения уровней мощности дозы гамма-излучения, что обеспечит информирование населения, проживающего в регионе АЭС, объективными данными о радиационной обстановке.

Список литературы

1. Новик А.Н. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки окружающей среды с открытой архитектурой построения/ А.Н. Новик, П.В. Кучинский, И.В. Белый, С.Г. Тамашевич// Материалы I Международной научно-технической конференции «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС» / БГУИР - Минск, февраль, 2015. – С.131.
2. Новик А.Н. Программно-аппаратные средства автоматизированной системы контроля радиационной обстановки окружающей среды в зоне наблюдения АЭС с применением спектрометрических блоков детектирования гамма-излучения /А.Н. Новик, И.В. Белый, С.Г. Тамашевич, П.В. Кучинский// Материалы международной конференции «Приборостроение 2014» / БНТУ – Минск, 2014. – С. 137-138.
3. Новик А.Н. Программно-аппаратные средства автоматического пункта измерения АСКРО АЭС с применением спектрометрических блоков детектирования гамма-излучения/ А.Н. Новик, И.В. Белый, С.Г. Тамашевич, П.В. Кучинский // Материалы республиканского научного семинара «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии». / Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны – Минск, 2014. – С. 59.
4. Кожемякин В.А. Линейка интеллектуальных блоков детектирования гамма-излучения для использования в составе роботизированных и других систем / В.А. Кожемякин // Материалы XIII Международного совещания «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» / Санкт-Петербург, октябрь 2015 – С.101-105.
5. Новик А.Н. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки в зоне влияния Белорусской АЭС / А.Н. Новик, И.В. Белый, Е.В. Быстров, В.А. Кожемякин, П.В. Кучинский // 6-ая Международная конференция «Ядерные технологии XXI века»: Сборник докладов НАНБ, Минск, октябрь 2016. – С. 36-40.

УДК 621.039+53.087.4

МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ НЕЙТРОННОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЦИНТИЛЛЯТОРА CLYC(Ce)

ЛАГУЦКИЙ И.А., АНТОНОВ В.И., КОМАР Д.И.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье описан метод разделения импульсов нейтронного и гамма-излучения при использовании сцинтиллятора CLYC(Ce) для спектрометрии гамма-излучения при одновременном детектировании нейтронного излучения. Рассмотрены основные характеристики данного сцинтиллятора с точки зрения его применения в блоках детектирования гамма- и нейтронного излучения. Приведен метод сепарации гамма- и нейтронных импульсов на основании различий формы импульсов, а именно скорости нарастания и амплитуды. Рассмотрены перспективы рассмотренного метода для дальнейшего применения в блоках детектирования гамма- и нейтронного излучения на основе сцинтиллятора CLYC(Ce).

Ключевые слова: сцинтилляторы, CLYC(Ce), разделение импульсов, гамма-излучение, нейтронное излучение, фотоэлектронный умножитель, энергетическое разрешение.

METHOD OF SEPARATION OF NEUTRON AND GAMMA-RADIATION PULSES USING THE CLYC(Ce) SCINTILLATOR

ILYA A. LAGUTSKIY, VLADIMIR I. ANTONOV, DAMIAN I. KOMAR

*Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX»,
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The paper describes the method of neutron and gamma radiation pulse separation when using CLYC(Ce) scintillator for gamma radiation spectrometry with simultaneous detection of neutron radiation. The main characteristics of this scintillator from the point of view of its application in gamma- and neutron radiation detection units are considered. The method of separation of gamma- and neutron pulses on the basis of differences in pulse shape, specifically the rise time and amplitude, is presented. The prospects of the considered method for further use in gamma- and neutron detection units based on scintillator CLYC(Ce) are considered.

Keywords: scintillators, CLYC(Ce), pulse separation, gamma radiation, neutron radiation, photomultiplier tube. Energy resolution.

Введение

Персональные радиационные детекторы (ПРД) и спектрометрические персональные радиационные детекторы (СПРД) являются важными инструментами служб быстрого реагирования для обнаружения источников гамма-излучения и нейтронного излучения. Гамма-спектрометрический канал позволяет проводить идентификацию гамма-излучающих радионуклидов по спектру. Сочетание гамма-спектрометрического канала и детектирование нейтронного излучения в одном приборе обеспечивает высокую вероятность обнаружения опасных ядерных материалов.

Сцинтиллятор CLYC(Ce) ($\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$) весьма перспективен для одновременного обнаружения источников в полях смешанного гамма и нейтронного излучения, т.к. CLYC(Ce) имеет высокую эффективность регистрации нейтронов тепловых энергий благодаря наличию в составе ${}^6\text{Li}$, и обладает высоким энергетическим разрешением при спектрометрии гамма-излучения (4,5% для энергии 662 кэВ). Импульсы от гамма- и нейтронного излучения имеют разную форму, что позволяет провести их разделение.

Получение импульсов гамма- и нейтронного излучения сцинтиллятора CLYC(Ce)

Для анализа формы импульсов гамма- и нейтронного излучения для детектора CLYC(Ce) размерами $\text{Ø}38 \times 38$ мм был собран тестовый стенд, структура которого представлена на рис. 1.

Световые импульсы, поступающие со сцинтиллятора на фотоэлектронный умножитель, подключенный по схеме с заземленным анодом, преобразуются в токовые импульсы. Данные сигналы анализируются в двух точках: предпоследний динод, с использованием резистивно-

емкостной нагрузки, и анод в режиме снятия тока. Такой комплексный подход позволяет осуществлять полный сбор заряда с анода, что позволяет более точно оценивать амплитуду импульса и уменьшает вклад устройства обработки в параметр энергетического разрешения. Снятие импульсов напряжения с предпоследнего динода с комплексной нагрузкой позволяет получить необходимые для работы АЦП импульсы, не влияя на сбор заряда. В данном случае для получения аппаратного спектра использовалось АЦП со шкалой 4 МэВ.



Рис. 1. Структурная схема стенда захвата импульсов сцинтиллятора CLYC(Ce).

Форма импульсов от гамма- и нейтронного излучения была получена путем подключения к предпоследнему диноду цифрового осциллографа, что позволяет оценивать как амплитудные так и временные характеристики сигнала. Для получения импульсов был использован источник $^{238}\text{PuBe}$ окруженный 5 см полиэтилена, что создавало поток тепловых нейтронов, достаточный для эффективной работы с цилиндрическим кристаллом CLYC(Ce) размером $\text{Ø}38 \times 38$ мм.

Для определения принадлежности импульсов к гамма- или нейтронному излучению был проведен анализ аппаратного спектра, который показал, что альфа-частицы, образуемые в кристалле при взаимодействии ^6Li с тепловыми нейтронами, формируют пик в районе энергии 3,1-3,2 МэВ. В связи с этим была произведена настройка синхронизации осциллографа и устройства обработки таким образом, что оцифровывание сигнала происходило только для тех импульсов, чей интегрированный с анода заряд соответствовал в аппаратном спектре энергии $3,15 \text{ МэВ} \pm 5\%$.

Полученные осциллограммы импульсов нейтронного и гамма-излучения от $^{238}\text{PuBe}$ источника далее были сохранены и обработаны цифровыми методами для избавления от шумов и наводки импульсов синхронизации.

На рис. 2 представлены обработанные осциллограммы импульсов от различных частиц, которые в аппаратном спектре соответствуют энергии $3,15 \text{ МэВ} \pm 5\%$. Шаг дискретизации составляет 2 нс.

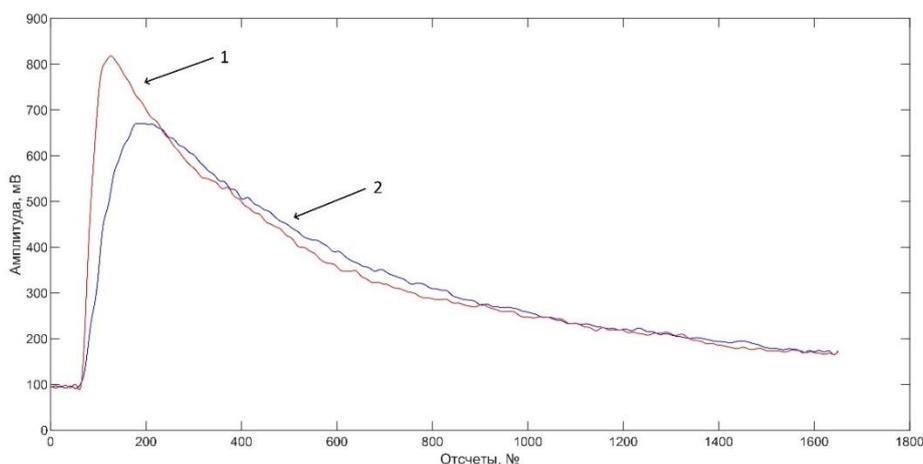


Рис. 2. Формы гамма- и нейтронного импульсов, получаемые на входе устройства обработки: 1 – гамма-излучение, 2 – нейтронное излучение

Метод сепарации импульсов

При анализе формы импульсов было замечено, что наибольшие различия заметны в течение первой микросекунды свечения кристалла, при этом, несмотря на одинаковое значение заряда, собираемого за время вспышки, амплитуда и скорость нарастания фронта гамма-импульса значительно выше, что также отмечено в публикациях [1-4].

Однако во многих работах амплитуды приведены в нормализованной величине, что может вводить в некоторое заблуждение при анализе импульсов. Это связано с тем, что при нормировке разница в скорости нарастания фронта становится менее заметной, а разница постоянных времени экспоненциальных составляющих многокомпонентной сцинтилляции CLYC(Ce) становится значительно заметнее, а именно для нейтронного импульса значительно больше «хвост» импульса.

В данном случае можно сделать вывод, что разделение импульсов можно проводить с помощью оценки длительности самой большой составляющей сцинтилляции, однако полученные осциллограммы показывают, что разница экспоненциальных составляющих при одинаковом заряде для импульсов от гамма- и нейтронного излучения значительно меньше разницы в скорости нарастания фронта, учитывая разницу амплитуды. Это различие открывает возможность разделения импульсов с использованием анализа скорости нарастания фронта.

Исходя из полученных данных был разработан метод сепарации импульсов нейтронного и гамма-излучения с потенциальной возможностью его применения в блоках детектирования на основе АЦП без необходимости осуществления общепринятого для кристалла CLYC(Ce) принципа анализа формы импульса (*pulse-shape discrimination – PSD*) на основе количественной оценки скорости сбора заряда.

Данный метод основан на оценке скорости нарастания фронта импульсов, попадающих в энергетическое окно отклика кристалла на тепловые нейтроны. Суть метода заключается в вычислении времени между двумя событиями: моментом старта сбора сигнала и временем пересечения импульсом, получаемым с динода, определенной амплитудной границы. Данный способ легко осуществить с помощью двух высокоскоростных компараторов, задержка которых не должна превышать одного такта счетчика времени.

Для первого компаратора устанавливается достаточно низкий уровень, который отвечает за формирование импульса старта преобразования всего АЦП Вилкинсона. Он подбирается в зависимости от конкретной реализации работы данного. Для второго компаратора устанавливается уровень, который позволит с высокой долей вероятности засечь импульс нейтронного излучения, но при этом не будет настолько низок, чтобы разница между моментом срабатывания компаратора на гамма-частицу и нейтрон была мала.

Для разделения гамма- и нейтронного импульсов необходимо вычислить время от возникновения стартового импульса до появления импульса, характеризующего скорость нарастания фронта. Далее опытным путем подбирается временная граница, которая отвечает за отнесение анализируемого импульса к одному или другому виду излучения.

Для импульсов, приведенных на рис. 2, оптимальным уровнем является 600 мВ, что обеспечивает наилучшее соотношение между разницей в моменте формирования импульса компаратора и вероятностью того, что амплитуда импульса нейтрона окажется ниже. При этом необходимо отметить, что при анализе импульсов было замечена разница в колебании амплитуды нейтронных и гамма импульсов попадающих в одинаковое энергетическое окно. Амплитуда нейтронных импульсов значительно колеблется (в пределах 50 мВ), в то время как амплитуда гамма-импульсов практически всегда одинаковая. Данный фактор необходимо учитывать при выборе уровня дискриминации импульсов.

В ходе экспериментов было получено, что для анализируемой системы скорость нарастания гамма-импульсов составляет менее 50 нс (в среднем 25 нс), а для импульсов от нейтронов составляет не менее 100 нс (в среднем 150 нс). Таким образом для исследуемой системы оптимальным является установление порога превышения в 80 нс. Если разница между импульсами старта и превышения порога дискриминации больше данного значения, то можно с высокой долей вероятности сказать, что отклик сцинтиллятора вызван попаданием в него нейтрона.

Заключение

Проведен анализ перспектив использования кристаллического сцинтиллятора CLYC(Ce) для одновременного детектирования нейтронного и гамма-излучения.

Для определения характеристик импульсов, необходимых для разделения гамма- и нейтронного излучения был собран стенд с использованием кристалла Ø38×38 мм с природным содержанием ${}^6\text{Li}$.

При анализе аппаратного спектра детектируемого излучения было обнаружено, что пик тепловых нейтронов, находится в диапазоне 3,1-3,2 МэВ.

При анализе формы импульсов было обнаружено, что наиболее выражены различия в течение первой микросекунды сцинтилляции, а именно заметно, что гамма-импульс имеет большую амплитуду и скорость нарастания фронта. Данные различия формы импульсов позволяют применить метод разделения гамма- и нейтронного излучения на основе оценки скорости нарастания фронта с использованием компараторов. В ходе экспериментов было получено, что средняя скорость нарастания фронта гамма-импульсов составляет 25 нс, а нейтронного импульса 150 нс.

Таким образом данный метод имеет перспективы применения в блоках детектирования гамма- и нейтронного излучения на основе неорганического сцинтиллятора CLYC(Ce) в качестве альтернативы более распространенному методу оценки скорости сбора заряда.

Список литературы

1. D'Olympia, N., Chowdhury, P., Lister, C.J., Glodo, J., Hawrami, R., Shah, K., Shirwadkar, U. Pulse-shape analysis of CLYC for thermal neutrons, fast neutrons, and gamma-rays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013; 714, 121-127. DOI:10.1016/j.nima.2013.02.043
2. Whitney C.M., Soundara-Pandian L., Johnson E.B., Vogel S., Vinci B., Squillante M., Glodo J., Christian J.F. Gamma–neutron imaging system utilizing pulse shape discrimination with CLYC. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015; 784, 346-351. DOI: 10.1016/j.nima.2014.09.022
3. Dinar N., Celeste D., Silari M., Varoli V., Fazzi A.. Pulse shape discrimination of CLYC scintillator coupled with a large SiPM array. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019; 935, 35-39. DOI: 10.1016/j.nima.2019.04.099
4. Xue, T., Zhu, J., Wen, J., Cang, J., Zeng, Z., Wei, L., ... Li, J. Optimization of energy resolution and Pulse Shape Discrimination for a CLYC detector with integrated digitizers. Journal of Instrumentation, 2020, 15(02), P02018–P02018. doi:10.1088/1748-0221/15/02/p02018

УДК 53.089.68

**ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА В РАЙОНЕ
РАЗМЕЩЕНИЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС В ПРЕДЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД**

НИЧИПОРЧУК¹ А.О., КОЖЕМЯКИН¹ В.А., ЕКИДИН² А.А., ВАСИЛЬЕВ² А.В.,
ВАСЯНОВИЧ² М.Е., НАЗАРОВ² Е.И., ПЫШКИНА² М.Д.

¹*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
(Минск, Республика Беларусь)*

²*Институт промышленной экологии УрО РАН,
(Екатеринбург, Российская Федерация)*

Аннотация. В статье представлен состав и содержание полевых исследований в рамках радиационного мониторинга на площадке вблизи белорусской АЭС в предэксплуатационный период в августе 2019 года.

Ключевые слова: Белорусская АЭС, спектрометр, удельная активность, мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения.

**EXPERIENCE OF RADIATION MONITORING IN THE AREA OF SITING THE
BELARUSIAN NPP DURING THE PRE-OPERATION PERIOD**

ANDREI O. NICHYPARCHUK¹, VALERY A. KOZHEMYAKIN¹, ALEKSEY A. EKIDIN²,
ALEKSEY V. VASILIEV², MAXIM E. VASYANOVICH², EVGENIY I. NAZAROV², MARIYA D.
PYSHKINA²

¹*Scientific production unitary enterprise «ATOMTEX»,
(Minsk, Republic of Belarus)*

²*Institute of industrial Ecology Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
(Yekaterinburg, Russian Federation)*

Annotation. The article presents the composition and content of studies within the framework of radiation monitoring at the site near the Belarusian NPP during the pre-operational period in August 2019.

Keywords: Belarusian NPP, spectrometer, specific activity, gamma radiation doze rate.

Согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергетике (МАГАТЭ) в рамках эксплуатации атомных энергетических станций (АЭС) проведение радиационного мониторинга объектов окружающей среды на прилегающей к станции территории является необходимым на всех этапах жизненного цикла АЭС. Это связано с тем, что нормальная эксплуатация АЭС, даже в отсутствие внештатных ситуаций, предполагает поступление в окружающую среду радиоактивных веществ. В августе 2019 года агентством по экологической безопасности «Альфа-Х91» при поддержке организации «Концерн Росэнергоатом» и российской неправительственной экологической организацией «Зеленый крест» с использованием оборудования производства УП «АТОМТЕХ» была проведена международная общественная экспедиция, целью которой являлось проведение радиационного мониторинга в окрестностях Белорусской АЭС, расположенной в Островецком районе Гродненской области, до её физического пуска.

В рамках данной экспедиции был исследован периметр территории вблизи первого энергоблока Белорусской АЭС в полосе на расстоянии 600-1000 метров от него с помощью портативных полевых спектрометров МКС-АТ6101ДР, портативных спектрометров МКС-АТ6102 и МКГ-АТ1321. На данной территории проведены измерения удельной активности (УА) радионуклида Cs-137 и естественных радионуклидов (К-40, Ra-226, Th-232) в почве методом *in situ*, а также измерены значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма излучения у поверхности почвы и на высоте 1 метр над ней. С применением спектрометра МКС-АТ6101С выполнена пешеходная съёмка на прилегающей территории к АЭС и автомобильная гамма-съёмка мощности амбиентного эквивалента дозы гама-излучения на дорогах, примыкающих к площадке расположения станции (рис. 1).

С помощью спектрометра МКС-АТ6101ДР выполнены исследования береговой линии реки Вилия на трех участках протяженностью 1 км методом полевой спектрометрии. Участок 1 расположен ниже устья реки Полпе. Участок 2 расположен ниже места забора воды для нужд

атомной станции, но выше точки сброса промышленной ливневой канализации (ПЛК) АЭС. Участок 3 расположен ниже точки сброса ПЛК АЭС. На этих же участках с использованием погружного гамма-спектрометра МКС-АТ6104ДМ выполнены измерения УА радионуклидов Cs-137 и K-40 в донных отложениях методом *in situ* в геометрии 2 ρ i и воде в геометрии 4 ρ i.

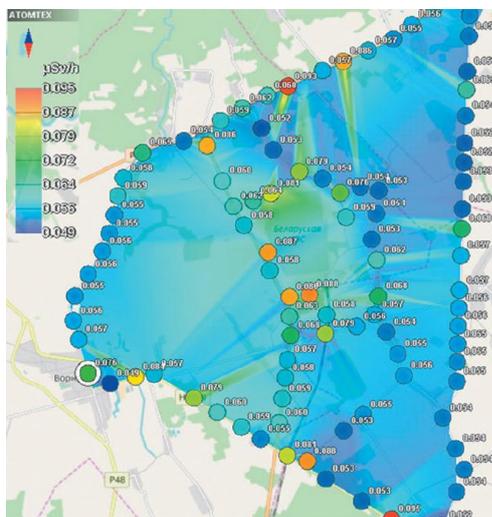


Рис. 1. Результаты автомобильной гамма-съемки с использованием спектрометра МКС-АТ6101С.

На метеорологической станции Маркуны выполнен отбор проб воздуха с помощью электростатических воздухо-фильтрующих установок ФВУ-1200 для последующей оценки фонового содержания радиоактивных аэрозолей в приземных слоях атмосферного воздуха, в частности радионуклидов Be-7, Cs-137, Co-60.

С учетом максимального значения фактора разбавления, обусловленного многолетними метеорологическими условиями, была определена «критическая точка» – участок, где реализуется максимальное радиационное воздействие от выбросов радиоактивных веществ АЭС с учетом всех путей облучения. В данной точке проведены *in-situ* измерения УА радионуклидов Cs-137, K-40, Ra-226 и Th-232 с помощью спектрометра МКС-АТ6101ДР, а также выполнен отбор проб почвы на глубину до 30 см для дальнейших лабораторных исследований и сопоставления результатов измерений.

В результате экспедиции выполнен комплексный радиационный мониторинг различных объектов окружающей среды на прилегающей территории вблизи Белорусской АЭС. В качестве основных параметров контроля были выбраны:

- мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения вблизи поверхности земли и на расстоянии 1 метр от неё;
- содержание гамма-излучающих радионуклидов (удельная активность) в почве исследуемых территорий, воде и донных отложениях.

Обработка полученных данных в полевой период экспедиции позволила получить функции распределения мощности дозы и активности радионуклидов для всех обследованных участков. Изменение установленных диапазонов значений или изменение установленных форм функций распределений мощности дозы, полученных величин будет означать изменение радиоэкологической ситуации, вызванное внешним фактором.

Подробнее с результатами полевых исследований можно ознакомиться в [1].

Список литературы

1. А. А. Екидин и др. Полевые методы исследования радиационной обстановки в районе размещения Белорусской АЭС в предэксплуатационный период //АНРИ. 2020. №2 (101). С. 31-44.

УДК 53.089.68

**КОМПЛЕКТОВАНИЕ ПЕРЕДВИЖНОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ НА
РАДИОАКТИВНО-ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

КОЖЕМЯКИН В.А., ПРИБЫЛЕВ С.В.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Авторами предложен вариант комплектации мобильной радиометрической лаборатории на шасси микроавтобуса для обеспечения оперативного мониторинга радиационной обстановки, включающей оборудование для стационарного размещения в автомобиле, портативные носимое и переносное оборудование, а также приборы для индивидуального использования персоналом лаборатории.

Ключевые слова: мобильная радиометрическая лаборатория, радиационный мониторинг.

**EQUIPMENT OF A MOBILE RADIOMETRIC LABORATORY WITH MEASURING
EQUIPMENT FOR EXPRESS CONTROL IN RADIOACTIVELY CONTAMINATED AREAS**

VALERY A. KOZHEMYAKIN, SERGEY V. PRIBYLEV

*Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX»,
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The authors have proposed a variant of completing a mobile radiometric laboratory on a minibus chassis to ensure operational monitoring of the radiation situation, including equipment for stationary placement in a car, portable wearable and portable equipment, as well as devices for individual use by laboratory personnel.

Keywords: mobile radiometric laboratory, radiation monitoring.

Сотрудниками научно-производственного унитарного предприятия «АТОМТЕХ» накоплен значительный опыт разработки и производства оборудования для решения самых разнообразных задач радиэкологического мониторинга территорий, подвергшихся техногенному радиоактивному загрязнению. Одной из особенностей данных территорий является вторичный перенос радиоактивных веществ вследствие ветров, пожаров и деятельности человека. Поступление радионуклидов в организм человека приводит к повышенным дозовым нагрузкам у населения, проживающего на загрязненных территориях. Решения, предложенные специалистами компании, широко применяются в различных странах в рамках национальных программ аварийной готовности и реагирования, включая регионы, пострадавшие от аварий на Чернобыльской и Фукусимской АЭС.

Авторами предложен вариант комплектации мобильной радиометрической лаборатории на шасси микроавтобуса для обеспечения оперативного мониторинга радиационной обстановки, включающей оборудование для стационарного размещения в автомобиле, портативные носимое и переносное оборудование, а также приборы для индивидуального использования персоналом лаборатории.

К оборудованию для стационарного размещения относятся комплекс радиационного сканирования маршрута передвижения, гамма-бета-спектрометр и альфа-бета-радиометр. Мобильный комплекс радиационного сканирования маршрута передвижения МКС-АТ6103 предназначен для радиационного картографирования местности во время передвижения лаборатории, измерения МЭД и идентификации гамма-излучающих радионуклидов.

Гамма-бета спектрометр МКС-АТ1315 предназначается для измерения удельной или объемной активности таких радиэкологически-значимых радионуклидов, как ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах объектов окружающей среды. Радиометр РКС-АТ1329 с устройством отбора проб воздуха предназначен для одновременного измерения с разделением по виду излучения суммарной альфа- и бета-активности аэрозольных аналитических фильтров в целях контроля загрязненности воздуха, что особенно актуально при пожарах. РКС-АТ1329 может быть также использован для анализа других счетных образцов и для радиометрии мазков, отбираемых для контроля загрязненности различных поверхностей.

Спектрометр излучения человека СКГ-АТ1316 предназначен для экспресс-контроля и измерения активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs и ^{134}Cs в теле человека, а также оценки дозы внутреннего облучения. Спектрометр излучения человека СКГ-АТ1322 предназначен для измерения активности гамма-излучающих радионуклидов ^{131}I и ^{133}I в щитовидной железе человека.

К портативному оборудованию относится дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М, в комплекте с блоками детектирования альфа-, бета- и гамма-излучения, а также спектрометр полевой переносный и спектрометрический персональный радиационный детектор. На базе дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М также возможна организация выносного поста радиационного контроля и поста контроля загрязненности рук. Спектрометр полевой МКС-АТ6101ДР предназначен для измерения плотности загрязнения и удельной активности ^{137}Cs в почвах и грунтах in-situ (без отбора проб) с возможностью GPS-привязки данных к координатам местности для оперативного составления/корректировки уточненных карт радиоактивного загрязнения местности. Спектрометрический персональный радиационный детектор (СПРД) предназначен для поиска и обнаружения источников гамма-излучения с идентификацией радионуклидного состава, а также измерения мощности дозы. При необходимости радиационного мониторинга водоемов лаборатория комплектуется погружным спектрометром МКС-АТ6104ДМ.

Оборудование для индивидуального использования персоналом лаборатории включает в себя карманные дозиметры-радиометры МКС-АТ6130 для измерения мощности дозы и плотности потока бета-частиц и индивидуальные дозиметры ДКГ-АТ2503 для измерения индивидуального эквивалента дозы персонала лаборатории.

Предложенная комплектация мобильной лаборатории обеспечит оперативное получение информации о радиационной обстановке и прогнозируемых дозах облучения населения с целью дальнейшего информирования соответствующих органов государственного управления и населения близлежащих территорий.

УДК 621.039, 539.1.074, 621.38

ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ РАБОТЫ НОВОГО МУЛЬТИСФЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРАПЫШКИНА М.Д.^{1,2}, ВАСИЛЬЕВ А.В.¹, ЕКИДИН А.А.¹, НАЗАРОВ Е.И.¹, ГУРИНОВИЧ В.И.³, КОМАР Д.И.³, КОЖЕМЯКИН В.А.³1) *Институт промышленной экологии УрО РАН,
(Екатеринбург, Российская Федерация)*2) *Уральский федеральный университет,
(Екатеринбург, Российская Федерация)*3) *Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В данной работе представлены разработка, валидация и верификация работы нового мультисферного спектрометра. Спектрометр состоит из активного детектора тепловых нейтронов на основе ³He-пропорционального счетчика и набора из 12 полиэтиленовых сфер-замедлителей с диаметрами от 3" до 12". Отклики детектора при размещении его внутри сфер-замедлителей различного диаметра были получены с помощью Монте-Карло кода *FLUKA*. Восстановление энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения выполнено на основе метода параметризации. Проведена валидация работы разработанного спектрометра и метода восстановления энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения с использованием двух наиболее широко распространенных радионуклидных нейтронных источников: ²³⁹Pu(a, n)Be и ²⁵²Cf. Проведены сличения спектров нейтронного излучения, полученные новым мультисферным спектрометром и дозиметром-спектрометром нейтронов ДСН-4.

Ключевые слова: Монте-Карло моделирование, нейтроны, дозиметр-радиометр, поправочный коэффициент, геометрия облучения.

VALIDATION AND VERIFICATION OF THE NEW MULTISPHERE SPECTROMETER OPERATIONMARIYA D. PYSHKINA^{1,2}, ALEKSEY V. VASILYEV¹, ALEKSEY A. EKIDIN¹, EVGENIY I. NAZAROV¹, VLADIMIR I. GURINOVICH³, DAMIAN I. KOMAR³, VALERY A. KOZHEMYAKIN³1) *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
(Yekaterinburg, Russian Federation)*2) *Ural Federal University,
(Yekaterinburg, Russian Federation)*3) *Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEH»,
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. This paper presents the development, validation and verification of the operation of a new multisphere spectrometer. The spectrometer consists of an active thermal neutron detector based on a ³He-proportional counter and a set of 12 polyethylene spheres-moderators with diameters from 3" to 12". The responses of the detector when placed inside the moderator spheres of various diameters were obtained using the *FLUKA* Monte-Carlo code. The energy distribution of the neutron radiation flux density is reconstructed based on the parameterization method. The operation of the developed spectrometer and the method for reconstructing the energy distribution of the neutron radiation flux density were validated using the two most widespread radionuclide neutron sources: ²³⁹Pu (a, n) Be and ²⁵²Cf. Comparisons of the neutron radiation spectra obtained by the new multisphere spectrometer and the DSN-4 neutron dosimeter-spectrometer have been carried out.

Keywords: Monte-Carlo simulation, neutrons, dosimeter-radiometer, correction factor, exposure geometry.

Введение

За биологической защитой на объектах использования атомной энергии нейтронное излучение имеет непрерывный спектр, охватывающий до 11 порядков по энергии – от 0,025 эВ до 20 МэВ. Так как энергетическая зависимость чувствительности отдельных индивидуальных дозиметров отличается от удельного индивидуального эквивалента дозы, то широкий диапазон

энергий нейтронов в большинстве случаев приводит к искаженной оценке индивидуальной дозы персонала. Наиболее точные и простые оценки эффективной дозы при воздействии нейтронного излучения на персонал могут быть получены с использованием информации о энергетическом и угловом распределении плотности потока нейтронов на рабочем месте персонала. В 1960 году группа ученых предложила новый тип нейтронного спектрометра [1]. Он состоял из небольшого детектора на основе сцинтиллятора ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, установленного внутри полиэтиленовых сфер-замедлителей с размерами от 2 до 12 дюймов в диаметре. Спектрометры такого типа претерпели множество изменений за последние 60 лет – использовались различные типы нейтронных детекторов и сфер-замедлителей [2,3]. Для регистрации нейтронов применялись активные нейтронные детекторы на основе фольг Au и In, ионизирующие камеры, такие как ${}^3\text{He}$ и BF_3 пропорциональные счетчики, сцинтиллятор ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$. Целью данной работы была разработка, валидация и верификация работы нового мультисферного спектрометра для целей индивидуальной дозиметрии нейтронного излучения на рабочих местах персонала объектов использования атомной энергии.

Материалы и методы

В новом мультисферном спектрометре применяется ${}^3\text{He}$ -пропорциональный счетчик, который регистрирует нейтроны после их замедления до тепловых энергий в полиэтиленовых сферах различного размера. Типичный счетчик представляет собой заполненную газом трубку с высоким напряжением, приложенным к аноду и катоду. Нейтрон, проходящий через трубку, будет взаимодействовать с атомом ${}^3\text{He}$ с образованием трития (${}^3\text{T}$) и протона. Протон ионизирует окружающие атомы газа, создавая заряды, которые, в свою очередь, ионизируют другие атомы газа в процессе лавинообразного размножения. Результирующие заряды собираются в виде измеримых электрических импульсов с амплитудами, пропорциональными энергии нейтронов. Импульсы служат для идентификации и количественной оценки нейтронов определенной энергии. В данной работе использовался ${}^3\text{He}$ -пропорциональный счетчик с давлением ${}^3\text{He}$ 10 бар внутри цилиндрического активного объема $3,9\text{ см}^3$ ($\text{Ø}2,5 \times 2,5\text{ см}$) [4].

Изначально оригинальный сферический спектрометр Боннера содержал 5 полиэтиленовых сфер-замедлителей диаметром 2, 3, 5, 8, 12 дюймов. Поскольку большинство нейтронных спектрометров на основе ${}^3\text{He}$ обычно содержат до 14 сферических замедлителей, были изготовлены 12 полиэтиленовых сфер-замедлителей с номинальными диаметрами 3, 3,5, 4, 4,5, 5, 6, 7, 8, 9, 9,5, 10, 12 дюймов, входящих в состав разработанного спектрометра. Сферические замедлители большего диаметра и со слоем металла не разрабатывались из-за диапазона энергий возможных нейтронных полей. Все сферические замедлители изготовлены из полиэтилена высокой плотности с добавлением технического углерода для уменьшения старения полиэтилена. Плотность этого материала $0,96\text{ г/см}^3$. Спектрометр разработан УП «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь [5]. Внешний вид спектрометра представлен на рис. 1.

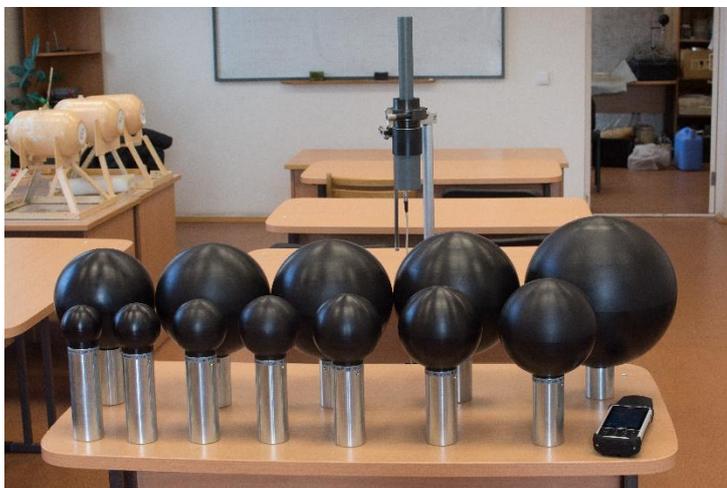


Рис. 1. Внешний вид спектрометра

Спектрометр был смоделирован с помощью Монте-Карло кода *FLUKA* [6, 7] для получения функций отклика детектора внутри каждого сферического замедлителя. Модель детектора включала детекторный объем, заполненный ^3He , электронику, смоделированную в виде цилиндра из нержавеющей стали со стальным тросом, помещенные в полиэтиленовый цилиндр, покрытый нержавеющей сталью. Модель счетчика со сферическим замедлителем помещалась в сферический объем, заполненный воздухом, но исключаяющий рассеяние нейтронов. Имитационная модель представлена на рис. 2.

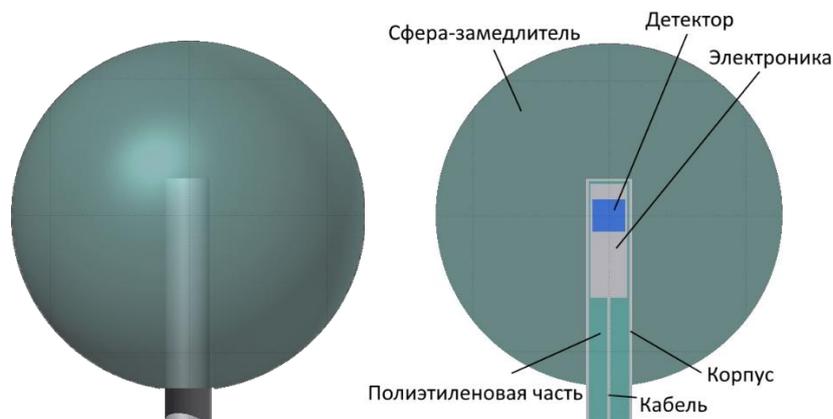


Рис. 2. Монте-Карло – модель спектрометра

Спектрометр облучался моноэнергетическим нейтронным пучком квадратного сечения, покрывающим всю площадь прибора. Энергия нейтронного пучка менялась от 10^{-3} до 10^7 эВ. Функция отклика представлена на рис.3. Предполагается, что функция отклика «голого» детектора имеет энергетическую зависимость $1/v$. Но, как видно, она имеет пик в области энергий от $1 \cdot 10^{-2}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ эВ. Этот пик появляется, вероятно, потому что нейтроны перед тем, как провзаимодействовать с ^3He , проходят через конструкционный материалы, такие как сталь (Fe, Ni и т. д.) и полиэтилен.

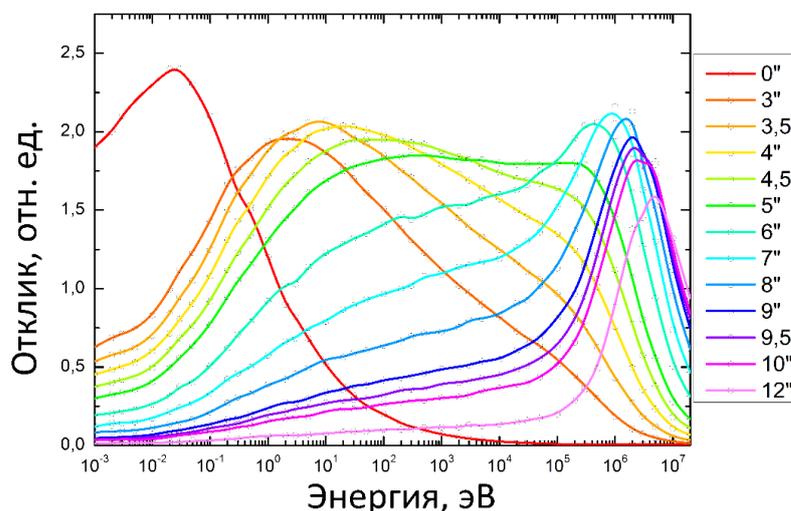


Рис. 3. Отклик детектора внутри сфер-замедлителей различного диаметра

Для валидации работы разработанного спектрометра были проведены измерения скоростей счета от двух наиболее популярных радионуклидных источников: $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ и ^{252}Cf . Центр спектрометра и нейтронный источник были размещены на расстоянии 1 м и подняты на 1,5 м от пола. Расстояние между спектрометром и стенами помещения составляло ~ 3 м и ~ 2 м в эксперименте с источниками $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ и ^{252}Cf соответственно, чтобы минимизировать количество рассеянных нейтронов. В ходе эксперимента скорость счета

определялась детектором, помещенным в сферы различного диаметра. Результаты измерения счетчика для обоих источников представлены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты измерений скорости счета

Диаметр сферы, дюйм	²³⁹ Pu(α, n)Be	²⁵² Cf
	Скорость счета, с ⁻¹	
0	3,3±	0,6±
3	5,9±	2,1±
3,5	8,1±	2,4±
4	10,1±	3,3±
4,5	14,0±	4,3±
5	16,0±	5,4±
6	20,5±	6,8±
7	24,2±	7,7±
8	26,1±	7,5±
9	24,3±	7,0±
9,5	25,1±	6,5±
10	24,8±	6,4±
12	21,1±	4,5±

Определение энергетического распределения плотности потока нейтронов в определенном энергетическом диапазоне возможно после восстановления всего спектра во всем энергетическом диапазоне. Метод восстановления спектра измеряемого нейтронного потока основан на вычислении минимума невязки при сравнении измеренных скоростей счета и тех, которые были получены путем перемножения матриц чувствительности детектора в сферах-замедлителях и спектра нейтронного излучения, представляемого в виде суперпозиции спектра тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов, описываемых формулами, которые приводятся в табл. 2 [8].

Табл. 2. Функции, описывающие плотность потока в разных энергетических диапазонах

Тепловые, $\varphi_{th,j}$, E<10 ⁻⁷ МэВ	Промежуточные, $\varphi_{epi,j}$, 10 ⁻⁷ МэВ< E<0,1 МэВ	Быстрые, $\varphi_{f,j}$, E> 0,1 МэВ
$\frac{E_j}{T_0^2} \cdot e^{(-E_j/T_0)}$	$[1 - e^{-(E_j/E_d)^2}] \cdot E_j^{(b-1)} \cdot e^{(-E_j/\beta')}$	$E_j^\alpha \cdot e^{(-E_j/\beta)}$

где E_j – энергия j-ого энергетического интервала, МэВ, T_0^2 – энергия пика тепловых нейтронов, $2,53 \cdot 10^{-8}$ МэВ, E_d – энергия, характеризующая нижнюю границу функции, $7,07 \cdot 10^{-8}$ МэВ, b – наклон возрастающей стороны спектра, отн. ед., β' – наклон ниспадающей части спектра, МэВ, α – переменная, описывающая форму пика быстрых нейтронов, отн. ед., β – переменная, описывающая энергию пика быстрых нейтронов, МэВ.

Аналитически спектр нейтронов может быть представлен с помощью следующего математического выражения:

$$\varphi_j = P_{th} \cdot \varphi_{th,j} + P_{epi} \cdot \varphi_{epi,j} + P_f \cdot \varphi_{f,j}, \text{ с}^{-1} \text{ см}^2 \text{ МэВ}^{-1} \quad (1)$$

где P_{th}, P_{epi}, P_f – весовые коэффициенты, отн. ед.

Для целей верификации работы спектрометра проведены параллельные измерения спектра ²³⁹Pu(α,n)Be радионуклидного источника с помощью разработанного спектрометра и дозиметра-спектрометра нейтронов [9]. Дозиметр-спектрометр нейтронов состоит из пластикового сцинтиллятора с ZnS(Ag), набора из 4-х сфер замедлителей и блока отображения информации. Внешний вид прибора приведен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид дозиметра-спектрометра нейтронов ДСН-4

Геометрия измерений для разработанного спектрометра и дозиметра-спектрометра нейтронов была идентична. Приборы располагались на расстоянии 1,0 м от источника и на высоте 1,5 от поверхности пола. В случае разработанного спектрометра проводились измерения скоростей счета. В случае дозиметра-спектрометра нейтронов – мощность AMBIENTного эквивалента дозы.

Результаты и их обсуждение

Спектры радионуклидных источников $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ и ^{252}Cf восстановлены и сопоставлены с литературными данными [10, 11]. Спектры восстановлены в диапазоне энергий от 10^{-9} до 20 МэВ. Восстановленные и справочные спектры приведены на рис. 5.

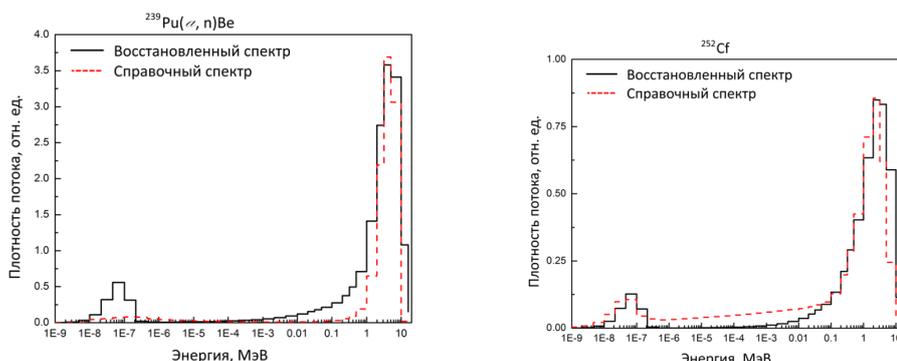


Рис. 5. Восстановленные и справочные спектры $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ и ^{252}Cf радионуклидных источников

Хорошо видно, что положение пиков восстановленных и справочных спектров совпадает по энергии. Наличие пика тепловых нейтронов в восстановленных спектрах обоих источников свидетельствует об наличии рассеянных нейтронов.

По справочным и восстановленным спектрам были рассчитаны следующие характеристики: $h^*(10)$ и средняя энергия спектра. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Таблица 3. Дозиметрические характеристики справочных и восстановленных спектров $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ и ^{252}Cf радионуклидных источников

Характеристика	$^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$		^{252}Cf	
	Справочный	Восстановленный	Справочный	Восстановленный
$h^*(10)$, пЗв•см ²	381	343	275	328
E_s , МэВ	3,1	3,0	1,4	2,0
φ , с ⁻¹ •см ²	10,6	16,6	4,9	4,6

Дозиметрические характеристики как для восстановленных, так и для справочных спектров $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ и ^{252}Cf радионуклидных источников хорошо согласуются. Разница между значениями, полученными из экспериментальных и справочных спектров, заключается в том, что наличие пика тепловых нейтронов снижает значения дозиметрических характеристик.

Заключение

Проведена верификация работы разработанного спектрометра и метода восстановления энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. В качестве альтернативного метода определения энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения использован дозиметр-спектрометр нейтронов в комплекте с программным обеспечением. Результаты верификации работы прибора и метода приведены на рис. 6. и в табл. 4.

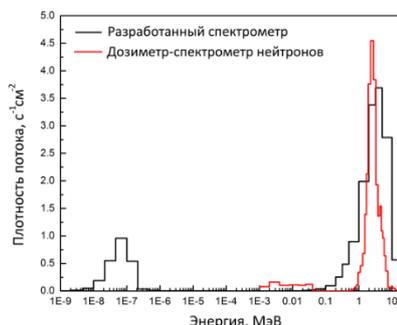


Рис. 6. Результаты определения спектра $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ источника разработанным спектрометром и дозиметр-спектрометром нейтронов

Табл. 4. Дозиметрические характеристики спектра $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$ источника, полученные разработанным спектрометром и дозиметр-спектрометром нейтронов

Характеристика	$^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$	
	Разработанный спектрометр	Дозиметр-спектрометр нейтронов
$H^*(10)$, мкЗв/ч	343	148
E , МэВ	2,5	2,7
φ , $\text{c}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$	16,6	27,0

Благодарность

Представленное исследование финансировалось РФФИ, проект № 19-38-90096.

Список литературы

1. R.L. Bramlett, R.I. Ewing, T.W. Bonner, A new type of neutron spectrometer (Nuclear Instruments and Methods, 1960), pp. 1-12.
2. F.D. Brooks, H. Klein, Neutron spectrometry: historical review and present status (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002), pp. 1-11.
3. D.J. Thomas, A.V. Alevra, Bonner sphere spectrometers: a critical review (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002), pp. 12-20.
4. <https://consensus-group.ru/images/ip/counters/docs/Helium-25-90-10,0-OC.pdf>
5. https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at1117m_all_options_0.pdf
6. T.T. Bohlen, F. Cerutti, M.P.W. Chin, A. Fasso, A. Ferrari, P.G. Ortega, A. Mairani, P.R. Sala, G. Smirnov and V. Vlachoudis, The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications (Nuclear Data Sheets 120, 2014), pp. 211–214.
7. A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso and J. Ranft. Fluka: a multi-particle transport code (CERN–2005–10, INFN/TC 05/11, SLAC–R–773, 2005).
8. R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernandez, FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007), pp. 1301- 1309.
9. Дозиметр-радиометр ДКС-96Н, Каталог оборудования радиационного контроля, «ООО НПП «Доза» 2009г.
10. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes: supplement to technical reports series no. 318. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
11. International standard ISO 8529. – Switzerland: International Standard Organization, 2001.

УДК 621.039.58

ЭФФЕКТИВНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЦЕССЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

ЕГОРОВ Д.И., ИЗМАЙЛОВ А.В.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. В современных условиях одной из важнейших целей государства является обеспечение безопасности ядерных материалов (ЯМ) и радиоактивных веществ (РВ) от внешних и внутренних угроз. В данной статье рассматривается обеспечение эффективной физической защиты (ФЗ) ЯМ и РВ в процессе транспортирования. Обсуждаются проблемы, связанные с безопасностью транспортирования ЯМ и РВ между стационарными ядерными объектами, в частности АЭС, с учетом специфики решения данной задачи (ограниченность сил охраны, большие расстояния между объектами, внезапность возможного нападения и др.). Рассмотрены вопросы оценки эффективности физической защиты специального груза при его транспортировании.

Ключевые слова: транспортирование ЯМ и РВ, физическая защита, оценка эффективности, метод оценки эффективности.

EFFECTIVE PHYSICAL PROTECTION OF NUCLEAR MATERIALS AND RADIOACTIVE SUBSTANCES DURING TRANSPORTATION

EGOROV D.I., IZMAYLOV A.V.

*National Research Nuclear University "MEPhI"
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. In modern world one of the most important missions of any state is to ensure security of nuclear materials (NM) and radioactive substances (RS) by protecting them from external and internal threats. This paper discusses an effective physical protection (PP) system for nuclear materials and radioactive substances in the process of transportation. The problems of secure transportation of nuclear materials and radioactive substances between fixed nuclear facilities are discussed in a view of specifics of this mission (limited number of security personnel, long distances between facilities, spontaneous nature of a potential attack etc.). The paper also reviews the issues of evaluation of effectiveness of physical protection of special cargo during transportation.

Keywords: transportation of NM and RS, physical protection, evaluation of effectiveness, method of effectiveness evaluation.

Введение

Обеспечение физической защиты ЯМ и РВ от противоправных действий (хищение, диверсия, террористический акт), в том числе при их транспортировании, наряду с обеспечением ядерной и радиационной безопасности, является весьма актуальной задачей. Все это отражено в международных (МАГАТЭ) [1, 2] и российских [3, 4] нормативных и правовых документах.

По сравнению со стационарными ядерными объектами процесс транспортирования ЯМ и РВ более уязвим в отношении действий потенциальных нарушителей. Следует отметить влияющие на это факторы:

- внезапность возможного нападения нарушителя на транспортные средства, перевозящие специальные грузы;
- использование транспортных средств, перевозящих специальные грузы на дорогах общего пользования и железных дорогах, что не позволяет создать вокруг транспортного средства охраняемые зоны;
- ограниченность численности сил охраны, сопровождающих специальный груз, а также удаленность сил поддержки от места потенциальной атаки;
- прохождение маршрутов транспортных средств со специальным грузом по разным регионам, что увеличивает потенциальную возможность внезапных атак;
- возможность перевеса сил и вооружения нарушителя над силами охраны, сопровождающими груз.

В связи с этим разработка эффективных организационных и технических решений по обеспечению физической защиты транспортируемых ЯМ и РВ представляет собой сложную научно-техническую проблему [5].

Для эффективной физической защиты ЯМ и РВ в процессе транспортирования требуются адекватные силы сопровождения и надлежащим образом оборудованные в инженерно-техническом отношении транспортные средства, а также силы поддержки, которые смогли бы оперативно противодействовать несанкционированным действиям нарушителей. Своевременное прибытие сил поддержки к месту возникновения чрезвычайной ситуации имеет решающее значение.

Функции физической защиты в процессе транспортирования ЯМ и РВ

Для повышения физической защищённости перевозимого груза предназначена автоматизированная система безопасности транспортирования (АСБТ), разработанная предприятием АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» [6, 7]. Для обеспечения эффективной физической защиты необходимо понимание зависимости ее эффективности от ряда факторов.

Для оценки системы физической защиты (СФЗ) при транспортировании необходимо рассмотрение функций физической защиты, и оценки эффективности выполнения каждой из них:

Обнаружение. Данную функцию обеспечивают технические средства охраны (ТСО) транспорта. При внезапном нападении в процессе перевозки ЯМ время обнаружения стремится к нулю, а вероятность обнаружения к единице.

Задержка. Главную роль в обеспечения данной функции играют физические барьеры (ФБ) (специальные контейнеры для перевозки, автоматическое пропускное устройство, модули пиротехнические и т.п.).

Реагирование. Задачу по пресечению несанкционированных действий нарушителя решают силы охраны, сопровождающие груз, и в конечном итоге, силы поддержки. Когда поступает информация от технических средств охраны транспорта о попытках несанкционированных действий нарушителя в отношении перевозимого специального груза, силы поддержки начинают реагировать. Выбор тактики действий сил поддержки, в которые могут быть вовлечены национальная гвардия, полиция и др., зависит от требований соответствующих нормативных документов, и от планов их взаимодействия. Для своевременного прибытия сил поддержки необходима бесперебойная связь с диспетчерскими пунктами и знание координат местоположения в любой момент времени.

При этом технические средства охраны участвуют в обеспечении всех функций системы физической защиты ЯМ и РВ в процессе транспортирования [6, 7].

АСБТ специальных грузов обеспечивает решение следующих задач:

- обнаружение и задержка нарушителя;
- мониторинг местоположения транспортных средств;
- контроль параметров безопасности транспортирования (физической, радиационной, пожарной, транспортной);
- оповещение сил реагирования;
- обеспечение защиты информации.

Метод оценки эффективности физической защиты специального груза при его транспортировании

Под эффективностью системы физической защиты при транспортировании понимается способность системы предотвратить несанкционированные действия нарушителя по отношению к ЯМ и РВ.

Основной метод, используемый для оценки эффективности это вероятностный анализ. Эффективность системы физической защиты стационарного ядерного объекта обычно оценивается количественным показателем, отражающим вероятность предотвращения несанкционированных действий [8, 9]. В данной работе рассматривается создание метода оценки эффективности физической защиты специального груза при его транспортировании.

Показатель эффективности зависит от:

- вероятности обнаружения несанкционированных действий;

- вероятности нахождения технических средств охраны в работоспособном состоянии и передачи сигнала на диспетчерский пункт;
- возможности нейтрализации нарушителя;
- вероятности существования благоприятных внешних условий для сил охраны.

Вероятность предотвращения несанкционированных действий во время транспортирования ядерного материала и радиоактивного вещества может быть представлена как:

$$P = P_{\text{обн.}} * P_{\text{т.с.о.}} * [P_{\text{защ.}} + P_{\text{п.с.}} * (1 - P_{\text{защ.}}) * P_{\text{с.п.}}] \quad (1)$$

$$\text{где } P_{\text{с.п.}} = F \left(\frac{T_{\text{н}} - T_{\text{с.п.}}}{\sqrt{D_1^{\text{н}} + D_1^{\text{с.п.}}}} \right) * P_{\text{нейтр.}}^{\text{с.п.}} \quad (2)$$

F – функция закона распределения случайной величины,

$P_{\text{обн.}}$ – вероятность обнаружения действий нарушителя;

$P_{\text{т.с.о.}}$ – вероятность нахождения технических средств охраны в работоспособном состоянии и передачи сигнала на диспетчерский пункт;

$P_{\text{защ.}}$ – вероятность нейтрализации нарушителя силами охраны, сопровождающими груз;

$P_{\text{п.с.}}$ – вероятность получения сигнала диспетчерским пунктом;

$P_{\text{с.п.}}$ – вероятность предотвратить несанкционированные действия нарушителя силами поддержки;

$T_{\text{н}}$ – время действий нарушителя;

$T_{\text{с.п.}}$ – время действий сил поддержки;

$D_1^{\text{н}}$ – дисперсия времени действий нарушителя;

$D_1^{\text{с.п.}}$ – дисперсия времени действий сил поддержки;

$P_{\text{нейтр.}}^{\text{с.п.}}$ – вероятность нейтрализации нарушителя силами поддержки.

Вероятность обнаружения нарушителя во время совершения несанкционированных действий при транспортировании специального груза стремится к единице. Данный вывод следует из-за того, что в случае нападения и попытке остановить движущейся транспорт для совершения несанкционированных действий будет сформирован сигнал тревоги.

За вероятность безотказной работы технических средств охраны и передачи сигнала на диспетчерский пункт отвечает комплекс АСБТ. При этом, важно отметить один из принципов построения физической защиты при транспортировании – зональный принцип. В зависимости от типа перевозок, устанавливаются разные требования к обеспечению мониторинга транспортного средства. Сигнал тревоги передается в разные диспетчерские пункты, и решения о выдвигении сил поддержки могут принимать разные организации. Данная особенность влияет на скорость передачи тревожных сообщений и время принятия решений.

Параметры окружающей среды также влияют на эффективность физической защиты специального груза. Под внешними условиями подразумеваются климатические и погодные условия, особенности окружающей среды в точке нападения нарушителя и т.п.

При определении вероятности нейтрализации нарушителя можно рассматривать два варианта исходов событий:

- нейтрализация нарушителя силами сопровождения груза;
- нейтрализация нарушителя силами поддержки.

В первом случае вероятность нейтрализации нарушителя силами сопровождения является вероятностью их победы в боестолкновении, разумеется с учетом принятой модели нарушителя. Данный показатель можно рассчитать имитационно-игровыми методами, используя, например, программный комплекс "Полигон", разработанный АО «ФЦНИВТ СНПО «Элерон» [10].

Во втором случае нейтрализация нарушителя зависит от выполнения условия $T_{\text{н}} - T_{\text{с.п.}} > 0$. Для этого оцениваются, соответственно, времена действия нарушителя от момента обнаружения до совершения несанкционированного действия и времени действий сил поддержки от момента обнаружения до прибытия в точку нападения. $T_{\text{н}}$ состоит из времени преодоления нарушителем физических барьеров в транспортном средстве, времени возможной нейтрализации нарушителем сил охраны, сопровождающих груз и т.д. Для $T_{\text{с.п.}}$ это сумма времени передачи сообщения на диспетчерский пункт, времени оценки ситуации и принятия решений, времени движения сил поддержки от места дислокации до места нападения на перевозимый груз и т.д. Эти времена являются случайными величинами.

При оценке эффективности стационарного объекта время действий нарушителя и время действий сил охраны складываются из достаточно большого количества времен, причем все слагаемые вносят примерно равный вклад в их значения. В соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятности [11] можно принять, что случайные величины T_H и $T_{с.п.}$ распределены по нормальному закону. Но в задаче транспортирования специального груза на случайную величину времени действий сил поддержки большое влияние оказывает время движения сил поддержки от места дислокации до места нападения на перевозимый груз. Атака нарушителя происходит в заранее неопределенном месте. По этой причине, в зависимости от местоположения груза и мест дислокации сил поддержки время их движения является переменной величиной. Поэтому необходимо выяснить, какое значение принимает время действий сил поддержки в любой точке маршрута специального транспорта, а также вероятность выполнения условия $T_H - T_{с.п.} > 0$.

Большое влияние на величину $T_{с.п.}$ оказывает местоположение сил поддержки в зависимости от точки нападения нарушителя. На рис. 1, в качестве примера, представлена характерная зависимость времени движения сил поддержки от местоположения специального транспорта на маршруте. В зависимости от $T_{с.п.}$ груз будет наиболее уязвим в точках, наиболее удаленных от мест дислокации сил поддержки.

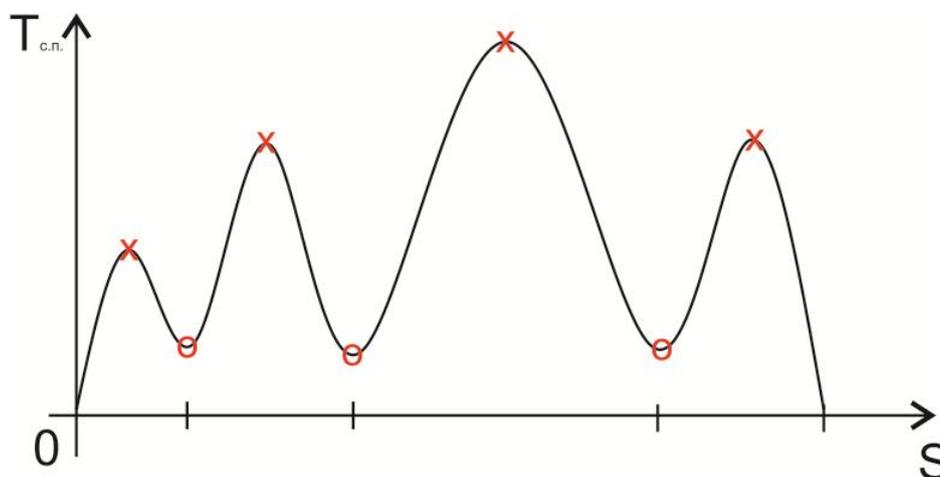


Рис. 1. Зависимость время действий сил поддержки от местоположения специального транспорта на маршруте:

X – наиболее удаленные точки на маршруте от мест дислокации сил поддержки.

O – точки на маршруте, ближайшие к местам дислокации сил поддержки.

Таким образом, предлагаемый подход к оценке эффективности физической защиты транспортируемых ядерных материалов сводится к следующим этапам:

- определение места вероятного нападения на специальный транспорт (например, автотранспорт), перевозящие ЯМ и/или РВ (удаленные от сил поддержки места на маршруте, места со сложной обстановкой для организации противодействия нападению нарушителей и т.п.);
- проведение моделирования боестолкновения сил охраны, сопровождающих специальный груз, и нарушителей (например, с использованием программы «Полигон»);
- определение приоритетов для совершенствования физической защиты специального груза.

Разработка указанной методики позволит обосновать направления совершенствования организационных и инженерно-технических мероприятий по физической защите транспортируемых ЯМ и РВ.

Более подробное рассмотрение вопросов, разработка конкретных методик анализа, в том числе с учетом определения необходимых исходных данных, оценки точности и достоверности полученных результатов, будет представлено в следующих работах.

Список литературы

1. Конвенция о физической защите ядерных материалов и ядерных установок (с учетом поправки от 2005 г.), МАГАТЭ INFCIRC/274, ратифицированная странами-участницами 8 мая 2016 г.
2. Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/rev.5), МАГАТЭ, 2013 г.
3. Федеральный закон об использовании атомной энергии, № 170-ФЗ от 20 октября 1995 г. (с дополнениями и изменениями).
4. «Правила физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов», утв. постановлением Правительства РФ от 19.07.2007 г. № 456 (в редакции 2018 г.).
5. Бондарев П.В., Измайлов А.В., Толстой А.И. Физическая защита ядерных объектов. – М.: НИЯУ «МИФИ» (учебное пособие), 2008 г.
6. Давыдов Ю.Л. Комплексные системы безопасного транспортирования радиоактивных материалов // Состояние и развитие систем физзащиты. Сборник научных трудов М.: ПРО-практик, 2013. № 4. С.51-64.
7. Давыдов Ю.Л. Нормативная база для безопасного транспортирования специальных грузов // Технологии и средства связи. 2007. №2. С.104-105.
8. Гарсиа М. Проектирование и оценка систем физической защиты. – М.: Мир: ООО «Издательство АСТ», 2002.
9. Измайлов А.В. Методы проектирования и анализа эффективности систем физической защиты ядерных материалов и установок. – М.: МИФИ, 2002.
10. Программный продукт «ПОЛИГОН» /АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон». URL: <https://www.eleron.ru/production/special-programs/poligon>, дата обращения 24.11.2020.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей : учебник. – 12-е изд., стер.- Москва : ЮСТИЦИЯ, 2018. – 658 с.

УДК 004.056

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Акимов Н.Н., Кольцов В.А., Павлин А.Ю.

Филиал федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

(Нижний Новгород, Российская Федерация)

Аннотация. Работа посвящена описанию системы поддержки принятия решений при обеспечении кибербезопасности системы верхнего уровня автоматизированной системы управления технологическими процессами атомной электростанции (СВУ АСУ ТП АЭС). Алгоритм поддержки принятия решений позволяет найти и ранжировать предпочтительные конфигурации средств защиты информации.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, кибербезопасность, АСУ ТП, система верхнего уровня, АЭС.

INFORMATION SYSTEM FOR DECISION SUPPORT IN ENSURING THE CYBERSECURITY OF UPPER-LEVEL SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANTS

Nikolay N. Akimov, Vyacheslav A. Koltsov, Artem J. Pavlin

Branch of Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics” “Research Institute of Measuring systems named after Yu.Ye. Sedakov”

(Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. The work is devoted to the description of the decision support system for ensuring the cybersecurity of the upper level system of the automated control system for technological processes of a nuclear power plants (ULS APCS NPP). The decision support algorithm allows you to find and rank the preferred configurations of information security.

Keywords: decision support, cybersecurity, APCS, upper-level system, NPP.

Введение

В настоящее время в атомной энергетике предъявляются высокие требования по кибербезопасности систем верхнего уровня (СВУ) автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомной электростанции (АЭС). Обеспечение кибербезопасности СВУ АСУ ТП АЭС регламентируется обширной международной и национальной (российской) нормативной базой [1,2]. Основными нормативными документами являются приказы ФСТЭК и стандарты международной электротехнической комиссии:

- приказ ФСТЭК России № 31 от 14.03.2014 «Об утверждении требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды»;
- приказ ФСТЭК России № 235 от 21.12.2017 «Об утверждении Требований к созданию системы безопасности значимых объектов КИИ РФ и обеспечение их функционирования»;
- приказ ФСТЭК России № 239 от 25.12.2017 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов КИИ РФ»;
- IEC 62645:2014 Nuclear power plants - Instrumentation and control systems - Requirements for security programmes for computer-based systems.

Информационная система поддержки принятия решений разработчиком при обеспечении кибербезопасности СВУ

Техническое задание на проектирование СВУ включает требования по обеспечению кибербезопасности в соответствии с одним или несколькими нормативными документами,

классом защищенности автоматизированной системы управления, которые определяют совокупность мер, составляющих искомую конфигурацию средств защиты [3]. Контекстная диаграмма А0 прототипа системы поддержки принятия решений приведена на рис. 1.

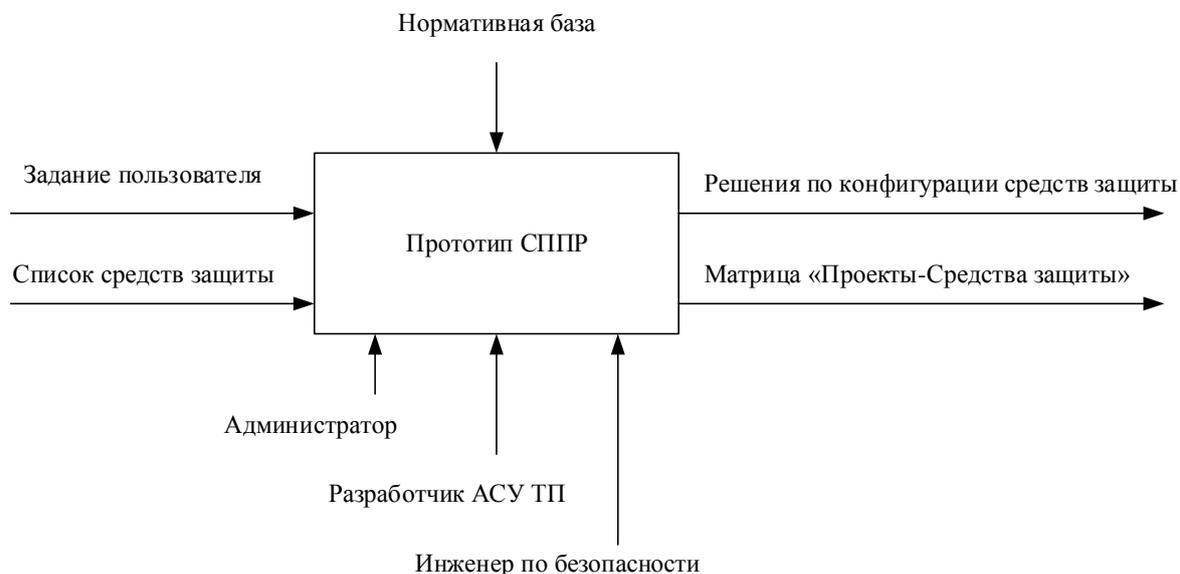


Рис.1. Контекстная диаграмма А0 прототипа системы поддержки принятия решений

Проектирование с учетом обеспечения кибербезопасности СВУ АСУ ТП АЭС заключается в выборе совокупности средств защиты, покрывающих все меры, определенные нормативным документом. Для поддержки жизненного цикла проектирования информационно-управляющих систем [4] и автоматизации процесса определения конфигурации средств защиты информации выполняется разработка системы поддержки принятия решений (СППР). Основу СППР составляют алгоритмы, позволяющие формализовать показатели качества конфигураций средств защиты.

Функции, выполняемые СППР:

- формализация мер безопасности согласно нормативной документации;
- формирование и ведение реестра средств защиты;
- формирование и ведение реестра подтверждающих документов;
- формирование и ведение реестра проектов;
- автоматизация процесса покрытия мер безопасности средствами защиты;
- расчет оптимальной конфигурации покрытия средствами защиты мер безопасности (по стоимости и защищенности);
- формирование отчетной документации.

В СППР реализованы несколько ролей пользователей для обеспечения разграничения прав:

- администратор (управление учетными записями пользователей);
- руководитель проектов (осуществляет верификацию и валидацию проектов);
- инженер по безопасности (ввод мер по обеспечению безопасности и средств защиты);
- инженер-разработчик АСУ ТП (создание и редактирование сведений о проекте, определение состава средств защиты конфигураций и автоматизированный выбор их конфигураций).

Структура СППР приведена на рис. 2.

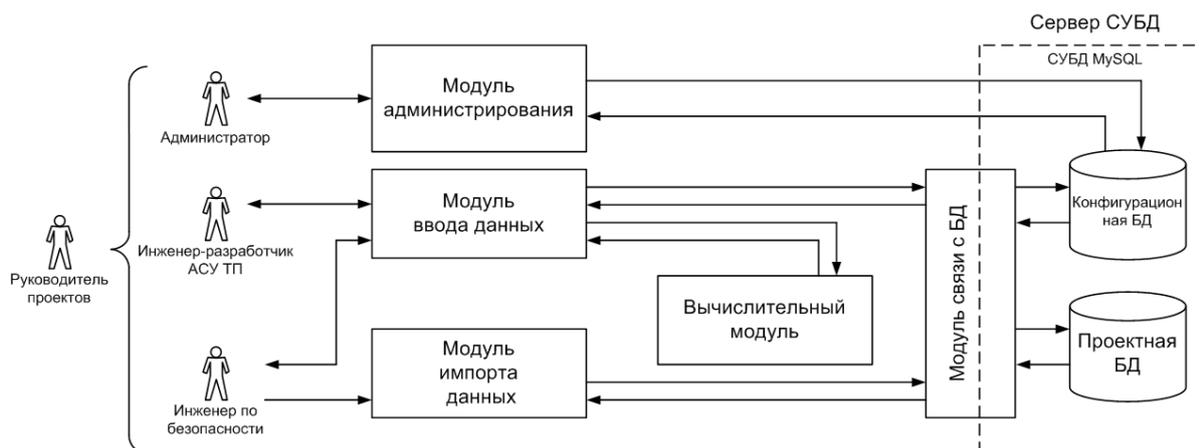


Рис.2. Структура СППР

Множество допустимых конфигураций средств защиты составляют те меры, которые обеспечивают защищенность объекта защиты. Условие защищенности является выполненным при наличии в k -й конфигурации средства защиты для каждой меры. Некоторую k -ю конфигурацию средств защиты определим, как вектор

$$v_k = [v_{1k}, v_{2k}, \dots, v_{Nk}]^T \quad (1)$$

с компонентами $v_{nk} = \begin{cases} 1, & \text{если средство } n \text{ используется в } k\text{-й конфигурации;} \\ 0, & \text{если средство } n \text{ не используется } k\text{-й конфигурации,} \end{cases}$

где T – транспонирование вектора;

$n = \overline{1, N}$ – средства защиты.

Тогда стоимость совокупности средств защиты, соответствующих k -й конфигурации определяется выражением

$$C_k = \sum_{n=1}^N v_{nk} c_n = c^T v_k, \quad (2)$$

где $c_n = [c_1, c_2, \dots, c_N]^T$ – вектор стоимостей средств защиты;

T – транспонирование вектора.

Условие защищенности является выполненным при наличии в k -й конфигурации средства защиты для каждой меры. Для проверки условия защищенности введем вектор

$$a_{mk} = D v_k, \quad (3)$$

где a_{mk} – вектор средств защиты для каждой меры;

D – количество средств защиты.

компоненты которого равны количеству средств, покрывающих соответствующие меры.

Компоненты вектора

$$a_{mk} = [a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{Mk}]^T, \quad (4)$$

где $m = \overline{1, M}$;

T – транспонирование вектора.

равны количеству средств, покрывающих соответствующие меры.

Условие защищенности выполняется (защищенность обеспечена), если для k -й конфигурации средств защиты

$$a_{mk} \geq 1, m = \overline{1, M}. \quad (5)$$

Представим условие защищенности в виде

$$s_k \geq 1, \quad (6)$$

где

$$s_k = \min_{m=\overline{1, M}} a_{mk} \quad (7)$$

Условие защищенности будет выполняться в случае, когда все компоненты вектора

$$a_{mk} = 1, m = \overline{1, M} \quad (8)$$

При этом каждая мера покрывается одним средством, что является достаточным для обеспечения защищенности. Если условие защищенности не выполняется, то конфигурация является недопустимой. Однако на практике ряд мер могут быть покрыты несколькими средствами, что приводит к избыточности полученного решения.

Задача поиска допустимых конфигураций средств, обеспечивающих защищенность объекта защиты, может быть представлена, как задача о нахождении столбцового покрытия булевой матрицы. Эта задача заключается в поиске множества столбцов, покрывающих все строки матрицы D «меры-средства». Говорят [4], что m -я строка покрывается n -м столбцом, если в m -й строке n -ого столбца стоит единица, т.е. $d_{mn} = 1$. Соответственно m -я мера покрывается n -м средством защиты. Обычно при решении задачи о покрытии булевых матриц требуется найти наименьшее столбцовое покрытие, т.е. наименьшее количество столбцов матрицы D , покрывающих все строки.

Дальнейшее развитие СППР основано на учете экспертных оценок результативностей применения средств защиты. Эти оценки определяются на основе сведений, полученных в результате удачного или неудачного применения средств защиты на эксплуатируемых АЭС. Характеристика результативности применения средства защиты определена в виде порядковой переменной, принимающей следующие значения:

- A – средство применялось успешно;
- B – средство ранее не применялось (новое средств
- C – средство применялось и были выявлены недочеты;
- D – средство снято с производства;
- E – средство не рекомендовано к применению.

Очевидно, что предпочтительными являются конфигурации, в которых как можно больше средств защиты находятся в состоянии A (средство применялось успешно) и небольшая часть в состояниях B и/или C .

Алгоритм выбора конфигураций средств защиты приведен на рис. 3.

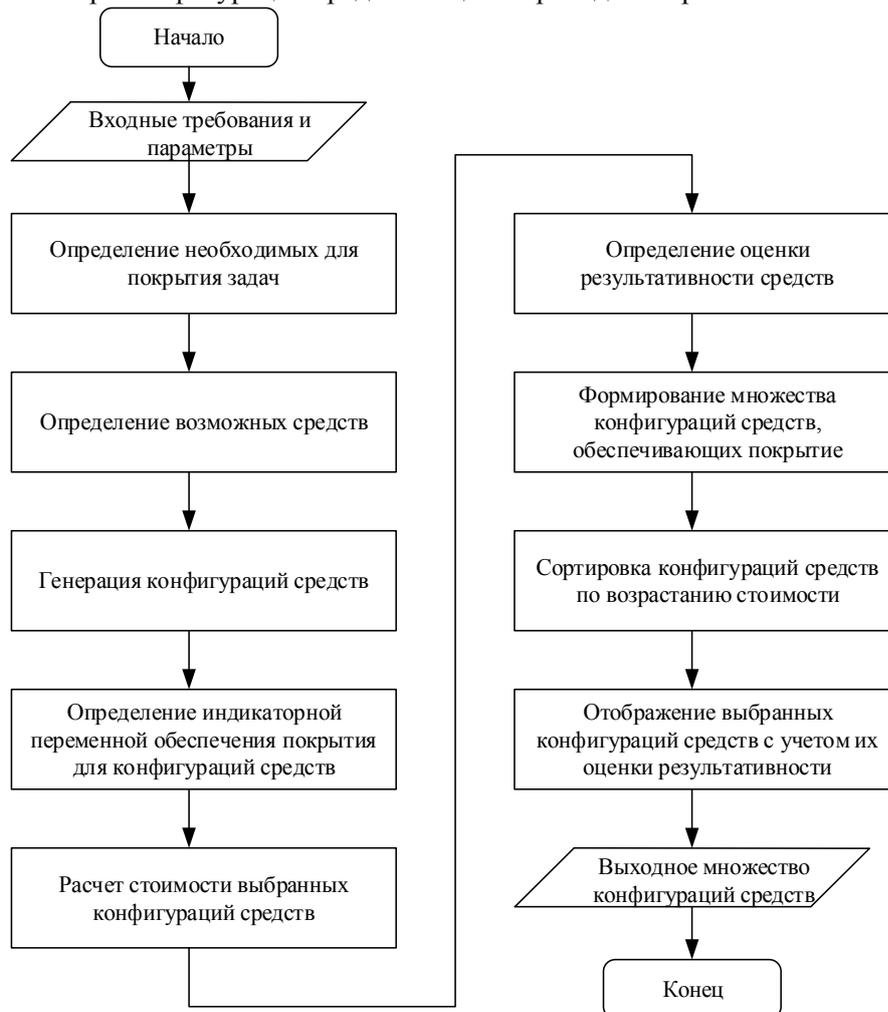


Рис.3. Алгоритм выбора конфигураций средств защиты

Для поиска оптимального решения можно применить варианты алгоритма ограниченного перебора. В качестве базового алгоритма предлагается использовать, разработанный в [5] алгоритм, в процессе функционирования которого формируется дерево перебора покрытий. Комбинирование этого алгоритма с методом ветвей и границ может составить основу для СППР при обеспечении кибербезопасности СВУ АСУ ТП АЭС.

Заключение

В результате разработана СППР с возможностью выбора конфигураций средств защиты, обеспечивающих кибербезопасность СВУ АСУ ТП АЭС. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение СППР, которое позволяет помочь разработчику СВУ покрыть все требуемые меры безопасности, обозначенные в нормативной документации, необходимыми средствами защиты при минимальной стоимости или максимальной защищенности. Автоматизация процесса покрытия мер безопасности способствует сокращению сроков реализации проектов, минимизации ошибок при выборе средств защиты, а также повышению информированности при формировании отчетов.

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Акимов Н.Н., Кольцов В.А., Аспекты обеспечения кибербезопасности АСУ ТП АЭС // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 8. С. 7-13.
2. Акимов Н.Н., Милов В.Р., Егоров Ю.С. Элементы концептуальной модели обеспечения кибербезопасности критически важных промышленных объектов // Материалы XXIV Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ – 2018). – Н. Новгород: НГТУ, 2018. С. 463-467.
3. Акимов Н.Н., Кольцов В.А., Павлин А.Ю., Милов В.Р., Кирбенева А.Ю. Математическая модель системы поддержки принятия решений при обеспечении кибербезопасности СВУ АСУ ТП АЭС // Сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (ИСТ – 2020). – Н. Новгород: НГТУ, 2020. С. 36-40. Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем / Под ред. В.Р. Милова, В.Г. Баранова. – М.: Радиотехника, 2016. – 216 с.
4. Леончик П.В. Алгоритм поиска покрытия разреженных булевых матриц // Информатика. 2007. №2. С. 53-61.

УДК 621.039

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ
ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ
КОНДУКТОМЕТРИИ**

КОНОВАЛОВ И.А., БАРИНОВ А.А., ЧЕСНОКОВ А.А., ХРОБОСТОВ А.Е., МАКАРОВ М.А.
*Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)*

Аннотация. В работе представлены результаты серии экспериментальных исследований с целью определения масштабов турбулентности на основе данных, получаемых с помощью трассерных методов измерений на примере использования кондуктометрической измерительной системы. Изложенная методика обработки экспериментальных данных позволила получить оценки частотных и пространственных масштабов турбулентности, дающих хорошее соответствие с теоретическими значениями. Результаты проделанной работы могут быть использованы при выборе валидационной метрики для расчетных моделей семейства LES.

Ключевые слова: пространственная кондуктометрия, турбулентность внутриреакторные потоки.

**STUDIES OF NUMERICAL ESTIMATE OF CHARACTERISTICS OF TURBULENCE OF
REACTOR FLOWS WITH APPLICATION OF MATRIX CONDUCTOMETRY METHOD**

I.A. KONOVALOV, A.A. BARINOV, A.A. CHESNOKOV,
A.E. KHROBOSTOV, M.A. MAKAROV
*Nizhny Novgorod State Technical University named R.E. Alekseev
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)*

Abstract. In this paper results of series of experimental studies aim to determining turbulence scales based on data, obtained by tracer measurement methods on the example of application of conductometry measurement system are shown. Presented methodology of experimental data processing provided to obtain spatial and frequency scales of turbulence, which are correspond to their theoretical values. Results of this work may be used with choose of validation metrics for LES models

Keywords: spatial conductometry, turbulence, reactor flows.

Актуальной задачей для современной атомной энергетики является обеспечение безопасности и эффективности эксплуатации инновационных ядерных энергетических установок (ЯЭУ), что влечет за собой необходимость разработки новых систем безопасности, основанных на пассивных принципах действия. При этом, в эксплуатационных и, в особенности, аварийных режимах работы реакторной установки нестационарность протекающих гидродинамических и тепловых процессов может оказывать существенное влияние на состояние элементов ЯЭУ [1]. Учет данной особенности не всегда возможен стандартными средствами вычислительной гидродинамики, однако решением данной проблемы может стать применение LES моделей турбулентности, получающих все более широкое распространение в последние годы. Тем не менее, применительно к вопросам обеспечения безопасности ЯЭУ, использование LES метода невозможно без проведения валидации и верификации на широком спектре экспериментальных работ.

В исследовательской практике для изучения характеристик турбулентных потоков широкое распространение получили трассерные методы измерений. Основное требование таких методов – наличие некоторой пассивной скалярной функции, конвективной переносимой вместе с текущей средой. При этом измерительной системой регистрируются пульсации переносимой с потоком скалярной величины.

Для проведения исследований была использована кондуктометрическая измерительная система: пространственные кондуктометрические датчики сетчатой конструкции [2] и измерительный комплекс ЛАД-36 [3]. В качестве примеси использовалась незначительная концентрация раствора соли (NaCl или Na₂SO₄). Исследования проводились в экспериментальной модели (рис. 1), представляющей собой канал квадратного сечения 50x50 мм, в котором происходит смешение спутных потоков с различными удельными проводимостями, создаваемыми примесью.

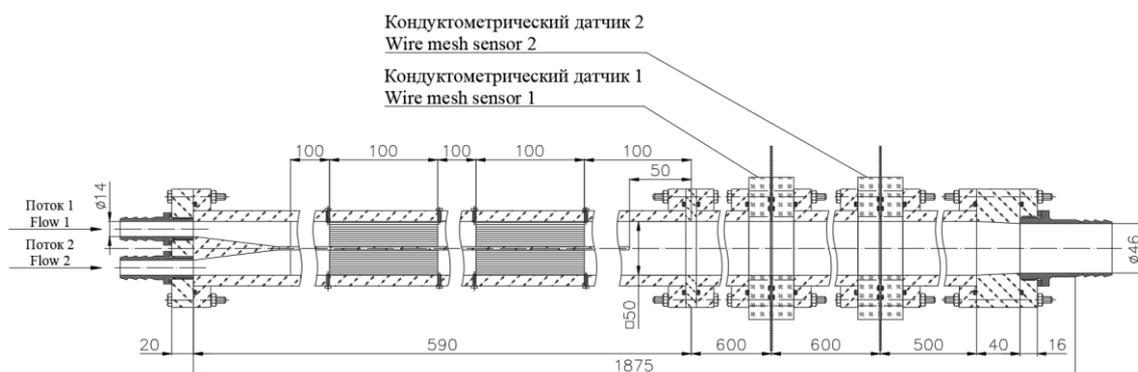


Рис. 1. Экспериментальная модель

В результате обработки экспериментальных данных были получены спектральные оценки плотности мощности пульсаций концентрации, автокорреляционные функции измерительного сигнала, гистограммы распределения плотности вероятности пульсаций проводимости в зоне смешения, которые использовались при дальнейшей оценке масштабов турбулентности.

В работе представлены результаты серии экспериментов, изложен порядок проведения исследований на лабораторном стенде, проведена обработка сигналов пространственных датчиков, а также изложена методика оценки макро и микромасштабов турбулентных структур в потоке. Полученные оценки пространственных и временных масштабов согласуются по порядку со значениями, рассчитанными теоретически [4] (табл.).

Таблица. Теоретические и экспериментальные значения частот основных энергонесущих вихрей

Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$	Характерная частота основных энергонесущих вихрей f_E , Гц	Оценка характерной частоты по критерию Струхаля $Sh \approx 0,2$, Гц
19,0	0,55	0,88
24,4	1,02	1,04
28,4	1,03	1,20

Результаты работы могут быть в дальнейшем использованы при выборе валидационной метрики для расчетных моделей семейства LES.

Список литературы

1. Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов // Атомная энергия, Т. 120, №. 5, Май 2016. С. 270-276.
2. Prasser H.M., Bottger A., Zschau J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid // Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 9, 1998. pp. 111-119.
3. Баринов А.А., Варенцов В., Главный В.Г., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Рязанов А.В., Хробостов А.Е. Внедрение метода пространственной кондуктометрии для экспериментального изучения процессов смешения внутриреакторных потоков в современных ЯЭУ // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Т. 117, N. 2, 2017. С. 35-41.
4. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. - 143 с

УДК 656.1

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В
ТРАНСФОРМАТОРЕ И ОБУЧЕНИЕ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

ГРОМЫКО И. Л., ГАЛУШКО В. Н.

Белорусский государственный университет транспорта,
(Гомель, Республика Беларусь)

Аннотация. Рассмотрены методы диагностики различных дефектов трансформатора и способ их классификации с помощью свёрточных нейронных сетей. Применение данных нейронных сетей позволит в режиме реального времени анализировать информацию, классифицировать различные отклонения и диагностировать дефекты. В работе приводится анализ информации для классификации таких повреждений как межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания, дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

Ключевые слова: межвитковое замыкание, трансформатор, нейронная сеть, старение изоляции

**DIAGNOSIS OF INTER-ROLLER CIRCUITS IN THE TRANSFORMER AND
TRAINING OF CONVENTIONAL NEURAL NETWORKS**

HRAMYKA I. L., GALUSHKO V. N.

Belarusian State University of Transport,
(Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Methods for diagnosing various defects of a transformer and a method for their classification using convolutional neural networks are considered. The use of these neural networks will allow in real time to analyze information, classify various deviations and diagnose defects. The paper analyzes information for the classification of such damages as turn-to-turn short circuits, phase-to-phase short circuits, defects in the inter-sheet insulation of the magnetic circuit, local short-circuit of steel plates and "fire" in steel.

Keywords: turn-to-turn circuit, transformer, neural network, aging of insulation

Одним из наиболее распространенных следствий ухудшения свойств изоляции являются межвитковые замыкания. При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

Основными факторами, влияющими на возникновение межвитковых замыканий в трансформаторах, являются старение изоляции (механическое, тепловое, электрическое, механическое, химическое), перенапряжения (атмосферные, внутренние, дуговые) и организация производства и эксплуатации (заводские дефекты, эксплуатационные дефекты, дефекты при капитальном ремонте) [1].

Приведем краткий анализ наиболее распространенных повреждений силовых трансформаторов, возможные причины возникновения, традиционные способы выявления. Далее приведем результаты экспериментальных исследований по выбору диагностируемых параметров для обучения и дальнейшей работы нейронной сети.

В дальнейшем условно сгруппируем повреждения следующим образом:

1. Межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания;
2. Дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

При межвитковом замыкании изоляция обмотки нарушается и происходит ее пробой между витками, что впоследствии может привести к выходу из строя трансформатора.

Тепловой метод контроля позволяет, не выводя из работы трансформатор, быстро и безопасно для персонала выявить ненормальный режим работы оборудования. Однако для этого требуется наличие довольно дорогого оборудования – тепловизора или специального пирометра.

В журнале «Радио» [2] описан прибор, позволяющий определить короткозамкнутые витки в обмотках трансформаторов и дросселей. Описываемый прибор представляет собой генератор низких частот, собранный на двух транзисторах. Конструктивное выполнение схемы простое, что позволяет его собрать без больших материальных и временных затрат.

Недостатком данного пробника является отсутствие возможности однозначного определения вида неисправности обмотки. Также отсутствует возможность отличить межвитковое замыкание от обрыва цепи.

В 7 номере журнала «Радио» за 1990 год [3] представлена электрическая схема пробника для проверки обмотки трансформаторов и других катушек индуктивностью от 200 мкГн до 2 Гн. Данная схема ненамного сложнее предыдущей. Она дает возможность однозначно определить вид неисправности – обрыв цепи или короткое замыкание.

Изменение тока намагничивания, коэффициента мощности и потерь холостого хода, дополнительные потери короткого замыкания или отличие сопротивлений обмоток трансформатора свидетельствуют о возможном появлении межвиткового замыкания. Измерение этих величин предполагает отключение нагрузки трансформатора, что нежелательно с экономической точки зрения.

Таким образом, диагностика дефектов требует отключения трансформаторов, что представляется более затратным и менее оперативным. Поэтому применение датчиков соответствующих параметрам трансформатора для нейромодели позволит анализировать данные без отключения и указывать на ранней стадии наличие повреждений.

В силовых трансформаторах с масляным охлаждением межвитковое короткое замыкание (МКЗ) обнаруживается по выделению горючего газа в газовом реле и работе реле на сигнал или отключение. В сухих трансформаторах вопрос определения замыкания между витками обмоток актуален и может привести к unplanned выводу из строя трансформатора и отключению потребителей от системы электроснабжения.

В качестве объекта исследования использовались однофазные трансформаторы малой мощности с воздушным охлаждением. В ходе экспериментов при изменяющейся нагрузке трансформатора выполнялось межвитковое замыкание различного числа витков на одной фазе первичной и вторичной обмоток. Схема экспериментальной установки по исследованию МКЗ трансформатора представлена на рис. 1.

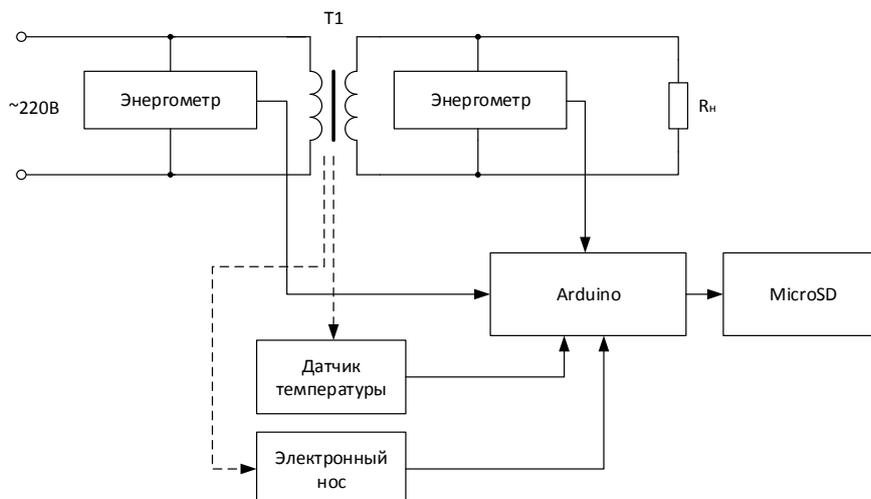


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию МКЗ трансформатора

Отслеживая в режиме реального времени возможные текущие сбои, можно снизить количество unplanned ремонтов и отказов указанного оборудования.

При проведении экспериментальных исследований были предусмотрены следующие мероприятия:

- МКЗ проводились в режиме реального времени на первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора с воздушным охлаждением;
- МКЗ выполнялось на двух-, пяти- и десяти витках;
- осуществлялась регистрация с помощью приборов и датчиков, внешний вид которых представлен на рис. 2.

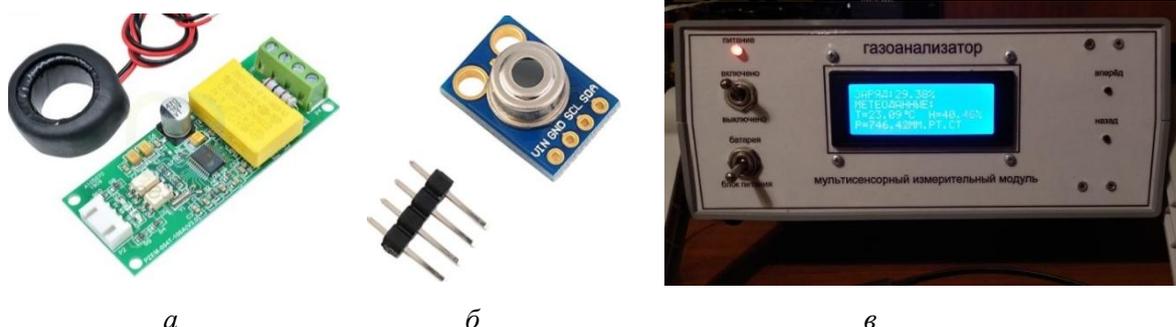


Рис. 2. Применяемое при эксперименте оборудование и приборы:
а – энергометр *PZEM*; *б* – датчик температуры *MLX90614ESF*; *в* – «электронный нос»

- В тоже время проводился анализ информации с использованием следующих данных:
- напряжений и токов первичной и вторичной обмоток;
 - активные, реактивные и полные мощности по высокой и низкой стороне трансформатора;
 - анализировался состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции с помощью устройства «электронный нос»;
 - измерялась температура в зоне КЗ и на удалении 5 см от обмоток;
 - проводилось осциллографирование и разложение по гармоникам кривых тока и напряжения;
 - выполнено более 500 измерений при нормальном режиме работы и при межвитковом замыкании с интервалом в 1 секунду при 7 различных активных и активно-индуктивных нагрузках;
 - получаемые результаты приборного учета (рисунок 3, 4, 5) через аналогово-цифровой преобразователь поступали на вход в программу *MATLAB* в качестве исходных данных для нейромодели с целью ее обучения и анализа информации;
 - с помощью *RLC*-метра определялись параметры обмоток трансформатора.

Нестабильность сетевого напряжения сильно влияет и на остальные параметры. Поэтому для минимизации данной нестабильности необходимо анализировать не каждый параметр по отдельности, а их отношения между первичной и вторичной обмотками, что несколько уменьшает зашумленность исходных данных приборного учета и позволяет более четко заметить МКЗ (рис. 6 и 7). В опыте межвиткового замыкания на первичной обмотке количество измерений намного меньше из-за очень быстрого роста температуры и как следствие опасности вывода из строя обмотки трансформатора, чем при межвитковом замыкании на вторичной обмотке и нормальной работе.

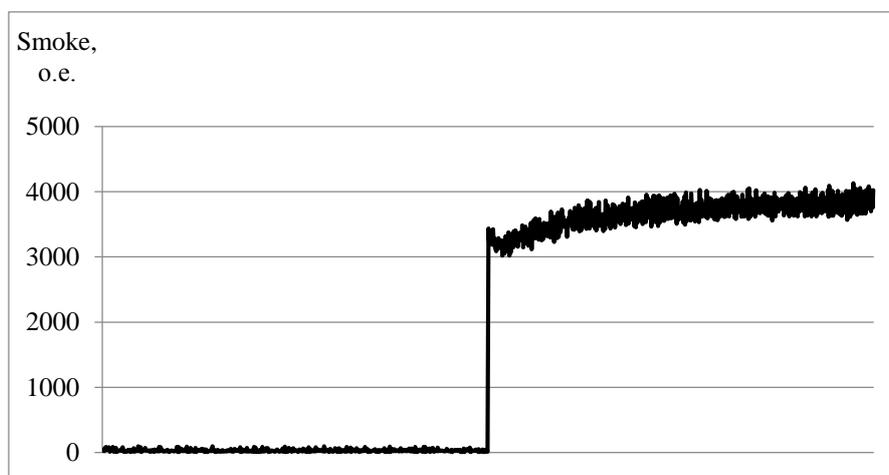


Рис. 3. График зависимости концентрации дыма при МКЗ



Рис. 4. График зависимости температуры при МКЗ



Рис. 5. График зависимости активной мощности при МКЗ



Рис. 6. График зависимости отношения напряжений при МКЗ

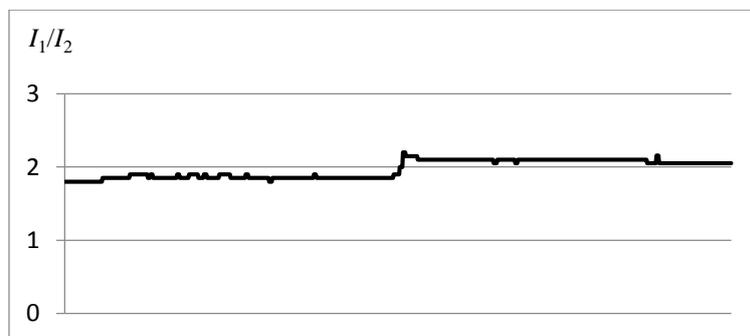


Рис. 7. График зависимости отношений токов при МКЗ

На основании графиков отношений напряжений при межвитковом замыкании в первичной или вторичной обмотках можно сделать вывод, на какой из обмоток произошло межвитковое замыкание.

При МКЗ регистрируется (*RLC*-метром) значимое снижение индуктивностей сразу первичной и вторичной обмоток, а также существенное увеличение активного сопротивления сердечника (из опыта холостого хода).

Отмечено, что в отличие от скачков сетевого напряжения график потребления активной мощности при МКЗ имеет сложный характер. Он содержит минимум три составляющие экспоненты, которые учитывают индуктивности обмоток и сердечника (рисунок 8).

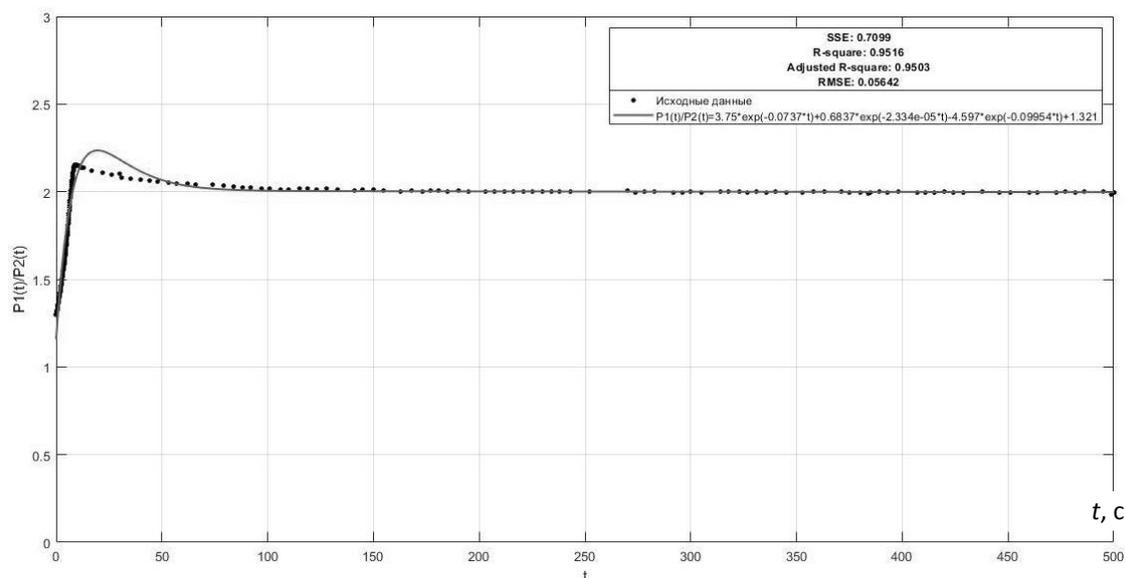


Рис. 8. Результаты статистического анализа в программе *Statistica* отношения P_1/P_2 при МКЗ

Таким образом, для однофазного трансформатора с воздушным охлаждением броневым или стержневым сердечником и классом изоляции обмоток *Y* и *A* установлено, что наиболее значимыми исходными данными для нейромодели являются следующие:

- температура на поверхности обмоток (при МКЗ средний градиент температуры в зоне МКЗ составил около $35^{\circ}\text{C}/\text{мин}$);
- отношение токов, напряжений и активных мощностей первичной и вторичной обмоток;
- состав окружающего воздуха на наличие частиц задымления от лака и бумажной изоляции.

Данные датчиков используются в качестве исходных данных для сверточных нейронных сетей. Самый популярный вариант их использования – это обработка и анализ изображений. В нашем случае они позволяют на основе информации, представленной в виде множества изменяющихся в реальном времени графиков (частично приведенных выше) анализировать данные. Такой вид использования данных позволяет установить множественные взаимосвязи между отдельными факторами и, применяя нормированные данные, использовать их для быстрой настройки к другим силовым трансформаторам.

На рис. 9 приведен результат обучения и применения свёрточных нейронных сетей, причем вероятность распознавания составила 99,9%.

```

Training on single CPU.
Initializing input data normalization.
=====
| Epoch | Iteration | Time Elapsed | Mini-batch | Mini-batch | Base Learning |
|       |          | (hh:mm:ss)  | Accuracy   | Loss       | Rate         |
=====
| 1     | 1       | 00:00:00    | 38.28%    | 1.0837    | 0.0100    |
| 9     | 50      | 00:00:19    | 100.00%   | 0.0054    | 0.0100    |
| 17    | 100     | 00:00:38    | 100.00%   | 0.0027    | 0.0100    |
| 25    | 150     | 00:00:58    | 100.00%   | 0.0009    | 0.0100    |
| 30    | 180     | 00:01:09    | 100.00%   | 0.0008    | 0.0100    |
=====
    
```

Рис. 9. Результаты обучения и применения свёрточных нейронных сетей

Научная новизна материала статьи заключается в практическом применении сверточных нейронных сетей, которые в режиме реального времени анализируют информацию, классифицируют различные отклонения и диагностируют определенный вид дефекта. Практическая значимость заключается в снижении неплановых отказов, заблаговременном предупреждении о развитии повреждения. В работе приводится анализ информации для классификации таких повреждений, как межвитковые замыкания, междуфазные короткие замыкания, дефекты межлистовой изоляции магнитопровода, местное замыкание пластин стали и «пожар» в стали.

Список литературы

1. Шерьязов, С.К. Классификация факторов, влияющих на витковые замыкания в трансформаторах напряжением 6-10/0,4 кВ/ С.К. Шерьязов, А.В. Пятков // Вестник КрасГАУ – 2014. – №7.
2. Кривонос, А.В. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дросселей/ А.В. Кривонос // Радио – 1968. – №4 – С.56.
3. Паздников, И.Л. Определение короткозамкнутых витков в обмотках трансформаторов и дросселей/ И.Л. Паздников // Радио – 1990. – №7 – С.68 – 69

УДК 004.6+534-16

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ АВАРИЙНО-ОПАСНОЙ СИТУАЦИИ НА ДЕТАНДЕРЕ

БРАНЦЕВИЧ П. Ю.

*Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”**(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Современные компьютерные или встраиваемые системы позволяют получать длинные (десяtkи минут, часы, сутки) реализации вибрационных сигналов, которые непрерывно отражают вибрационное состояние исследуемого механизма в разных режимах работы. Полученные большие объемы данных подвергаются быстрой автоматизированной обработке, для предоставления пользователю требуемой информации и формулировки выводов об изменении технического состояния контролируемого объекта. Сравняются разложение на периодическую и шумоподобную составляющие, полосовой спектральный анализ, вейвлет анализ, преобразование Гильберта-Хуанга, как способы первичного анализа исходных вибрационных сигналов, полученных при возникновении аварийно-опасной ситуации при работе детандер-генераторного агрегата (ДГА).

Ключевые слова: вибрация, сигнал, анализ, спектр, вейвлет, мода, преобразование.

ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS IN AN EMERGENCY SITUATION ON DETANDER

BRANCEVICH P.J.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. Modern computer or embedded systems make it possible to obtain long (tens of minutes, hours, days) realizations of vibration signals, which continuously reflect the vibration state of the investigated mechanism in different operating modes. The received large amounts of data are subject to rapid automated processing, to provide the user with the required information and formulate conclusions about changes in the technical state of the controlled object. The decomposition into periodic and noise-like components is compared, band spectral analysis, wavelet analysis, Hilbert-Huang transform, as methods of primary analysis of initial vibration signals, received when an emergency situation has arisen during the operation of the expander-generator unit (EGA).

Keywords: vibration, signal, analysis, spectrum, wavelet, mode, transformation

Введение

Для получения информации о вибрационном состоянии контролируемого оборудования и его анализа в настоящее время целесообразно применение измерительно-вычислительных комплексов и систем, систем распределённого сбора и централизованной обработки, позволяющих непрерывно отслеживать состояние объекта, фиксировать редкие и кратковременные аномальные ситуации, хранить большие объемы полученных данных, реализовывать разнообразные алгоритмы обработки и диагностирования. Вопросы построения таких систем для целей контроля общего уровня вибрации, её отдельных спектральных составляющих, вибрационных характеристик пусков и выбегов в определенной мере проработаны [1-5].

Одними из наиболее эффективных, являются многоканальные стационарные измерительные компьютерные комплексы или системы для непрерывного вибрационного контроля. Они получают информацию различного типа (СКЗ общего уровня, спектральные составляющие вибрации, фазовые вектора, гистограммы распределений и т. д.) при непрерывной работе и сохраняют длинные реализации полученных данных, а также выполняют функции предупредительной сигнализации и защиты. Такой режим работы обеспечивает комплексный контроль технического состояния объекта и позволяет обнаруживать даже редко происходящие аномальные ситуации, что способствует выявлению зарождающихся дефектов на самых ранних стадиях. Такие системы имеют относительно высокую стоимость. Однако целесообразность их применения несомненна на экономически важных и дорогих технических объектах [2-6].

Способы обработки вибрационных сигналов при анализе аварийной ситуации на ДГА

При эксплуатации сложных механизмов и агрегатов роторного типа с помощью штатных компьютерных измерительно-вычислительных комплексов решаются задачи текущего вибрационного контроля, мониторинга и защиты [2,6]. Рассмотрим ситуацию изменения вибрационного состояния детандер-генераторного агрегата (ДГА) при изменении режимов его эксплуатации. ДГА состоит из генератора (4 точки контроля, вертикальные и горизонтальные направления вибрации подшипниковых опор); редуктора, осуществляющего понижение частоты вращения вала с 9600 мин⁻¹ (160 Гц) до 3000 мин⁻¹ (50 Гц) (3 точки контроля); турбодетандера (турбины), функционирующей на основе использования энергии перепада давления природного газа, при его дросселировании перед сжиганием (3 точки контроля). Частота вращения вала турбины 9600 мин⁻¹ (160 Гц).

Во время эксплуатации ДГА в определенных режимах его работы штатной системой вибрационного контроля [6] были зафиксированы факты скачкообразного изменения среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости вертикального направления турбодетандера (рис. 1). Периодичность опроса каждого датчика вибрации 2 секунды.



Рис. 1. Изменение СКЗ виброскорости в точках контроля при работе ДГА. Скачки СКЗ виброскорости для точки вертикального направления контроля вибрации турбины

Для выяснения причин возникновения такой ситуации зарегистрирован, а затем проведен анализ непрерывного вибрационного сигнала [7], возбуждаемого на корпусе турбодетандера во время аварийно-опасных ситуаций. Обработка полученного сигнала выполнена разными способами: усреднение во временной области [8]; вейвлет анализ [9,10]; разложение на периодическую и шумоподобную составляющие [11,12]; полосовой спектральный анализ [13]; преобразование Гильберта-Хуанга [14].

На рис. 2 представлен вибрационный сигнал в единицах виброускорения для вертикального направления турбины ДГА в нормальном и аварийно-опасном режимах работы. Опытный специалист в области вибрации может заметить некоторые изменения формы сигнала, однако, такие параметры как СКЗ, пик-фактор, эксцесс, асимптота (рис. 3) не претерпели существенных изменений. Однако на амплитудных и полосовых спектрах (шаг 50 Гц) заметны существенные отличия, обусловленные появлением низкочастотной составляющей (рис. 4,5).

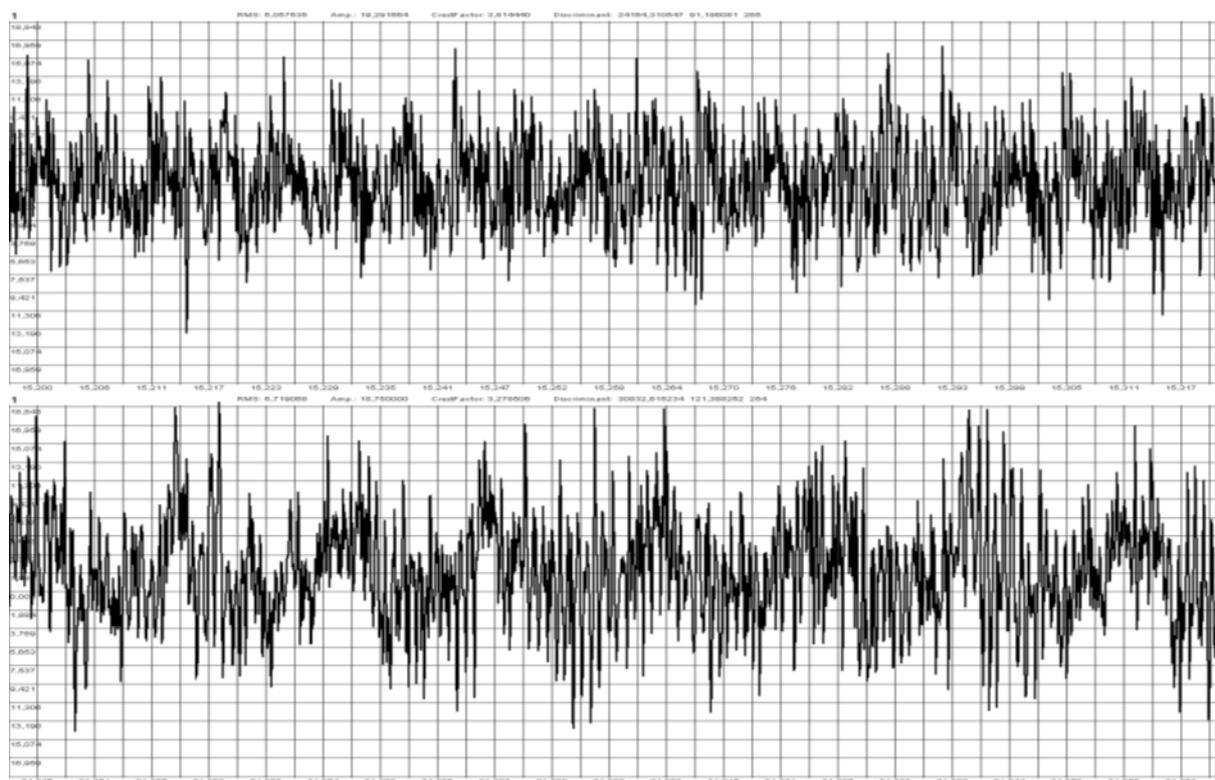


Рис. 2. Вибрационный сигнал (m/c^2) в точке контроля вертикального направления турбины ДГА для нормального и аварийно-опасного режимов работы (ось абсцисс – время в секундах)

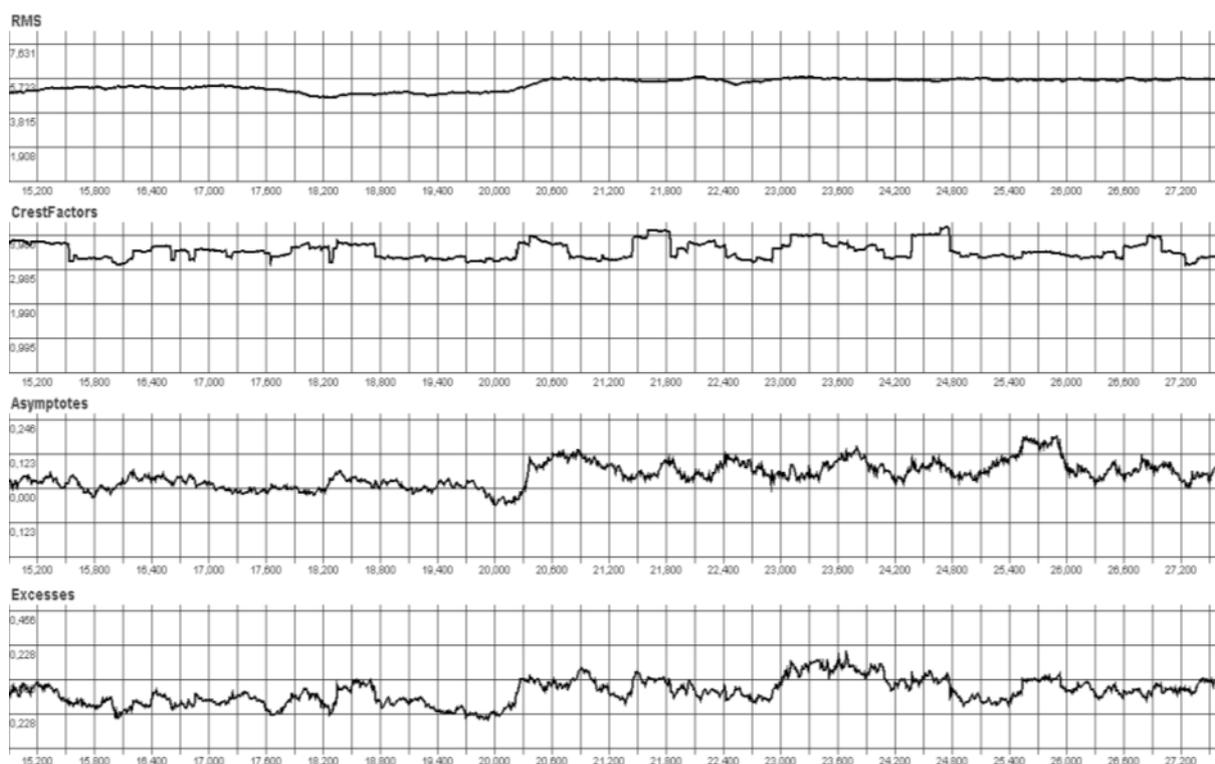


Рис. 3. Временные тренды параметров (СКЗ, пик-фактор, асимптота, эксцесс) исследуемого вибросигнала (m/c^2) в точке контроля вертикального направления турбины при переходе ДГА из нормального в аварийно-опасный режим работы (ось абсцисс – время в секундах)

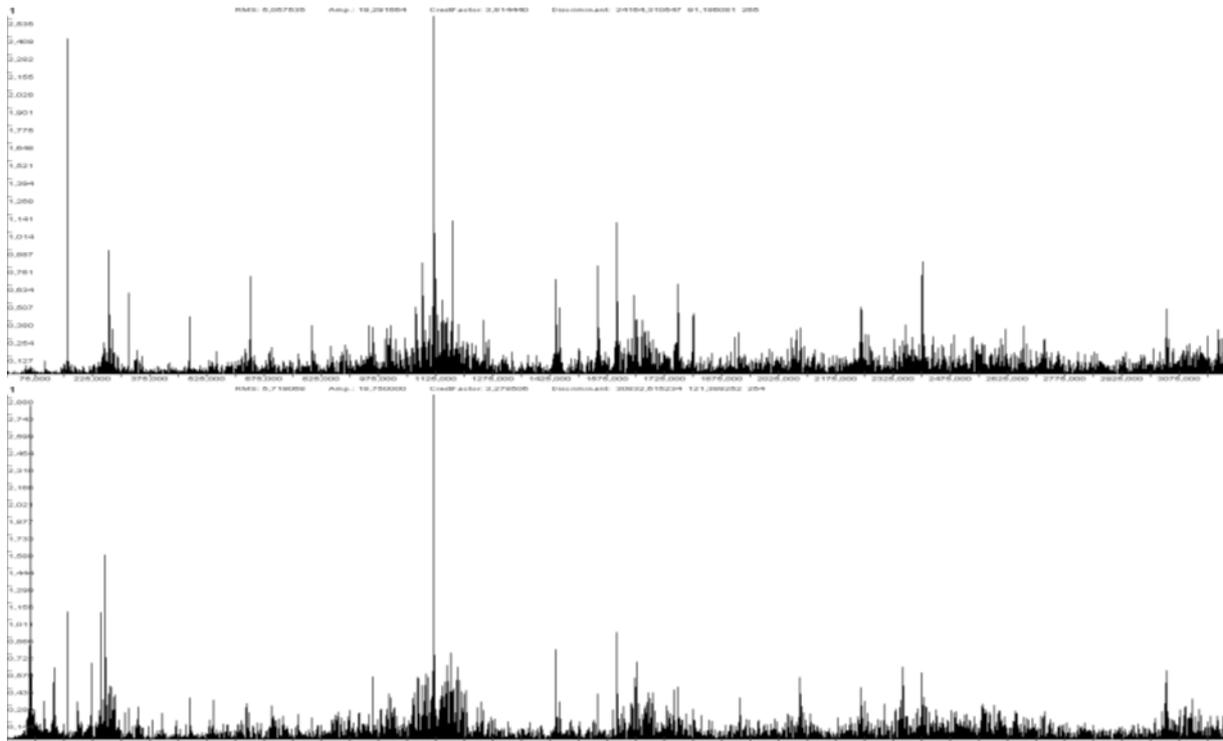


Рис. 4. Амплитудные спектры вибрационного сигнала в единицах виброускорения (m/s^2) в точке контроля вертикального направления турбины ДГА для нормального (верхний график) и аварийно-опасного (нижний график) режимов работы (ось абсцисс – частота в Гц)

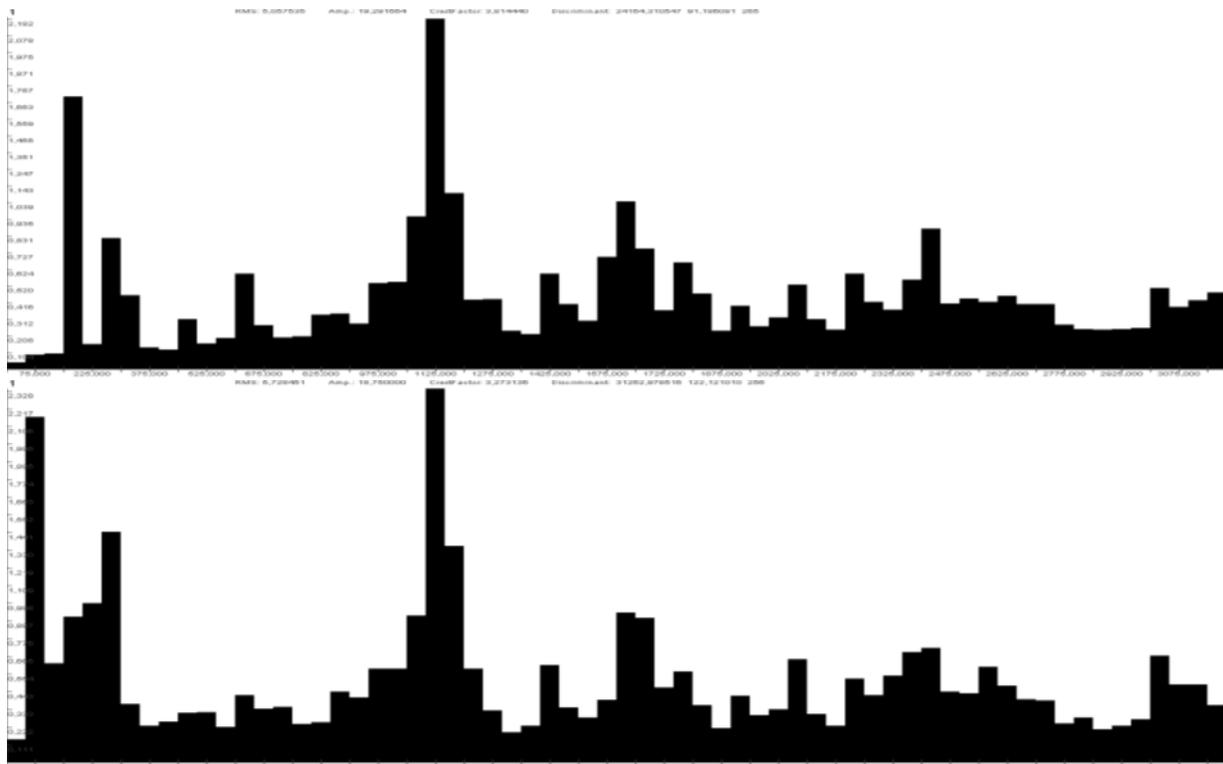


Рис. 5. Полосовые амплитудные спектры вибрационного сигнала (СКЗ) в единицах виброускорения (m/s^2) в точке контроля вертикального направления турбины ДГА для нормального (верхний график) и аварийно-опасного (нижний график) режимов работы (ось абсцисс – частота в Гц)

Динамика изменения параметров вибрации хорошо отслеживается на временных трендах СКЗ в частотных полосах полосового спектра (шаг 50 Гц) и амплитуд частотных составляющих, кратных 160 Гц (рис. 6). Изменение вибрационного сигнала начинается (момент 17.6 сек.) с уменьшения амплитуды спектральной составляющей 160 Гц (нижний график) и, соответственно, СКЗ в частотной полосе 150-200 Гц (верхний график). Затем (момент 20 сек.) наблюдается быстрое нарастание СКЗ в частотной полосе 50-100 Гц и амплитуды спектральной составляющей 62 Гц (рис. 7).

Также интересен и способ разложения вибросигнала на модовые компоненты преобразования Гильберта-Хуанга (рис. 8). Сравнение полученных мод, показывает, что СКЗ четвертой моды для аварийно-опасной ситуации (2.0 м/с^2) в четыре раза больше, чем СКЗ четвертой моды для нормального режима работы турбины (0.49 м/с^2).

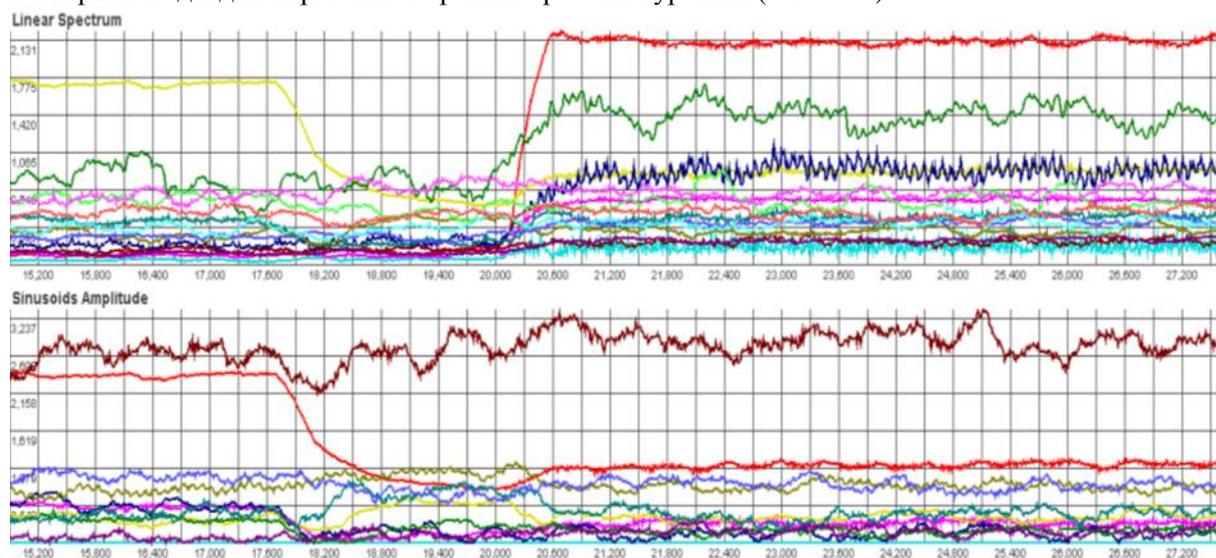


Рис. 6. Временные тренды СКЗ отдельных полос полосового спектра (верхний график) и амплитуд спектральных составляющих, кратных 160 Гц (нижний график), в точке контроля вертикального направления турбины при переходе ДГА из нормального в аварийно-опасный режим работы

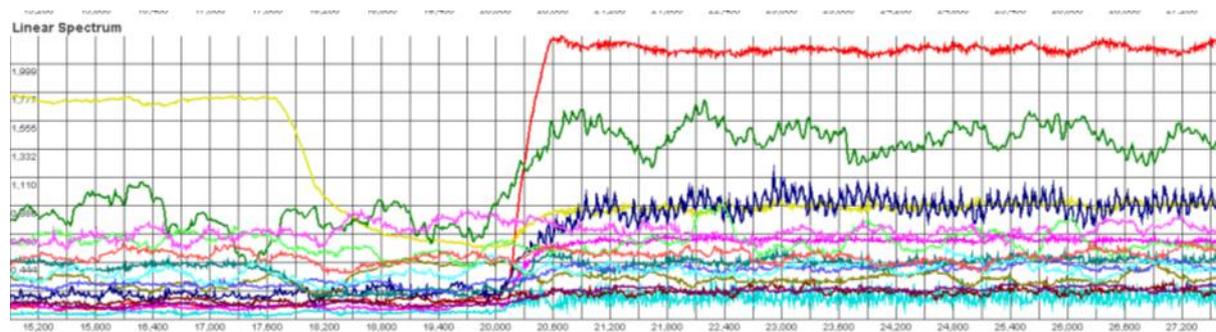


Рис. 7. Временные тренды амплитуд спектральных составляющих, кратных 62 Гц (м/с^2), в точке контроля вертикального направления турбины при переходе ДГА из нормального в аварийно-опасный режим работы (ось абсцисс – время)

Заключение

Представленный способ позволяет разделять вибросигнал на спектральные составляющие, периодическую и шумоподобную составляющие, моды преобразования Гильберта-Хуанга, компоненты вейвлет преобразований, а затем исследовать разные составляющие вибросигналов, отражающих вибрационное состояние механизмов с вращательным движением, выявлять аномальные состояния и динамику их изменения. Так для рассмотренной ситуации изменение состояния ДГА происходит примерно за 0.2 с. Такие

данные являются исходными для определения скорости реакции систем контроля и защиты на аварийно-опасные ситуации.

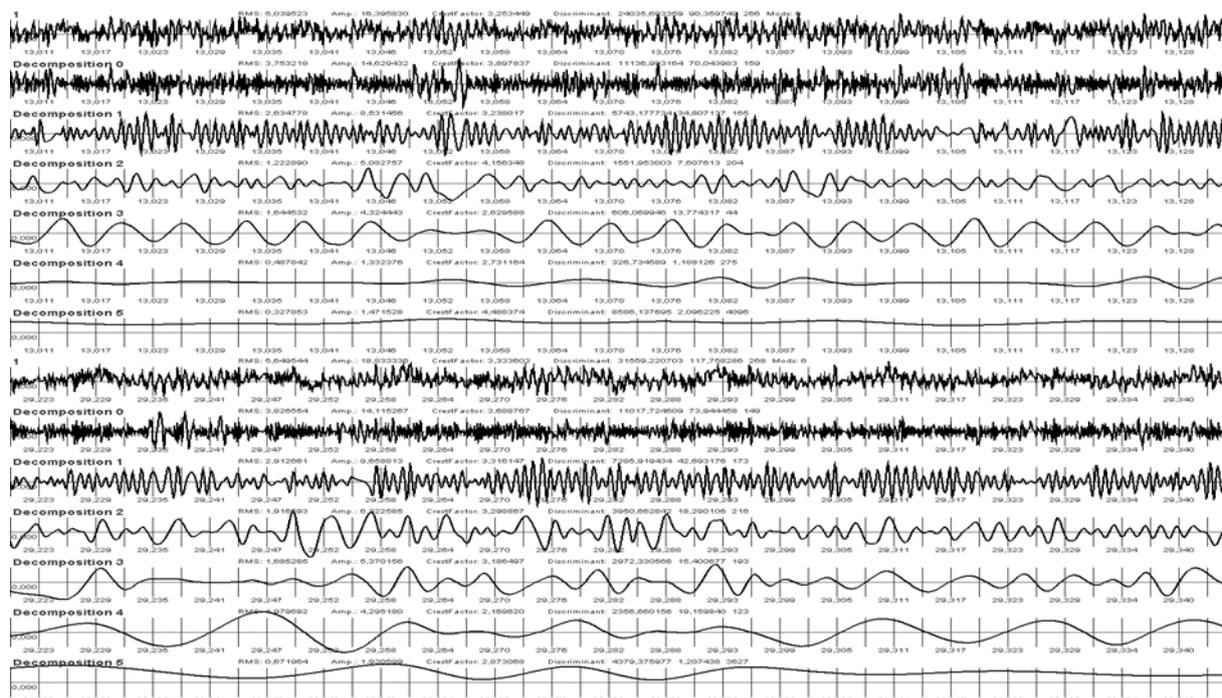


Рис. 8. Модовая декомпозиция вибрационного сигнала для нормального (верхний график) и аварийно-опасного (нижний график) состояния ДГА (ось абсцисс - время в секундах)

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. Bently D. E., Hatch C. N., Grissom B. Fundamentals of Rotating Machinery. – Canada: Bently pressurized bearing company, 2002. – 726 pp.
3. Brancevich P., Miao X., Li Y. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system. Proceedings of the 20th *International Congress on Sound and Vibration*. Bangkok, Thailand. 7-11 July, 2013.
4. Бранцевич П.Ю. Применение вибрационных характеристик выбега для оценки технического состояния турбоагрегатов. *Энергетика и ТЭК*, № 12 (81), 2009, с. 20-23.
5. Бранцевич П. Ю. Оценка технического состояния механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов. – Минск: Четыре четверти, 2021. – 236 с.
6. Бранцевич П. Ю. ИВК «Лукомль-2001» для вибрационного контроля. *Энергетика и ТЭК*. – 2008. – № 12 (69). – С. 19–21.
7. Бранцевич П. Ю., Базылев Е.Н. Большие данные в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики. *Неразрушающий контроль и диагностика*. – 2016. – № 3. – С. 28–41.
8. Бранцевич П. Ю., Гузов В.А. Применение усреднения во временной области и вейвлет-анализа для исследования вибрационных сигналов. *Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: сб. докладов*. – М.: ВТИ. – 2007. – С. 58–66.
9. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 628 с.
10. Brancevich P., Li Y. Assessment of mechanism vibration condition based on the intensity of vibration in the wavelet allocated frequency bands. Proceedings of the 22-nd *International Congress on Sound and Vibration*. Florence, Italy. 12-16 July. 2015.

11. Бранцевич П.Ю., Базаревский В.Э., Костюк С.Ф. Применение разложения вибрационных сигналов на периодическую и шумоподобную составляющие при исследовании технического состояния механизмов с вращательным движением / Механика 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. II. – С. 27-31.
12. Brancevich, P., Li, Y. Detection of vibration disturbances during the analysis of long realisations of vibration signals. 25-th International Congress on Sound and Vibration. Hiroshima. Japan. 8-12 July. 2018.
13. Бранцевич, П.Ю. Анализ причин изменения вибрационного состояния агрегата роторного типа. Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. – 2013. – Вып.2. – с. 277-283.
14. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N. C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. Lond. A. 1998.

УДК 621.039.51

**КРОСС-ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММ MCU-HTR И SERPENT
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СИСТЕМАМ ВТГР**

КРУГЛИКОВ А.Е.^{1,2}, ЩУРОВСКАЯ М.В.¹, ВОЛКОВ Ю.Н.¹,
НЕВИНИЦА В.А.², ФОМИЧЕНКО П.А.²

1. НИЯУ МИФИ,

(Москва, Российская Федерация)

2. НИЦ Курчатовский институт,

(Москва, Российская Федерация)

Аннотация. В работе представлены результаты кросс-верификации программ, реализующих метод Монте Карло MCU-HTR и Serpent, применительно к системам ВТГР. Обсуждаются особенности учета примесей графита при проведении нейтронно-физических расчетов графитосодержащих систем, а также их влияние на результаты нейтронно-физических расчетов. Исследованы возможные причины, приводящие к различию результатов расчетов по различным программам, реализующим метод Монте Карло.

Ключевые слова: Реакторы ВТГР, критический стенд АСТРА, кросс-верификация, микротопливо, метод Монте Карло.

CROSS-VERIFICATION OF MCU-HTR AND SERPENT CODES FOR HTGR SYSTEMS

A.E.Kruglikov^{1,2}, M.V.Hurovskay¹, Y.N.Volkov¹,

V.A.Neviniza², P.A.Fomichenko²

1. NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY "MEPHI"

(Moscow, Russian Federation)

2. NATIONAL RESEARCH CENTER «KURCHATOV INSTITUTE»

(Moscow, Russian Federation)

Abstract. The paper presents the results of cross-verification of MCU-HTR and Serpent codes implementing the Monte Carlo method as applied to HTGR systems. The features of taking into account graphite impurities when performing neutron-physical calculations of graphite-containing systems, as well as their influence on the results of neutron-physical calculations, are discussed. Possible reasons leading to the difference in the results of calculations for various programs that implement the Monte Carlo method are investigated.

Keywords: HTGR reactors, ASTRA critical facility, cross-verification, micro-fuel, Monte Carlo method.

Экспериментальные данные даже в случае бенчмарк-экспериментов содержат неопределенности и погрешности. Поэтому определить причину расхождения расчета и эксперимента только путем их сравнения сложно. Кросс-верификация нескольких программ позволяет выявить вклад отдельных приближений в расхождение как верифицируемых программ, так и в расхождение расчета и эксперимента.

В НИЦ «Курчатовский институт» имеется критический стенд АСТРА[1], предназначенный для исследований нейтронно-физических характеристик реакторов ВТГР. С использованием модельных задач, представляющих собой упрощенные модели критического стенда АСТРА, проведена кросс-верификация программ MCU-HTR[2] и Serpent[3], реализующих метод Монте Карло. В ходе кросс-верификации для выявления причин расхождения исследовано влияние на результаты расчета способа моделирования топливных частиц, моделей термализации нейтронов и библиотек ядерных данных.

При проведении расчетов с различными библиотеками также исследовано влияние на результат расчета примесей в графите и способа их задания. С этой целью проведены расчеты экспоненциальных опытов с источником нейтронов по определению сечения поглощения графита, выполненных на стенде РБМК[4], на котором использовались аналогичные графитовые блоки, что и на стенде АСТРА.

Сделаны рекомендации касательно применения программ MCU-HTR и Serpent для нейтронно-физических расчетов систем ВТГР.

Список литературы:

1. N.N. Ponomarev-Stepnoi, N.E. Kukharkin, E.S. Glushkov et al. "Experiments on HTR criticality parameters at the ASTRA facility of the Kurchatov Institute". - Nuclear Engineering and Design V 222, June 2003, p 215 – 229
2. Alekseev, N.I., Bol'shagin, S.N., Gomin, E.A. et al. The status of MCU-5. Phys. Atom. Nuclei 75, 1634–1646 (2012).
3. J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen, V. Valtavirta, and T. Kaltiaisenaho. "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013." Ann. Nucl. Energy, 82 (2015) 142-150
4. Пономарев-Степной Н.Н., Глушков Е.С., Компаниец Г.В., Носов В.К., Чуняев Е.И., Бурлаков Е.В., Кочанов В.М., Житарев В.Е., Павшук В.А., Каминский А.С., Субботин Е.С. Физические характеристики реакторного графита ВАНТ. Сер: Физика ядерных реакторов. 2008. № 2. С. 57-81.

УДК 004.89

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ИЗ ТЕКСТОВ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

АРШАНСКИЙ А.Р.¹, БЕГЛАРЯН Н.М.¹, ЧИКУНОВА М.В.¹, МИЩЕНКО И.О.¹, МАКСИМОВ И.В.²

1 - Акционерное общество "Русатом Автоматизированные системы управления"
(Москва, Российская Федерация)

2 - Частное учреждение по цифровизации атомной отрасли "Цифрум"
(Москва, Российская Федерация)

Аннотация. В статье рассмотрены основные этапы процесса формализации требований, содержащихся в текстах нормативных документов, включающие атомизацию (выделения фрагментов текста из исходных документов) и классификацию фрагментов текста. Разработаны алгоритмы атомизации нормативных документов типа IEC, а также классификации полученных фрагментов текстов и выделения требований. Полученные результаты обладают достаточными параметрами качества для использования в рамках управления требованиями и позволяют сокращать время процесса формализации требований.

Ключевые слова: нормативный документ, требование, МЭК, классификация текста, машинное обучение, обработка естественного языка

AN ALGORITHM FOR REQUIREMENTS EXTRACTION IN TECHNICAL STANDARDS

ALEXEY.R. ARSHANSKIY¹, NANE.M. BEGLARYAN¹, MARY.V. CHIKUNOVA¹, IGOR.O. MISHCHENKO, IVAN.V. MAKSIMOV²

1 - JSC «Rusatom Automated Control Systems»,
(Moscow, Russian Federation)

2 - Cifrum Private Enterprise, Rosatom,
(Moscow, Russian Federation)

Abstract. The purpose of the study is to develop an algorithm for the requirement extraction in technical standards. This process contains two stages: document fragmentation and classification of fragments. The results of the study show that the algorithm has good quality and may be used in the requirement management process.

Keywords: technical standard, requirement, IEC, text classification, machine learning, natural language processing

Введение

В последнее время все большее внимание уделяют процессу управления требованиями. Особенно это касается действительно больших проектов, таких как проектирование и строительство атомных электростанций (АЭС), где объем требований исчисляется десятками и сотнями тысяч. Требование — это формулировка ожидаемого свойства, поведения или характеристик продукта. Для организации процесса управления требованиями существует класс информационных систем, которые так и называются - система управления требованиями. Основные требования заказчика к проектированию и сооружению АЭС формируются в ЕРС-контракте. Помимо этого, для получения лицензии на эксплуатацию АЭС у государственных регулирующих органов, проект должен удовлетворять требованиям национальных и международных стандартов (IEC, IEEE, IAEA, ISO и др.). В связи с чем, первоочередной задачей является выявление требований из текстов нормативных документов (НД) в качестве отдельных самостоятельных сущностей для организации процесса управления требованиями. НД обычно предоставляются в виде электронных документов в формате *pdf*, в них требования описаны в текстовом слабоструктурированном виде. В первую очередь необходимо разделить текст НД на сущности (фрагменты текста), в которых могут содержаться требования. Данная процедура называется атомизацией текста. Кроме требований в тексте НД содержатся и другие данные: информация, заголовки разделов, таблицы, рисунки, пометки. Поэтому необходимо классифицировать сущности.

Общий процесс обработки НД для выделения требований из НД следующий:

1. Атомизация НД на отдельные сущности.
2. Классификация сущностей.

Атомизация нормативных документов

Первой задачей является разделение текста НД на сущности. Под сущностью следует понимать неделимую структурную единицу текстового описания, которая формируется абзацем текста, таблицей или рисунком. Атомизация НД проводилась с помощью синтаксического анализатора. Синтаксический анализатор разбирает разметку и разбивает текст на сущности. Кроме того, немаловажной частью его работы является сквозная нумерация сущностей, которая служит идентификацией. Каждый идентификатор является однозначной ссылкой на требование.

Существует много признаков для определения разметки: положение тех или иных символов, цифр, заглавных и строчных букв. Используя эти признаки в качестве эвристик, мы получили очень простой и легко управляемый синтаксический анализатор. Каждому признаку назначался некий вес, который участвовал в итоговой формуле управления строкой, и уже по сумме этих весов формировались конечные данные. Эвристический метод просто масштабируем ввиду линейности синтаксического анализа. Данный алгоритм также легко адаптируем под новые типы документов.

Предварительная обработка фрагментов текста

Следующим этапом работы алгоритма является процесс классификации полученных фрагментов текста. Поскольку нет явных правил, по которым можно классифицировать фрагменты текста на требования и общую информацию, то в данной работе применялись методы машинного обучения и обработки естественного языка для решения поставленной задачи. Для использования классических моделей машинного обучения необходимо перевести текст в векторное пространство признаков, которое его характеризует. Таким образом, возникает необходимость в процессе векторизации: создании для каждой сущности вектора признаков, который будет использован моделью машинного обучения для классификации сущности.

В данной работе в качестве векторного представления фрагментов текста была выбрана мера TF-IDF [1]. Данная мера определяет статистический вес слова. Для реализации метода требуется провести предварительную обработку данных, заключающуюся в приведении слов к нормальной форме (лемматизация) и удалению лишних символов. Нормальная форма — первое лицо, единственное число, именительный падеж, настоящее время, написание маленькими буквами. Удаление лишних символов заключается в очистке текста от цифр, знаков пунктуации, специальных символов и прочих, не относящихся к написанию слов. Кроме того, удаляются так называемые стоп-слова — не несущие особого смысла. Для английского языка, с которым и проводилась работа, такими, например, являются предлоги, артикли и др.

Таким образом, процесс предобработки данных для дальнейшего использования моделями машинного обучения представлял набор следующих шагов:

1. Очистка текста, которая выполнялась с использованием регулярных выражений [2];
2. Лемматизация слов, которая проводилась с помощью библиотеки *nltk* [3];
3. Перевод в векторное представление фрагментов текст методом TF-IDF реализовывалась с помощью библиотеки *Scikit-learn* [4].

Классификация фрагментов текста

Решение задачи классификации сущностей проводилось с использованием технологий машинного обучения. В качестве базового алгоритма был применен наивный классификатор, который отмечал классом “требование” все сущности, в которых были модальные глаголы (*shall, must, can* и др). С этим базовым классификатором сравнивались все созданные модели машинного обучения. В работе использовались несколько подходов. Первый — это байесовский классификатор [5], второй - градиентный бустинг [6].

Исходные данные для обучения представляли из себя векторное представление сущностей. Размер исходной матрицы признаков (примеры сущностей x признаки) составлял 3760x2580. Обучение классификаторов проводилось на обучающей выборке, которая составляла 50 % от общего объема данных (1880 примеров). В качестве целевого значения была следующая разметка на несколько классов: *Figure* (рисунок), *Heading* (заголовок подраздела), *Information* (информация), *Requirement* (требование), *Title* (заголовок раздела).

Для оценки алгоритмов и сравнения различных моделей использовались такие метрики, как *precision* (точность), *recall* (полнота), *f1* (среднее гармоническое точности и полноты) и *AUC ROC* - площадь под *ROC* кривой ошибок [7], являющейся отображением доли верно классифицированных объектов ко всем объектам. Данные метрики считались для классов “Требование” по схеме один против всех [8] на отложенной тестовой выборке (оставшиеся 50 % от всех данных). Результаты работы моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты работы моделей классификации

Метод	Precision (точность)	Recall (полнота)	f1-score	AUC ROC
Model verbs	0.93	0.86	0.89	0.82
BernoulliNB	0.90	0.94	0.92	0.80
ComplementNB	0.80	1.00	0.89	0.64
XGBoost	0.92	0.96	0.94	0.84

Лучшей моделью по метрике *precision* является модель, основанная на модальных глаголах, что обусловлено спецификой английского языка и правилами формулирования требований. ComplementNB показал наилучшие результаты по метрике полнота, но, учитывая точность классификации, можно сделать вывод о переобучении данного метода под класс “Требование”. Лучшей моделью по метрике *f1*, учитывающей и точность, и полноту, является XGBoost. Метрика *AUC ROC*, равная 0.84 подтверждает наличия преимущества у классификатора XGBoost.

Заключение

Основные результаты проделанной работы следующие:

1. Описан общий процесс работы с требованиями, содержащимися в НД. Он представляет собой последовательное выполнение следующих этапов:

- а) Атомизация НД на отдельные сущности.
- б) Классификация сущностей.

2. Разработан алгоритм атомизации исходных форматов НД на отдельные сущности, который позволяет выделять фрагменты текстов в табличный вид из слабоструктурированного формата *pdf*.

3. Построены несколько моделей классификации фрагментов текстов НД и проведено тестирование моделей на отложенной тестовой выборке. Лучшие результаты показала модель градиентного бустинга (XGBoost Classifier) со следующими показателями качества: *precision* (точность) = 0.92, *recall* (полнота) = 0.96, *f1* = 0.94.

4. Полученный алгоритм атомизации и классификации фрагментов текстов НД обладает достаточными характеристиками для использования в рамках управления требованиями и позволяет сокращать время процесса формализации требований.

Список литературы

1. Salton G., Buckley C. Term-weighting approaches in automatic text retrieval //Information processing & management. – 1988. – Т. 24. – №. 5. – С. 513-523.
2. Van Leeuwen J. (ed.). Handbook of theoretical computer science (vol. A) algorithms and complexity. – Mit Press, 1991.
3. Loper E., Bird S. Nltk: The natural language toolkit //arXiv preprint cs/0205028. – 2002.
4. Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine learning in Python //the Journal of machine Learning research. – 2011. – Т. 12. – С. 2825-2830.
5. Rish I. et al. An empirical study of the naive Bayes classifier //IJCAI 2001 workshop on empirical methods in artificial intelligence. – 2001. – Т. 3. – №. 22. – С. 41-46.
6. Friedman J. H. Stochastic gradient boosting //Computational statistics & data analysis. – 2002. – Т. 38. – №. 4. – С. 367-378.
7. Davis J., Goadrich M. The relationship between Precision-Recall and ROC curves //Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. – 2006. – С. 233-240.
8. Rifkin R., Klautau A. In defense of one-vs-all classification //The Journal of Machine Learning Research. – 2004. – Т. 5. – С. 101-141.

УДК 621.039

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ
ГИДРОДИНАМИКИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА
МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ**

ЧЕСНОКОВ А.А., ХРОБОСТОВ А.Е., БАРИНОВ А.А., КОНОВАЛОВ И.А., МАКАРОВ М.А.

*Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)*

Аннотация. В энергетическом машиностроении широко известен метод корреляционного определения скорости потока. В данной работе авторами произведена адаптация данного метода для применения с пространственной кондуктометрической системой. Оценка скорости потока осуществлялась за счет определения времени транспорта турбулентных структур между чувствительными элементами измерительной системы. В качестве переносимых возмущений использовались пульсации проводимости среды, создаваемый пассивной скалярной примесью.

Ключевые слова: измерительная система, матричная кондуктометрия, корреляционный метод измерения расхода, моделирование процессов в элементах ЯЭУ.

**CORRELATION VELOCITY MEASUREMENTS IN RESEARCHES OF HYDRODYNAMIC
OF TURBULENT FLOWS WITH APPLICATION OF MATRIX CONDUCTOMETRY**CHESNOKOV A.A., KHROBOSTOV A.E., BARINOV A.A.,
KONOVALOV I.A., MAKAROV M.A.*Nizhny Novgorod State Technical University named R.E. Alekseev
(Nizhny Novgorod Russian Federation)*

Abstract. In the energy mechanical engineering method of correlation velocity measurements are widely known. In this paper authors adapted and tested this method for using with conductometry measurements system, which is used in research practice. The velocity of flow was estimated by determining turbulence transport time between sensors. Pulsation of concentration, created by adding tracer in flow, are used as transported fluctuations.

Keywords: measurement system, matrix conductometry, correlation method, flow rate measurement, modeling of processes in the elements of a nuclear power units.

Мировой рынок атомной энергетики проходит стадию трансформации. Все больше внимания уделяется вопросу надежности и эффективности энергетических установок и обслуживающих систем. Одним из показателей, играющих важную роль при обосновании безопасности реакторных установок (РУ) является распределение скоростей и расходов теплоносителя в ее элементах. Примером может служить распределение поканальных расходов теплоносителя через активную зону, которое может оказывать воздействие на реактивность. Помимо прочего, расчетные модели, используемые при проектировании новых РУ постоянно совершенствуются и, в соответствии с этим, требуют проведения валидационных и верификационных экспериментов на масштабных моделях, что в свою очередь делает актуальной задачу разработки новых средств контроля указанных показателей для применения в составе исследовательских стендов.

На современном этапе развития известен корреляционный метод измерения расхода теплоносителя, широко применяемый для эксплуатационной диагностики ядерных энергетических установок. В его основе лежит анализ показаний детекторов гамма-излучения, обусловленного активацией изотопа N^{16} в нейтронном поле активной зоны [1]. Но для лабораторных исследований данный метод не применим из-за отсутствия необходимых радионуклидов в потоке.

Альтернативным решением для экспериментальных исследований является построение измерительной системы на базе применения сетчатых кондуктометрических датчиков (СД) [2]. Основой применяемого метода измерения расхода является определение времени транспорта турбулентных пульсаций потока рабочей среды между двумя измерительными сечениями, которые обусловлены приемниками первой и второй измерительной плоскости соответственно. На основе полученных реализаций УЭП, путем применения взаимно корреляционной функции удельных проводимостей, получены реализации скоростей в ячейках СД.

Измерения проводились в экспериментальной модели квадратного сечения 50×50 мм [3]. СД устанавливались в зоне интенсивного смешения. Измерения расхода среды производились в диапазоне от $0,173 \text{ м}^3/\text{час}$ ($Re = 900$) до $2,64 \text{ м}^3/\text{час}$ ($Re = 12 \cdot 10^3$), действительный расход фиксировался штатными расходомерами.

Полученные значения скоростей сильно зависят от положения измерительных ячеек в исследуемом сечении, что объясняется значительной разностью турбулентных пульсаций в центре и на периферии и влечет за собой разницу между взаимными корреляциями ячеек периферии и центральной областью (рис. 1). При расчете осредненной по сечению скорости потока использовались весовые коэффициенты учитывающие расположение измерительных ячеек.

Также была проведена оценка доверительных интервалов при определении максимума взаимно-корреляционной функции (ВКФ), что позволяет сделать вывод о низком влиянии шума, регистрируемого измерительной системой в исследуемый сигнал [4].

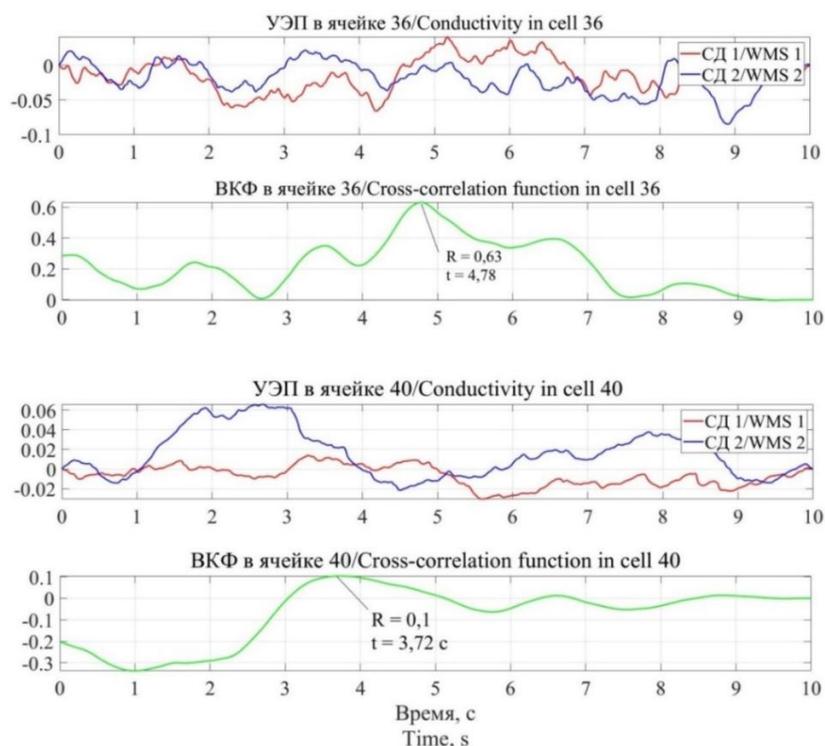


Рис. 1. Реализации УЭП и ВКФ при $Re=6300$ для центральных и периферийных ячеек

Результаты измерений дают приемлемое согласие с показаниями штатных расходомеров для характерных турбулентных режимов течения (погрешность измерения скорости потока при помощи кондуктометров составляет менее 5 %).

Список литературы

1. Mattson H., Owrang F., Nordlung A. Utilisation of N16 in Nuclear Power Plants // Department of Reactor Physics. Chalmers University of Technology, Gbteborg Sweden, 2003
2. Prasser H.M., Bottger A., Zschau J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid // Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 9, 1998. pp. 111-119.
3. Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Баринов А.А., Коновалов И.А., Чесноков А.А., Макаров М.А. Исследование гидродинамики стратифицированных турбулентных потоков для валидации расчетных подходов к моделированию тепловых процессов в оборудовании // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Т. 126, N. 3, 2019. С. 111-119.
4. Bendat J., Piersol A. Random Data: Analysis and Measurements Procedures. Fourth Edition. – John Wiley & Sons., 2012. – 640 p.

УДК 001.891.573

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭСГИЗОВ В.О.¹, МАЛЫШЕВ В.В.², ПАРФЕНЧИКОВ И.С.²¹НИ ТПУ*(Томск, Российская Федерация)*²АО «Атомтехэнерго»*(Московский филиал ЦАТЭ, Российская Федерация)*

Аннотация. Разработана математическая модель энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР для последующего синтеза систем управления основных агрегатов атомной станции при эксплуатации в маневренном режиме. Представленное аналитическое описание отражает процесс взаимного функционирования реактора, парогенератора и турбогенераторной установки с турбиной К-1200-6,9/50.

Ключевые слова: маневренный режим, математическое моделирование, ВВЭР, кинетика ядерного реактора, парогенератор, теплообменный аппарат, турбогенераторная установка, турбина К-1200-6,9/50.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A NPP POWER UNITVYACHESLAV.O. GIZOV¹, VIKTOR.V. MALYSHEV², ILIYA.S. PARFENCHIKOV²¹National Research Tomsk Polytechnic University*(Tomsk, Russian Federation)*²TSentratomtekhenego*(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. A mathematical model of an NPP power unit with a pressurized water reactor has been developed for the subsequent synthesis of control systems for the main units of a nuclear power plant during operation in a maneuverable mode. The presented analytical description represents the process of mutual functioning of the reactor, steam generator and turbine generator unit with a K 1200-6,9/50 turbine.

Keywords: maneuverability, mathematical modeling, PWR, nuclear reactor kinetics, steam generator, heat exchanger, turbine generator, turbine K 1200-6,9/50.

Маневренный режим эксплуатации АЭС, при котором происходит изменение электрической нагрузки, предполагает иной подход к построению систем управления оборудованием атомной станции. Для исследования вопроса обеспечения маневренности реакторной установки с учетом эффекта температурного саморегулирования необходимо анализировать динамику явлений, протекающих непосредственно в ядерном реакторе, в совокупности с поведением основных агрегатов энергоблока, учитывая взаимосвязанные процессы изменения вращающего момента турбины и теплотехнических параметров второго контура.

Основными агрегатами энергоблока атомной станции с реактором типа ВВЭР являются: ядерный реактор, парогенератор и турбогенераторная установка. Разработка математической модели энергоблока, описывающей динамику взаимодействия данных агрегатов, является актуальной задачей для последующей разработки систем управления оборудованием энергоблока в маневренных режимах

Для анализа нестационарных процессов, протекающих в активной зоне реактора, таких как эффект реактивности, обусловленный перемещением управляющих стержней СУЗ, температурный эффект реактивности и вызываемое им изменение мощности при изменении температуры теплоносителя на входе в реактор, а также тепловые процессы в топливе и теплоносителе, в учебной и исследовательской деятельности активно используются уравнения точечной кинетики ядерного реактора совместно с дифференциальными уравнениями тепловых процессов внутри установки [1, 2, 3].

Парогенератор является промежуточным звеном между водо-водяным ядерным реактором и турбогенераторной установкой и связывает между собой оборудование первого и второго контуров. В связи с этим, моделирование данной установки необходимо при исследовании взаимного функционирования агрегатов энергоблока в различных режимах. Зачастую парогенератор представлен в виде объекта термодинамических и теплофизических

расчетов, как в работе [4], или с точки зрения разработки моделей для рассмотрения процессов сепарации пара в паровом объеме [5], однако они неприменимы для решения поставленной задачи. Динамика паропроизводящей установки описывается сложной системой дифференциальных уравнений, представленной в работе [6], использование которой значительно усложнит процесс математического моделирования. Для сохранения адекватной сложности разрабатываемой модели, парогенератор может быть представлен в виде простейшего теплообменного аппарата, уравнения теплофизических процессов которого приведены в источнике [5].

При математическом моделировании турбогенераторной установки в рамках данной работы необходимо рассматривать паровую турбину как объект автоматического управления. Уравнения динамики паровых турбин активно используются при моделировании и исследовании систем регулирования данного объекта. Рабочим телом турбины является сжимаемая среда (водяной пар), в связи с чем изменение расхода по сечениям проточной части не следуют мгновенно за изменениями расхода через управляющие клапаны. Однако представление турбоагрегата в виде системы с распределенными параметрами значительно усложнит процесс моделирования, в связи с чем необходимо использовать определенную степень дискретизации, что применено в работах [7, 8, 9]. Методика составления аналитического описания, представленного в данных источниках, более подробно описана Калашниковым А.А. [10] и использована в данной работе.

Таким образом, с использованием методик, описанных в источниках [3, 11], разработано математическое описание основных агрегатов, образующих энергетический блок. На рис. 1 представлена структура составленной математической модели.

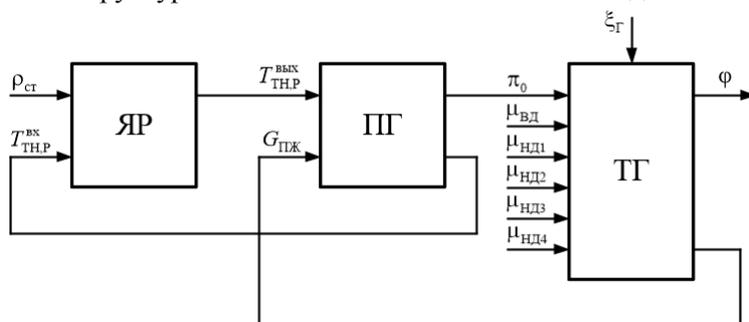


Рис. 4. Структура математической модели энергоблока АЭС: ЯР – система уравнений кинетики ядерного реактора; ПГ – система уравнений динамики парогенератора; ТГ – система уравнений турбогенераторной установки; $\rho_{ст}$ – реактивность, вносимая стержнями СУЗ; $T_{ТН,Р}^{вх}$, $T_{ТН,Р}^{вых}$ – температура теплоносителя на входе и выходе из реактора соответственно; $G_{ПЖ}$ – массовый расход парожидкостной смеси (среды второго контура); π_0 – давление свежего пара относительно номинального значения; $\mu_{вд}$, $\mu_{нд}$ – относительные степени открытия регулирующих клапанов высокого и низкого давления соответственно; ξ_G – момент сопротивления генератора относительно номинального значения; φ – частота вращения ротора турбины относительно номинального значения

Входными управляющими воздействиями на модель энергоблока являются: реактивность, вносимая стержнями СУЗ, степени открытия регулирующих клапанов высокого и низкого давления паровой турбины; входное возмущающее воздействие – изменение относительного момента сопротивления генератора, вызванное изменением подключенной к его клеммам электрической нагрузки; выходная координата – относительная частота вращения ротора турбины.

Представленная модель учитывает взаимное влияние основных агрегатов АЭС на их работу за счет представленных на рис. 1 петель обратной связи по массовому расходу парожидкостной смеси и температуре теплоносителя на входе в ядерный реактор. На рис. 2 представлены полученные с использованием модели переходные процессы при закрытии клапанов высокого и низкого давления на 10 % в момент времени 25 с.

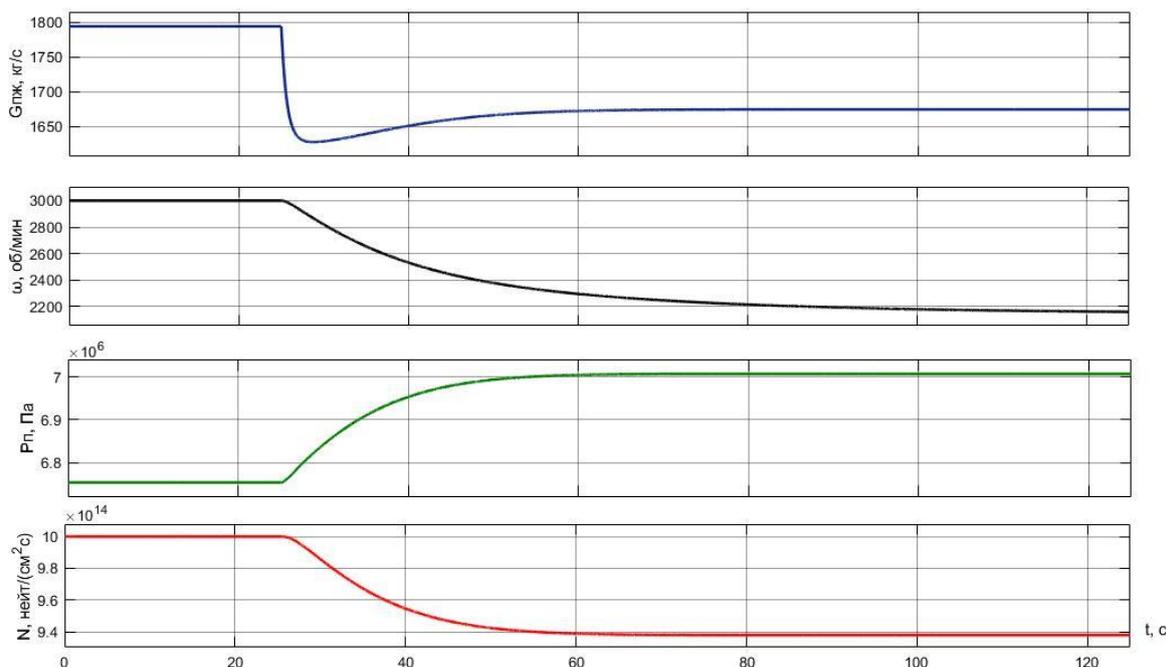


Рис. 5. Переходные процессы: массового расхода среды второго контура (синий), частоты вращения ротора турбины (черный), давления пара на турбину (зеленый), плотности потока нейтронов (красный)

Разработанная математическая модель описывает основные каналы управления энергетического блока АЭС и учитывает взаимное влияние нейтронной мощности реактора и теплофизических параметров первого и второго контуров при различных режимах работы и уровнях мощности энергоблока.

Список литературы

1. Никулина Е.Н., Северин В.П., Лукинова Д.А. Моделирование переходных режимов ядерного реактора ВВЭР-1000 с учетом борного регулирования. [Электронный ресурс]. – электрон. справ. – URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/34297/1/vestnik_KhPI_2017_51_Nikulina_Modelirovanie.pdf, (дата обращения: 17.02.2021).
2. Вольман М.А. Моделирование переходных процессов в реакторе ВВЭР-1000 для предварительной подготовки оперативного персонала. – Проблемы энергетики, 2016, вып. 9-10, С. 112–118.
3. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС: Учебное пособие – Одеса: Астропринт, 2001. – 305 с.
4. Ефимов А.В., Каверцев В.Л., Потанина Т.В., Гаркуша Т.А., Есипенко Т.А. Математическая модель горизонтального парогенератора типа ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР. [Электронный ресурс]. – электрон. справ. – URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/8885/1/vestnik_HPI_2014_13_Yefimov_Matematicheskaya.pdf, (дата обращения: 17.02.2021).
5. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Мечтаева М.Н. Разработка модели процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М. – Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2020, вып. 3, С. 5–15.
6. Кравцов Д.Н., Стопакевич А.А. Разработка и исследование модели парогенератора ПГВ-1000. – Холодильная техника и технология, 2013, т. 49, вып. 5, С. 45–48.
7. Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Исследование и расчет параметров элементов системы регулирования частоты вращения ротора турбины с учетом параметрической неопределенности математической модели. – Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия естественные науки, 2014, вып. 1(52), С. 78–93.

8. Мельников Д.В. Проекционно-матричный метод синтеза контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины. – Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение, 2013, вып. 4(93), С. 43–53.
9. Зацаринная Т.Г., Чуклин А.А., Аникевич К.П. Повышение надежности противоразгонной защиты паровой турбины К-1000-60/1500-2. – Энергетические установки и технологии, 2017, т. 3, вып. 1, С. 12–19.
10. Калашников А.А. Динамика регулирования турбин. Москва, Энергоатом-издат, 1999, 328 с.

УДК 004.942

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РОССИЙСКИХ АСУ ТП АЭС**

ПАППЕ И.Н., ВОЛОДИН В.С.

*Акционерное общество «Русатом Автоматизированные системы управления»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. Современное развитие вычислительной техники и информационных технологий позволили отечественной атомной отрасли начать цифровую трансформацию. Это преобразование включает в себя не только рост уровня автоматизации бизнес-процессов и применения технологий индустрии 4.0, но и применение математического моделирования на разных этапах жизненного цикла разрабатываемых продуктов. В данном докладе авторы предпринимают попытку обобщить имеющийся опыт применения математического моделирования на различных стадиях жизненного цикла российских АСУ ТП АЭС и рассказать о ведущихся разработках в данной области.

Ключевые слова: математическое моделирование, АСУ ТП, АЭС, верификация, аналитический тренажёр.

**APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS AT DIFFERENT STAGES OF THE LIFE
CYCLE OF RUSSIAN NPP I&C SYSTEM**

I.N. PAPPE, V.S. VOLODIN

*JSC «Rusatom Automated Control Systems»
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The modern development of computers and information technologies has allowed the national nuclear industry to begin digital transformation. This transformation includes not only an increase in the level of business process automation and the use of Industry 4.0 technologies, but also the use of mathematical modeling at different stages of the product life cycle. In this report, authors attempt to summarize the existing experience of using mathematical modeling at various stages of the Russian NPP I&C system life cycle and talk about the ongoing developments in this area.

Keywords: mathematical modeling, I&C system, nuclear power plant, verification, analytical simulator.

Введение

Математическое моделирование является основой для современного решения инженерных задач, и его роль возрастает в связи с необходимостью решения все более сложных прикладных задач: прогнозирование развития технологического процесса, определение скрытых дефектов технологического оборудования и т.д.

В настоящее время для проектирования и ввода в эксплуатацию различных сложных технических систем (автомобили с автопилотом, робототехника, военная авиация, оборонные оружейные комплексы и т.д.) применяется модельно-ориентированное проектирование, в рамках которого на каждом этапе разработки системы вместо её физических прототипов используется соответствующая математическая модель для имитации. Этот подход позволяет в разы ускорить разработку технических систем, изготовление и тестирование которых либо требует больших финансовых ресурсов, либо требует соблюдения большого количества требований по безопасности. Энергоблоки АЭС представляют собой именно такую систему.

В атомной отрасли математическое моделирование применялось в основном для проверки конструкторских решений на этапе проектирования технологического оборудования (как, например, в [1]), обоснования безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС и подготовки оперативного персонала. Однако развитие вычислительной техники и информационных технологий в последние десять лет позволило начать внедрение математического моделирования и на других стадиях жизненного цикла АСУ ТП АЭС (см. рис. 1, [2]) как на этапе пусконаладки энергоблоков, так и на этапе их промышленной эксплуатации.

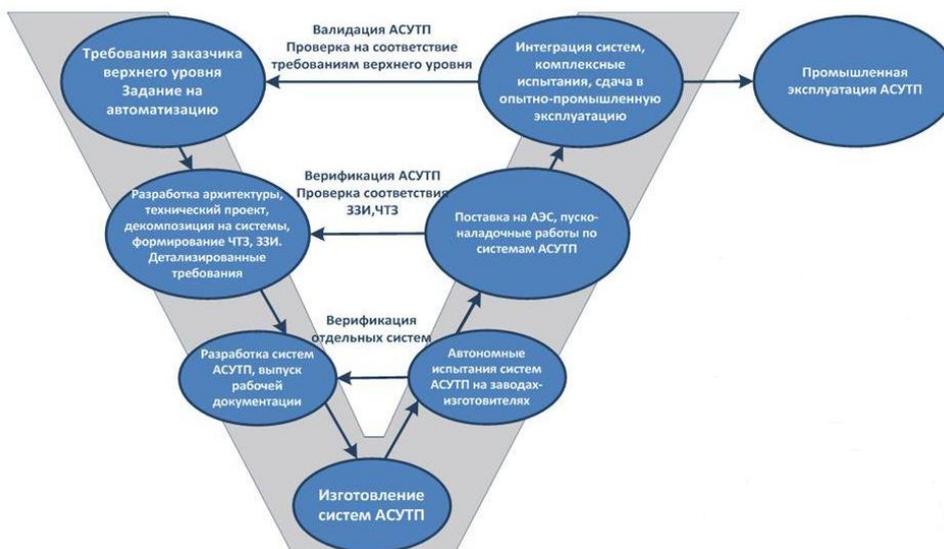


Рис. 1. Жизненный цикл АСУ ТП

Применение математического моделирования на этапе проектирования ЯЭУ

На этапе проектирования производятся расчеты с целью принятия и корректировки технических решений. На этом этапе проводится проверка работы оборудования не только в условиях нормальной эксплуатации, но и в условиях проектных и запроектных аварий: определяются эксплуатационные пределы и условия, пределы и условия безопасной эксплуатации энергоблока, а также последствия различных возможных аварий.

Так как оборудование реакторной установки, реакторного отделения (за исключением реактора), турбины и машинного зала (за исключением турбины), системы автоматики проектируется разными организациями, то, соответственно, используются и различные моделирующие комплексы для верификации проектных решений.

В настоящее время при проведении конструкторских нейтронно-физических расчетов активных зон реакторов сложился следующий подход, обусловленный, в частности, возможностями вычислительной техники. Расчет отдельных ТВС осуществляется по двумерным малогрупповым программам с созданием библиотек малогрупповых констант для последующего крупносеточного расчета. К программам данного класса относятся КАССЕТА, ШЕСТИГРАННИК, ТВС-М и ряд других. Расчет библиотек малогрупповых констант для крупносеточных расчетов выполняется по двумерным спектральным программам (например, WIMS-D4, САПФИР) или при совместном одновременном использовании спектральных и малогрупповых программ (УНИРАСОС или ТВЭГ + КАССЕТА или ТВС-М) [3].

При расчёте трехмерной активной зоны, определяются поля энерговыделения, выбирается картограмма загрузки активной зоны, длительность топливной кампании и схема топливных перегрузок. Расчеты выполняются по стационарным программам с учетом обратных связей по теплогидродинамике. С помощью таких расчётов определяется применимость заложенных на первоначальной стадии проекта схем загрузки топлива, допустимая величина неравномерности поля энерговыделения, длительность топливной кампании. При проектировании активных зон ВВЭР для реализации соответствующего численного эксперимента используется программа БИПР-7(7А) [3].

Программы теплогидравлических расчётов ЯЭУ можно условно разделить на три группы: программы моделирования динамики ЯЭУ в условиях аварий, не связанных с крупными течами из первого контура (например, ДИНАМИКА, МОСТ-7); программы расчета процессов в ЯЭУ в условиях течей из первого контура ЯЭУ (например, КОРСАР, RELAP-5, ATHLET [19]); программы моделирования процессов в условиях протекания тяжелых аварий с разрушением активной зоны (например, СВЕЧА). Нестационарные теплогидравлические программы в настоящее время объединяются с трехмерными нестационарными нейтронно-физическими программами, образуя комплексы полномасштабного моделирования динамики реакторных установок [3].

Для комплексного исследования динамических процессов в ЯЭУ используются программы связанного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета. Это программные комплексы, которые создавались путем объединения ранее разработанных программ гидродинамики и физики (программные комплексы ТИГР (БИПР8-KN +РАСНАР), АТНЛЕТ/БИПР8КН), либо программы, изначально предназначенные и разрабатываемые для связанного нейтронно-теплогидравлического расчета, например, «РАДУГА».

Для моделирования процессов в оборудовании машинного зала и системах водообмена первого контура применяются, как правило, теплогидравлические программы, имеющие возможность задания гибкой расчетной схемы и специально разработанные для моделирования сложных разветвленных теплогидравлических контуров. Например, программа TRP (Thermal Power Plant) или КРЭБ[3].

Также необходимо отметить разработку ОАО СПБАЭП «Виртуальный энергоблок АЭС с ВВЭР» (ПТК «ВЭБ»), пилотная версия которого создана на основе проекта ЛАЭС-2. Средствами ПТК «ВЭБ» созданы модели основного оборудования реакторной и паротурбинной установки, модели вспомогательных систем первого контура и систем управления, а также модели основных электротехнических систем. Для расчета теплогидравлических процессов в системах и оборудовании АЭС используются коды улучшенной оценки КОРСАР и РАТЕГ, а также одномерные гомогенные теплогидравлические коды [4]. В качестве управляющего программного комплекса используется ПК ТЕРМИТ, разработанный НИТИ [5]. Для локального моделирования, а также создания моделей мозаичных панелей используется ПТКУ SimInTech, разработки ООО «ЗВ Сервис». Создание и отображение видеокadres производится созданным в НИТИ специализированным модулем видеокadres, который позволяет конвертировать видеокadres из ПТК ПОРТАЛ [4].

Применение математического моделирования на этапе проектирования АСУ ТП АЭС

Для сокращения трудозатрат и повышения качества проектирования ПТК низовой автоматики АСУ ТП АЭС применяются соответствующие инструментально-моделирующие средства. В качестве инструмента верификации ПТК низовой автоматики, в основе которого лежат средства ТПТС, используют интегрированную среду (ИС) «ЭНИКАД» разработки ЭНИКО ТСО [6].

Моделирующие комплексы за авторством ЭНИКО ТСО и АО «ВНИИАЭС» в части АСУ ТП предназначены для использования в качестве электронной информационной модели АСУ ТП. Эта модель позволяет не только отображать все информационные связи в контуре «системы нижнего уровня АСУТП – СВБУ – электронные панели БПУ/РПУ», но и комплексно моделировать работу всех систем АСУТП в этом контуре с полной динамизацией (визуализацией) прохождения всех сигналов. Моделирование работы систем АСУ ТП в рамках комплексов может осуществляться в двух режимах:

а) в статическом режиме, без использования модели физических процессов (МФП) в технологических системах энергоблока, воспроизводящей показания всех датчиков АСУТП. В этом режиме показания датчиков задаются пользователем вручную, с помощью специализированной сервисной оболочки комплекса или в автоматическом режиме из специального, заранее подготовленного файла сценария;

б) в динамическом режиме, с использованием МФП, разрабатываемой в рамках отдельного. В этом режиме показания датчиков рассчитываются в МФП.

Модели разрабатываются с использованием ИС «ЭНИКАД» и платформы ПОРТАЛ (в части АРМ СВБУ программное обеспечение создано методом эмуляции, т.е. автоматизировано на основе штатного ПО СВБУ). Модель систем АСУ ТП в части низовой автоматики автоматизировано генерируется на основе STEP-кода, получаемого на инженерной станции ТПТС по GET-проекту и загружаемого в штатную аппаратуру ТПТС. Это позволяет в короткие сроки дополнить модель АСУ ТП нужными частями (функциональными областями GET-проекта).

Динамическое моделирование работы систем АСУ ТП с использованием МФП получило развитие в виде системы автоматизированного тестирования АСУ ТП для энергоблоков № 1 и 2 Ленинградской АЭС-2.

Применение математического моделирования на этапе пусконаладочных работ

В рамках цифровой трансформации отрасли преобразовывается и процесс пусконаладки энергоблоков АЭС с помощью математического моделирования: в московском филиале АО «Атомтехэнерго» с 2017 года ведётся разработка программного-технического моделирующего комплекса, создание которого позволит сократить время введения энергоблоков в эксплуатацию за счёт оптимизации пусконаладочных работ [7]

«Расчётно-аналитический экспериментальный комплекс» (РАЭК ПНР) – это цифровой инструментарий пусконаладочных работ. В основе лежит техническая составляющая, включая Супер-ЭВМ и комплект отечественных сертифицированных программных средств, расчетных кодов основных законодателей в области обоснования безопасности и проектирования (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», ОКБ «Гидропресс», АО «АТОМПРОЕКТ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). Ядром РАЭК ПНР, позволяющим осуществлять обмен данными между программными средствами, является программа динамического моделирования технических систем SimInTech разработки ООО «ЗВ Сервис».

Основная цель разработки РАЭК ПНР – создание цифрового инструментария для отработки и оптимизации пусконаладочных процедур в лабораторных условиях до начала работы специалистов АО «Атомтехэнерго» непосредственно на АЭС [8].

Применение математического моделирования на этапе промышленной эксплуатации

Одно из основных направлений цифровизации атомной отрасли – создание цифрового двойника энергоблока АЭС. Цифровой двойник – программный аналог физического устройства, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды. Важной особенностью цифрового двойника является то, что для задания на него входных воздействий используется информация с датчиков реального устройства, работающего параллельно.

В 2009 г. стартовала разработка концепции «Виртуальной АЭС с ВВЭР». С 2015 г. началась активная стадия проекта с наименованием «Разработка программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР». Основные исполнители работ: АО «ВНИИАЭС», ИБРАЭ РАН и РФЯЦ-ВНИИЭФ (разработчики СуперЭВМ).

Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» представляет собой совокупность расчетных кодов, позволяющих моделировать физические процессы, протекающие в технологическом оборудовании энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР, которая функционирует на высокопроизводительной вычислительной системе. Особенностью ПТК является наличие кодов тяжёлых аварий авторства ИБРАЭ РАН. Также в ПТК входят модели систем управления, созданные на основе ИС «ЭНИКАД».

ПТК позволяет без каких-либо последствий менять режим работы и прогнозировать изменения состояния оборудования, что, в свою очередь, позволяет сделать действующие АЭС более безопасными на всех стадиях жизненного цикла. Платформа программно-технического комплекса Виртуальной цифровой АЭС станет основной для разработки современных тренажеров оперативного персонала АЭС, что окажет позитивное влияние на качество подготовки персонала, и, как следствие, на уровень безопасности эксплуатации атомных станций.

Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» способен решать широкий спектр задач, включая верификацию проектных решений и расчетное обоснование безопасности. Пилотная версия разрабатывается для энергоблока №1 НВАЭС-2.

В 2017 году завершена разработка основных расчетных кодов, формирующих ядро программно-технического комплекса. Первая демонстрация программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» состоялась 23 мая 2018 г. в АО «ВНИИАЭС» (дочернее общество АО «Концерн Росэнергоатом», входит в электроэнергетический дивизион Госкорпорации «Росатом») в рамках проведения 11-й Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018). В 2018 году завершена разработка последнего из модулей — модуля разрушения активной зоны. Кроме того, в 2018 г. завершены работы по интеграции отдельных программных модулей в состав программно-технического комплекса. К концу 2018 года были полностью завершены работы по монтажу и наладке технических средств. В конце 2019 г., после завершения работ по

верификации программно-технического комплекса и его опытной эксплуатации, проведены приемо-сдаточные работы. В 2019 году на программно-техническом комплексе Виртуально-цифровой АЭС прошло около 100 автономных и комплексных испытаний. Опытная эксплуатация ПТК подтвердила возможность его применения для проведения противоаварийных тренировок и комплексных противоаварийных учений, верификации алгоритмов управления энергоблоком АЭС, верификации противоаварийных инструкций и проектно-конструкторских решений наиболее ответственного оборудования. 3 марта 2020 года ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» принят в промышленную эксплуатацию. В дальнейшем планируется поэтапное внедрение программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» в деятельность Кризисного центра АО «Концерн Росэнергоатом», его тиражирование на другие энергоблоки и решение прикладных задач, стоящих перед АО «Концерн Росэнергоатом» [9].

ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» разрабатывается в рамках энергетического дивизиона ГК Росатом. Также в дивизионе «АСУ ТП и электротехника» в рамках разработки системы информационной поддержки оператора (СИПО) для энергоблока № 1 НВАЭС-2 реализуется часть функционала цифрового двойника энергоблока. СИПО разрабатывается АО РАСУ и ИФ СНИИП АТОМ при поддержке оперативного персонала НВАЭС-2.

Согласно п. 3.4.5.1. НП-001-15, каждый энергоблок АЭС должен оснащаться системой информационной поддержки оператора [10]. Частью реализуемой СИПО является программно-технический комплекс «Модель энергоблока» (ПТК МЭ), включающий в себя, в частности, модели систем управления и физических процессов, протекающих в технологическом оборудовании блока.

Расчет распределения энерговыделения в объеме активной зоны выполняется аттестованной Ростехнадзором программой SVC, основанной на прямом решении уравнения переноса нейтронов и не использующей гомогенизацию расчетных ячеек и диффузионное приближение.

Теплогидравлическая модель основана на решении системы фундаментальных уравнений сохранения и замыкающих соотношений. В дополнение к системе главных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в первом и втором контурах энергоблока, записывается уравнение переноса нерастворимых примесей для моделирования транспорта борного поглотителя в первом контуре реакторной установки.

Модель АСУ ТП реализована на базе отдельного программного модуля, обчитывающего логику работы модельных схем контроля и управления. Комплект расчётных схем формируется для неё с помощью редактора схем, который является составной частью программной среды КРУИЗ. Расчётные схемы формируются на основе GET-планов ТПТС, а также технического проекта АСУ ТП энергоблока и документации генерального конструктора РУ, поэтому модель АСУ ТП в целом повторяет логику, заложенную в АСУ ТП энергоблока.

Математическая модель привязана к сигналам СВБУ, что позволяет инициировать процесс моделирования с любого текущего состояния энергоблока. Также обеспечивается быстроедействие модели на уровне реального времени (возможно ускорение моделирования на порядок) [11].

В составе СИПО программная модель блока используется для реализации следующих функций:

- контроль достоверности показаний датчиков систем нормальной эксплуатации;
- мониторинг состояния основного оборудования энергоблока;
- контроль работы блочной автоматики (ТЗиБ, АВР и т.д.);
- прогнозирование развития технологического процесса с текущего состояния вперед на 15 – 30 минут с выдачей предупредительной сигнализации о выходе контролируемых параметров за эксплуатационные пределы при отсутствии управляющих воздействий оператора в заданном интервале времени (автоматический прогноз);
- прогнозирование развития технологического процесса с учетом сценария планируемых управляющих воздействий оператора в заданном интервале времени (запросный прогноз).

При прогнозировании моделируются процессы нормальной эксплуатации (НЭ), в том числе пуск блока от холодного состояния до работы на номинальных параметрах, разгрузка и

останов блока, маневрирование мощностью, а также процессы при нарушении нормальной эксплуатации (ННЭ), в том числе сопровождающиеся срабатыванием ПЗ и ускоренной разгрузкой блока [11].

Также стоит упомянуть проект, относящийся к технологии цифрового двойника энергоблока, финальная стадия которого началась в начале марта 2021 года: концерн «Росэнергоатом» совместно с АО «ВНИИАЭС» и компанией «Мейнтекс» приступили к завершающему этапу (опытная эксплуатация) реализации первого в России проекта по созданию и внедрению системы предиктивной аналитики в области атомной энергетики. Данная система реализуется на блоке № 1 Нововоронежской АЭС-2.

Проект направлен на создание прототипа системы, которая будет на ранней стадии обнаруживать скрытые дефекты в генерирующем оборудовании атомных станций. Уже разработаны и верифицированы модели машинного обучения нескольких видов оборудования – это турбогенератор, паротурбинная установка и циркуляционные насосы энергоблока №6 НВАЭС – они запущены для анализа актуального состояния оборудования в режиме реального времени

Внедрение на АЭС подобного решения позволит не только повысить безопасность и надежность работы российских АЭС, но и позволит уменьшить риски штрафов при неплановых остановах, а также сократить длительность простоев из-за ремонта и свести к минимуму количество нарушений и отказов в работе оборудования [12].

Данное решение является частью нового разрабатываемого продукта – «Шаблон эксплуатации», представляющий собой комплекс интегрированных цифровых систем, с помощью которых функционируют базовые бизнес-процессы – управление эксплуатацией (от сооружения до вывода из эксплуатации), персоналом, взаимодействием эксплуатирующей организации с сетевым оператором и т. д. «Шаблон эксплуатации» дополнит цифровые системы, обслуживающие хозяйственную деятельность АЭС – заключение договоров, закупки, движение денежных средств, — которые были внедрены примерно два года назад [13].

Заключение

В настоящее время осуществляется внедрение как полномасштабных моделей энергоблока, так и моделей машинного обучения на этапах пусконаладки и промышленной эксплуатации. Подобное стало возможно за счёт развития вычислительной техники и информационных технологий. Использование таких моделей позволит повысить эффективность процесса выработки электроэнергии на энергоблоках АЭС, в частности, за счёт прогноза развития технологического процесса и определения скрытых дефектов технологического оборудования.

Список литературы

1. R V Bahdanovich et al. Modeling of BN-600 Hybrid Core Benchmark (HEX-Z) with MCU-PTR and SERPENT 2. 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1689 012046
2. Кабачников А.Б., Морозов А.В. Подходы к технологии электронного проектирования АСУ ТП АЭС на базе пакета SmartPlant Enterprise // *Ядерная физика и инжиниринг.* – 2012. - № 2 (том 3). – С. 167-172.
3. Кавун О.Ю. САПР отрасли. Программы и программные комплексы, применяемые при конструировании ЯЭУ. Примеры применения и верификации конечно-разностных схем при разработке программ. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 109 с.
4. Безлепкин В.В., Кухтевич В.О., Образцов Е.П. и др. Программно-технический комплекс «Виртуальный энергоблок АЭС с ВВЭР» (ПТК «ВЭБ») для проверки проектных решений АЭС-2006. Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР, 2013, сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Россия.
5. Иконникова О.А., Калинин Д.В., Крицак С.В. и др. Модернизация и развитие системной оболочки программного комплекса ТЕРМИТ // *Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ.* – 2016. – № 3 (5). – С. 48-55.
6. Зятников А.Н., Рогов В.М. Развитие методов верификации прикладного программного обеспечения АСУ ТП АЭС на базе ТПТС. Доклады БГУИР. 2015; 2 (88): 56-60.

7. Пусконаладка по-цифровому [Электронный ресурс] // РЭА. Ежемесячный журнал атомной энергетики в России #11 2018 [сайт]. URL: https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/zhurnal-rosenergoatom/?PAGEN_1=2.
8. Цифровизация производственных задач в АО «Атомтехэнерго» [Электронный ресурс] // АО «Атомтехэнерго» [сайт]. URL: <https://atech.ru/news/tsifrovizatsiya-proizvodstvennykh-zadach-v-ao-atomtekhenego/>.
9. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» [Электронный ресурс] // Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук [сайт]. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/362>.
10. НП-001-15 Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. М.: Ростехнадзор, 2015.
11. Стацуря Д.Б., Тучков М.Ю., Поваров П.В. и др. Использование программной модели блока для совершенствования проектных решений и оптимизации управления технологическим процессом // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 4. – С. 37-49.
12. Росэнергоатом: Первый в России проект по внедрению на АЭС системы предиктивной аналитики вышел на финишную прямую [Электронный ресурс] // АО «Концерн Росэнергоатом» [сайт]. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/news/37790/>.
13. «Росэнергоатом» разрабатывает цифровые платформы и инструменты для АЭС [Электронный ресурс] // Инновации Росатома [сайт]. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/news/detail/1376/>.

УДК 681.5

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ КИПЯЩЕГО СТЕНДА

БОНДАРЬ П.С.

*Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. В статье отражены процесс разработки и внедрения программного обеспечения алгоритмов управления тиристорных агрегатов кипящего стенда КС НИЦ «Курчатовский институт». В материале рассматривается общее назначение кипящего стенда, работа тиристорных агрегатов и нагрев экспериментального участка. Автором были изучены устройство тиристорных агрегатов кипящего стенда, система управления нагревом и алгоблочное программирование среднего уровня, на котором базируется система управления. На основании полученных данных было разработано программное обеспечение для системы управления нагревателями для более оптимального управления нагревом, задания мощности и контроля выходных токов.

Ключевые слова: программа, алгоритм, управление, тиристор, агрегат, стенд, нагреватель.

SOFTWARE FOR BOILING STAND THYRISTOR UNITS CONTROL ALGORITHMS

PAVEL.S. BONDAR

*National Research Center «Kurchatov Institute»
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The article reflects the development and introduction of thyristor units control system of NRC «Kurchatov Institute» Boiling stand. The general appointment of the Boiling stand, thyristor units functioning, and the experimental part heating are also reviewed. Thyristor units device, heating control system and middle algorithm-programming tool as base of the control system are examined by author. Using the received data, the heating control system software is developed for more optimal heating control, power setting and output currents measuring.

Keywords: program, algorithm, control, thyristor, unit, stand, heater.

Введение

На стенде КС, со времени его пуска в 1967 году, непрерывно ведутся эксперименты, в которых на моделях ТВС водо-водяных реакторов исследуются гидравлическое сопротивление, кризис теплоотдачи при кипении, устойчивость принудительной и естественной циркуляции теплоносителя, поперечное перемешивание теплоносителя, интенсификация теплообмена за счёт использования решёток-интенсификаторов, понижение теплотехнических запасов из-за локальных нарушений геометрии топливной сборки. Эти исследования необходимы для обоснования теплотехнических запасов активных зон реакторов и оптимизации конструкций ТВС реакторов.

Система электронагрева моделей ТВС подготавливается к подаче электрического тока на экспериментальный пучок. Вход в кризисное состояние осуществляется плавным повышением электрической мощности, подаваемой на модель ТВС, при сохранении величин остальных режимных параметров неизменными. Поскольку кризис теплоотдачи исследуется в стационарных условиях, вход в кризисное состояние производится плавно.

За работу электронагревателя первого контура и подачу мощности на участок экспериментальной установки отвечают тиристорные агрегаты. Для того, чтобы гарантировать плавное нарастание мощности и оптимальную работу тиристорных агрегатов по выходному току и выдаваемой мощности, необходимо внедрить в АСУ ТП стенда программное обеспечение алгоритмов управления тиристорными агрегатами, обеспечивающее сведение токов, идущих через тиристоры, уменьшение биений и взаимное регулирование токов по всем агрегатам.

Методика проведения эксперимента

Электропитание экспериментальных участков осуществляется от преобразовательной подстанции общей мощностью 10000 кВт и построено на тиристорах. Быстродействующие тиристоры предназначены для применения в качестве ключевых элементов в цепях

преобразователей электроэнергии, где требуются малое время включения и выключения, высокие скорости нарастания тока и напряжения [1]. Преобразовательная подстанция состоит из четырех управляемых тиристорных выпрямителей, выходная мощность каждого из которых равна 2500 кВт.

Схема преобразовательной подстанции позволяет осуществить все возможные варианты параллельной и независимой работы четырех агрегатов. Напряжение выпрямленного тока изменяется от 0 до 150 В на первом диапазоне регулирования и от 0 до 300 В на втором диапазоне. Наибольшая мощность преобразовательной подстанции получается при параллельной работе всех четырех агрегатов на общую нагрузку на втором диапазоне регулирования [2]. При этом выходной ток равен 40 кА, а напряжение 200 В. На втором диапазоне регулирования напряжение может быть увеличено до 300 В, но при этом необходимо пропорционально уменьшить выходной ток так, чтобы суммарная выходная мощность не превышала 10000 кВт.

Для нормальной эксплуатации кипящего стенда КС необходимо, чтобы рассогласование токов между двумя шкафами одного тиристорного агрегата не превышало 500 А, а дребезг и выбросы отдельных токов не превышал 50 А на всём диапазоне мощности, равном 5 МВт при работе всех четырёх тиристорных агрегатов.

АСУ ТП кипящего стенда КС построена с использованием SCADA-системы из программно-технического комплекса «УМИКОН» и содержит в себе автоматизированные рабочие места научных сотрудников, человеко-машинный интерфейс с выводом важных для наблюдения параметров экспериментальной установки, программную часть (программное обеспечение, алгоритмы управления верхнего и среднего уровня, мнемосхемы, база данных реального времени, архивы данных) и аппаратную часть (персональные компьютеры, станции сбора данных, серверы, модули центрального процессора, модули среднего и нижнего уровня, силовое оборудование). На рис. 1 показано подключение модулей нижнего и среднего уровней для связи с АРМ и организации управления тиристорными агрегатами.

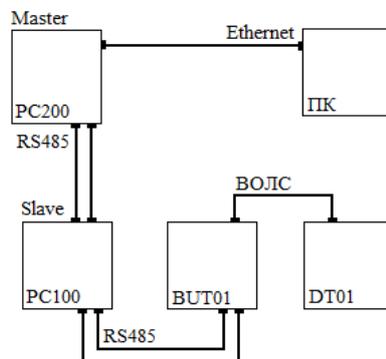


Рис. 1. Структура управления и сбора данных тиристорных агрегатов

Модуль центрального процессора PC200 представляет собой функционально законченную адаптированную к промышленным условиям РС-совместимую ПЭВМ с расширенной поддержкой гальванически развязанных внешних интерфейсов. Модуль PC100 предназначен для организации связи и взаимодействия с модулями ввода-вывода и ПЭВМ, а также для выполнения вычислений, обработки сигналов ввода-вывода, поддержки распределенных сетей и т. п. Модуль BUT01 предназначен для управления 3-х фазным полностью контролируемым мостовым выпрямителем. Используется совместно с модулем ДТ 01. Модуль ДТ01 предназначен для размножения импульса поджига на 8 тиристоров типа Т143-500. В персональном компьютере функционирует база данных реального времени – программа MWBridge, включающая в себя базы данных реального времени и алгоблочное программирование верхнего и среднего уровня [3].

Программирование среднего уровня производится непосредственно в модуле центрального процессора PC100, управляющие команды из которого поступают в модуль управления тиристорами BUT01 по интерфейсу RS-485.

Выбор программно-технического комплекса, включающего в себя модули центрального процессора и связи с оборудованием нижнего уровня, а также алгоритмическое программирование верхнего и среднего уровней для построения системы управления обусловлено необходимостью плавного и точного регулирования мощности нагревателя экспериментального участка для предотвращения выбросов по температуре, запроектных кризисов теплоотдачи и, как следствие, разрушения исследуемого канала.

На рис. 2 представлено тело алгоритмической программы среднего уровня, в котором реализован алгоритм управления тиристорными агрегатами.

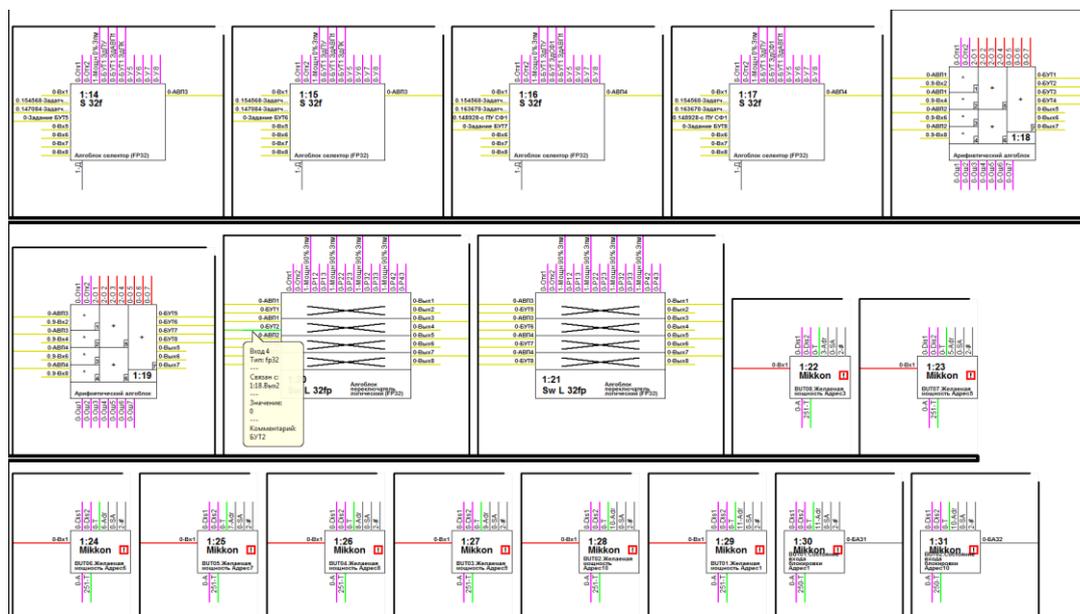


Рис. 2. Часть алгоритма управления тиристорными агрегатами

Интерфейс программирования выполнен в виде набора типовых и сервисных графических блоков, содержащих в себе наборы функций либо служащие для приема и выдачи необходимых сигналов и их преобразования.

Написанный алгоритм позволяет переключать задание мощности между несколькими пультами задатчиками, частично или полностью сбрасывать мощность с нагревателя автоматически при поступлении аварийных сигналов, формировать сигналы аварийной защиты тиристорных агрегатов, транслировать команды управления с пульта кипящего стенда КС в модули нижнего уровня и обрабатывать выходные данные агрегатов, такие как токи тиристоров, мощность нагревателя, напряжение на плитах нагревателя.

Результаты и их обсуждение

Такт работы программы, написанной с помощью алгоритмического программирования среднего уровня, составляет 50 мс, что достаточно для системы управления тиристорными агрегатами. Задание значения мощности нагревателя происходит с высокой частотой обновления, что позволяет задавать мощность плавно. Проведённые испытания внедрённой системы управления показали хорошую сходимость выходных токов и их минимальное отклонение между агрегатами и в пределах ожидаемых величин. На рис. 3 представлен график зависимости изменения значений выходных токов от времени при росте мощности нагревателя.

Рассогласование между токами одного агрегата не превысило 100 А, отклонение токов от ожидаемых величин и выбросы токов также не вышли за пределы 50 А, что позволили плавно наращивать мощность нагревателя при выходе на новые режимы исследования экспериментальной части контура в серии экспериментов по исследованию кризиса теплоотдачи.

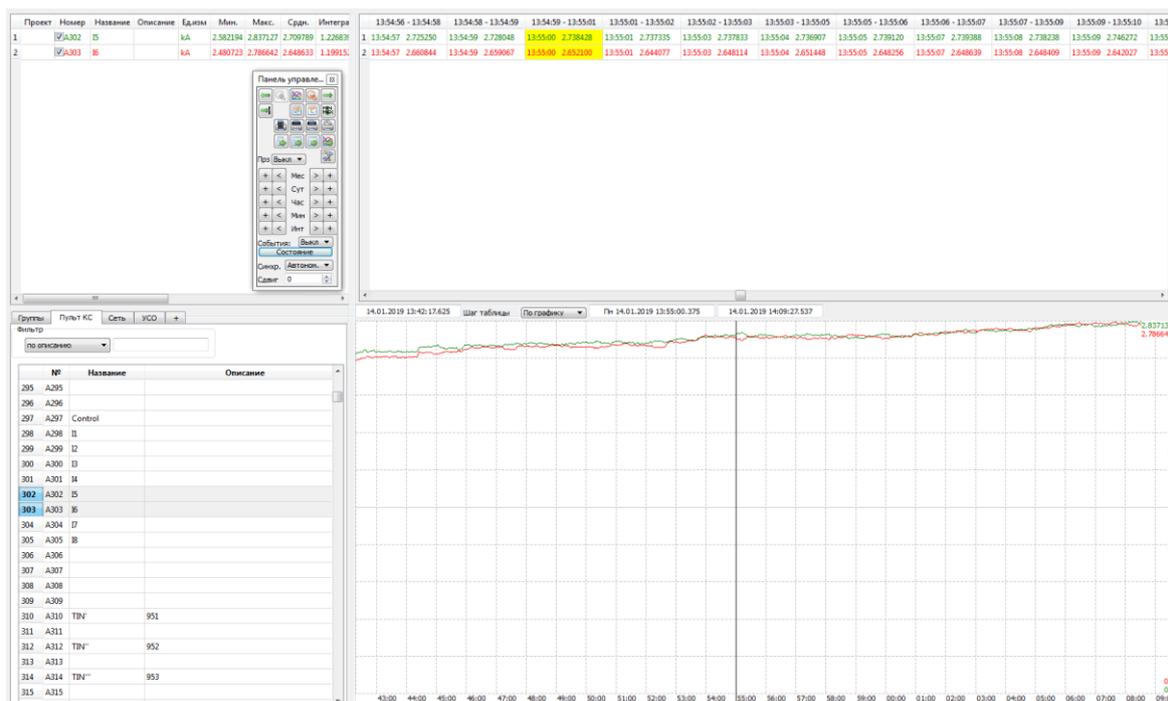


Рис. 3. График зависимости изменения значений выходных токов от времени

С другой стороны, важной проблемой остаётся существенное рассогласование токов разных тиристорных агрегатов, достигающее 400 А, что может негативно сказаться на выдаваемой мощности нагревателя, так как резкое увеличение рассогласования также может привести к неконтролируемому повышению температуры в канале, резкому запариванию трубок экспериментального участка и, как следствие, к запроектному кризису теплоотдачи и разрушению трубок. Необходимо дополнить алгоритм управления тиристорными агрегатами регулирующими органами с заданным эталонным значением тока, ожидаемого в системе при заданной мощности нагревателя с пульта управления.

Заключение

Были изучены тиристорные агрегаты кипящего стенда и модули среднего и нижнего уровня, расположенные на стенде. В соответствии с техническими требованиями и количеством сигналов была разработана структурная схема алгоритма управления. Перед разработкой был проведён анализ и выбор программных средств и аппаратной части системы.

С помощью системы технологического программирования разработан и реализован алгоритм управления тиристорными агрегатами. Разработанное ПО прошло успешные испытания при проведении на кипящем стенде экспериментов по кризису теплоотдачи.

Список литературы

1. Замятин В.Я. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник. - М.: Радио и связь, 1984. - 576 с.
2. Ковалев Ф.И., Мосткова Г.П. Полупроводниковые выпрямители, Энергия 1967. - 478 с.
3. Лебедев В.О. Руководство пользователя MWBridge MLB. 2020 г.

УДК 004.05 + 006

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ АСУ ТП АЭС

ПОЛЕТЫКИН А.Г., ПРОМЫСЛОВ В.Г., СЕМЕНКОВ К.В.,
МЕНГАЗЕТДИНОВ Н.Э., ЖАРКО Е.Ф.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова Российской академии наук
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. Точная оценка архитектуры и характеристик АСУ ТП АЭС является сложной задачей для экспертов и инженеров. В работе рассматривается проблема разработки и применения цифрового двойника для оценки характеристик цифровой системы управления АЭС в течение ее жизненного цикла. Анализируются сценарии применения цифровых двойников на этапах жизненного цикла АСУ ТП АЭС, от проектирования до вывода её из эксплуатации. В работе рассматриваются и обобщаются моделируемые свойства, относящиеся к цифровым и физическим компонентам системы. Особое внимание уделяется сценариям использования цифрового двойника для повышения кибербезопасности АСУ ТП АЭС и управлению изменениями. В работе описывается реализация цифрового двойника для реальной системы верхнего блочного уровня АЭС.

Ключевые слова: цифровой двойник, АСУ ТП, АЭС виртуализация, жизненный цикл, кибербезопасность.

APPLICATION OF THE DIGITAL TWIN AT NPP I&C SYSTEM LIFE CYCLE
POLETIKIN A.G, PROMYSLOV V.G., SEMENKOV K.V., MENGAZETDNINOV N.E.,
ZHARKO E.F.

*V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The precise evaluation of the instrumentation and control (I&C) system design and characteristics is a challenge for experts and engineers. This paper considers the problem of the development and application of a digital twin to assess digital I&C system during its life cycle. We analyze the details of digital twin applications at different lifecycle stages from design to decommissioning. The work reviews and summarizes properties of models concerning the digital and physical components of a I&C system. The other issue of a I&C is increasing cybersecurity threat for NPP, so special attention is paid to the heterogeneous digital twin usage scenarios to improve I&C cybersecurity. The paper also details the digital twin's implementation for a real upper-level control system of a nuclear power plant.

Keywords: cloud computing, cyber physical system, life cycle, digital twin, I&C, NPP, cybersecurity

Введение

Технология цифровых двойников является частью технологии киберфизических промышленных систем Индустрии 4.0. Идея Индустрии 4.0 и сам термин были впервые сформулированы в Германии в 2011 году рабочей группой по видению перспектив развития отрасли [1]. За небольшой период идея и термин получили широкое распространение. В тот период другие страны также проводили исследования подобного рода, и обсуждаемая идея также известна как промышленный Интернет, интеллектуальная промышленность, интеллектуальное производство и т. д. [2,3]. Список цифровых технологий, которые должна использовать компания-производитель в рамках Индустрии 4.0, включает (см., например, [2,4,5]) облачные и туманные вычисления, искусственный интеллект и мобильных автономных роботов, виртуализацию, новые протоколы передачи данных для Интернета вещей, и многие другие. Эти технологии предназначены для создания киберфизических систем (КБФС), которая объединяет цифровые ресурсы и физические, реальные объекты в согласованную среду.

До сих пор не существует однозначного определения термина «цифровой двойник». Например, IBM [6] определяет цифрового двойника как «динамическое виртуальное представление физического объекта или системы, обычно на нескольких этапах ее жизненного цикла. Он использует реальные данные, моделирование или машинное обучение в сочетании с анализом данных, чтобы обеспечить понимание, обучение и рассуждения. Консорциум Industrial Internet [7] полагает, что «цифровой двойник - это формальное цифровое

представление некоторого актива, процесса или системы, которое фиксирует атрибуты и поведение этого объекта, подходящее для связи, хранения, интерпретации или обработки в определенном контексте». Определение W3C [8], на наш взгляд, лучше отражает практические аспекты реализации цифровых двойников контрольно-измерительных систем (систем I&C): «Цифровой двойник - это виртуальное представление устройства или группы устройств, которые находятся в облаке или на граничных узлах. Его можно использовать для представления реальных устройств, которые не могут быть постоянно подключены к сети, или для моделирования новых приложений и служб, прежде чем они будут развернуты на реальных устройствах».

Мы разделяем общее мнение, что цифровой двойник должен обладать некоторыми общими свойствами. Следуя официальным документом Industrial Internet Consortium [7] и Tao et al. [9], приведем некоторые из них:

1. Цифровой двойник может следовать за своим реальным двойником на различных этапах жизненного цикла или в течение какого-то отдельного этапа жизненного цикла.

2. Цифровой двойник должен иметь связь со своим реальным двойником и собирать данные с реального объекта.

3. Цифровой двойник «должен позволять вычислительным и аналитическим моделям анализировать эти данные для описания, диагностики, прогнозирования и моделирования состояний и поведения объектов и систем реального мира» [7].

Предприятия с высоким уровнем риска обычно более консервативны в выборе технологий. Однако концепция Индустрии 4.0 сейчас рассматривается применительно к системам управления атомными электростанциями (АЭС), поскольку она потенциально позволяет повысить эффективность и безопасность эксплуатации таких объектов [10]. Помимо общих свойств, представленных выше, мы со своей стороны в ходе практической реализации цифрового двойника постарались добиться:

- соблюдения баланса между абстрактной моделью и реальными компонентами цифрового двойника.

- управления конфигурацией для установления строгого соответствия цифрового двойника и реальной системы в течение жизненного цикла.

- поддержания высокой актуальности временных характеристик цифрового двойника.

Цифровой двойник представляет собой вычислительную модель и интерфейс обмена данными с реальным объектом.

АСУ ТП АЭС и ее цифровой двойник являются киберфизическими системами, поскольку они объединяют вычисления и управление с восприятием и приведением в действие физической среды. Это потенциально позволяет взаимозаменяемо использовать некоторые программные и аппаратные компоненты в обеих системах: реальных и цифровых.

В этой статье мы обсуждаем общие проблемы моделирования АСУ ТП АЭС, соответствующих Индустрии 4.0, и представляем наш практический результат: реализацию цифрового двойника для подсистемы АСУ ТП АЭС [10,11]. Представленный цифровой двойник представляет новый тип цифровых двойников, «неоднородный» цифровой двойник, который включает имитационные модели и реальные программные и аппаратные компоненты реальной системы для достижения точности моделирования при адекватном отражении системы.

Результаты и их обсуждение

На основе предложенного подхода гетерогенного цифрового двойника спроектирована и реализована гетерогенная цифровая модель системы управления верхнего уровня (СВБУ) АСУ ТП атомной электростанции [11]. СВБУ предлагает функциональные возможности интеграции для различных частей системы АСУ ТП АЭС и обеспечивает взаимодействие всех других систем АСУ ТП АЭС. СВБУ представляет собой современную цифровую сетевую распределенную систему управления. Основные функции СВБУ - мониторинг и контроль состояния АЭС. К ее функциям относятся функции, связанные с безопасностью, и вспомогательные функции; последние - это самодиагностика, архивирование данных о состоянии АЭС в базе данных и обеспечение синхронизации времени для других компонентов АСУ ТП. СВБУ обеспечивает человеко-машинный интерфейс с основным оборудованием АЭС

и содержит около тридцати рабочих станций в типичной конфигурации. Существенной характеристикой системы является ее функционирование в реальном времени. Для повышения надежности СВБУ были приняты проектные меры по обеспечению избыточности системы (резервирование линий связи и вычислительных узлов).

Система имеет модульную архитектуру, что позволяет увеличить количество рабочих мест операторов и обрабатываемой информации. В базовой конфигурации для АЭС общий объем управляемой базы данных составляет около 10^6 сигналов с производительностью около нескольких тысяч сигналов в секунду.

СВБУ состоит (см. Рисунок 1) из серверов, активного и пассивного сетевого оборудования, рабочих станций, вспомогательного оборудования шкафов (источники бесперебойного питания, принтеры и т. д.). Информация передается по сетям Ethernet; все ключевые узлы и пути данных являются избыточными и работают параллельно, обеспечивая резервирование с горячим резервом. СВБУ работает под управлением промышленной операционной системы LICS на базе Linux [13].

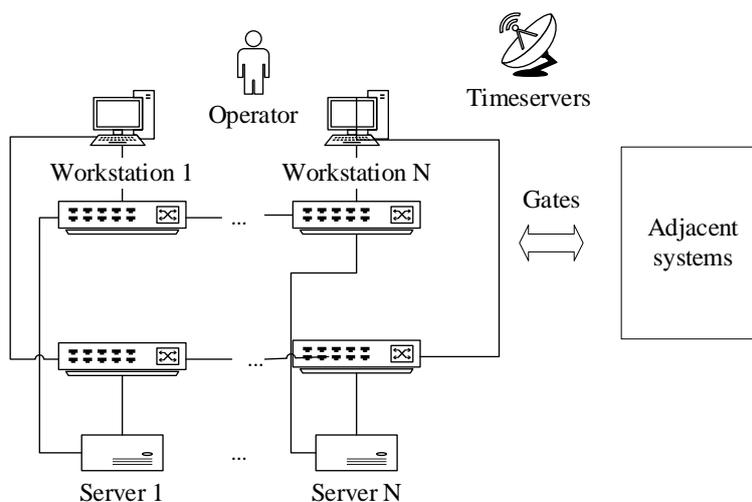


Рис. 1. Структура СВБУ

Цифровой двойник СВБУ объединяет вычислительные, аналитические модели и компоненты оборудования и позволяет описывать, диагностировать, прогнозировать и моделировать состояния и поведение системы. Цифровой двойник СВБУ получает данные от дополнительных программных цифровых двойников смежных систем АЭС. Дополнительные цифровые двойники включают в себя как источники данных на основе моделей, так и некоторые ранее записанные данные из реальной динамики оборудования.

Дополнительные цифровые двойники используются для моделирования динамики функционирования оборудования АЭС для нормальных и некоторых аномальных режимов работы, а так же для прогнозирования и моделирования состояний и поведения реального СВБУ в зависимости от состояния объекта.

Цифровой двойник СВБУ включает в себя некоторые элементы реального оборудования системы СВБУ и около сотни виртуальных компонентов, представляющих компьютеры и сетевые устройства (см. Рисунок 2).

Реальное оборудование включает в себя сервер времени, распределительный шкаф, шкаф рабочего места с операторской панелью, серверный шкаф.

Сервер реального времени действует как источник синхронизации времени через протокол времени (NTP). Аппаратные элементы используются для моделирования поведения вспомогательных устройств в составе рабочих станций и серверных шкафов (например, ИБП и устройства контроля доступа). Виртуальные машины для каждого сервера и рабочей станции физически работают на хост-сервере под управлением ОС LICS и гипервизора QEMU/KVM [14,15]. Физический компьютер рабочей станции также работает под управлением ОС LICS.

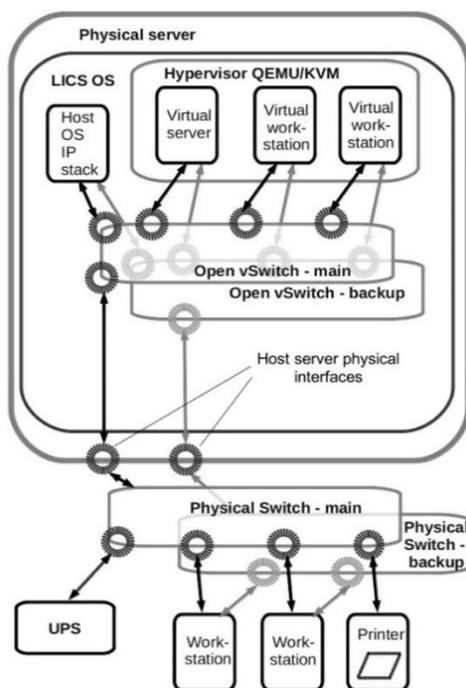


Рис. 2. Архитектура цифрового двойника СВБУ

Заключение

Реализация и применение цифрового двойника для киберфизической системы позволяет снизить затраты на тестирование программного обеспечения, поскольку цифровой двойник более доступен для испытаний в различных режимах. В частности, это проявляется в том, что некоторые ошибки, которые, скорее всего, останутся незамеченными при нормальном тестировании на реальном объекте, обнаруживаются на цифровом двойнике. Более того, можно более одного раза клонировать объект цифрового двойника и таким образом увеличить тестовое покрытие.

Мы продемонстрировали эффективность цифрового двойника в ходе разработки системы управления верхнего блочного уровня (СВБУ) для атомной электростанции. Созданный гибридный цифровой двойник СВБУ включает около сотни виртуальных и реальных объектов (серверы, рабочие станции, сетевое оборудование) и полностью воспроизводит реальные свойства системы, включая избыточность компонентов и сетей. Цифровой двойник СВБУ используется для развертывания системы во время ввода в эксплуатацию и испытаний, измерения и анализа рабочих характеристик СВБУ, тестирования некоторых специальных режимов, которые могут быть затруднены в реальной системе из-за ограничений по стоимости или безопасности, и исправления связанных с ними ошибок. Наш опыт показывает, что процент ошибок, связанных со специальными режимами, составляет около 15–20% от всех ошибок программного обеспечения.

Мы планируем продолжить работу с цифровым двойником на других этапах жизненного цикла СВБУ. Основное внимание будет уделено совершенствованию механизмов синхронизации цифрового двойника и реальной системы, повышению точности моделей, прежде всего, по динамическим и временным характеристикам, а также разработке методик, позволяющих проводить диагностику и прогнозирование состояния системы, оценке ее кибербезопасности и тестированию системы в случае ее модификации

Список литературы

1. Kagermann, H.; Lukas, W.-D.; Wahlster, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. VDI Nachr. 2011, 13, 2–3.
2. Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. In Proceedings of the 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences

- (HICSS), Koloa, HI, USA, 5–8 January 2016, doi: 10.1109/HICSS.2016.488. Available online: https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review (accessed on 27 January 2021).
3. Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; final report of the Industrie 4.0 working group; Forschungsunion: Berlin, Germany, 2013; pp. 1–79.
 4. Schumacher, A.; Erol, S.; Sihn, W. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP* 2016, 52, 161–166, doi:10.1016/j.procir.2016.07.040.
 5. Zhong, R.Y.; Xu, X.; Klotz, E.; Newman, S.T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering* 2017, 3, 616–630, doi:10.1016/J.ENG.2017.05.015.
 6. Stanford-Clark, H.; Frank-Schultz, E.; Harris, M. What are digital twins? 2019. Available online: <https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/what-are-digital-twins/> (accessed on 25 February 2021).
 7. Industrial Internet Consortium. Digital Twins for Industrial Applications. Definitions, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases; An Industrial Internet Consortium White Paper, v. 1.0, 2020. Available online: https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf (accessed on 25 February 2021).
 8. W3C. Web of Things (WoT) Architecture. W3C Recommendation 9 April 2020. Available online: <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-architecture-20200409/> (accessed on 25 February 2021).
 9. Tao, F.; Zhang, M.; Liu, Y.; Nee, A.Y.C. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2018, 67, 169–172, doi:10.1016/j.cirp.2018.04.055.
 10. Промыслов В.Г., Семенов К.В., Шумов А.С. Синтез архитектуры кибербезопасности для систем управления атомных станций // Проблемы управления. 2019. № 3. с. 61-71..
 11. Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г. Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и телемеханика. – 2006. – Т. 5. – с. 65-79.
 12. Семенов К.В., Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г., Менгазетдинов Н.Э. Validation of Complex Control Systems with Heterogeneous Digital Models in Industry 4.0 Framework // *Machines*. 2021. vol. 9, iss. 3. С. 1-17, <https://www.mdpi.com/2075-1702/9/3/62>.
 13. LICS Registration Certificate, 2019. Available online: <https://www1.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=07B0B75D-B08F-4A7B-BF76-011ED855B976> (accessed on 27 January 2021).
 14. KVM Documentation. Available online: <https://www.linux-kvm.org/page/Documents> (accessed on 27 January 2021).
 15. QEMU Documentation. Available online: https://wiki.qemu.org/Main_Page (accessed on 27 January 2021).

УДК 004.942

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ WRF ПРИ
МОДЕЛИРОВАНИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА БЕЛАЭС**

ШАМЫНА А.Ю., ЛАБОХА А.К.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассмотрена целесообразность использования модели численного прогноза погоды WRF как источника метеоданных при моделировании переноса радиоактивных веществ в атмосфере, кратко описаны технические детали WRF. В качестве опорного аварийного сценария выбран сценарий максимальной проектной аварии, гипотетически произошедшей на БелАЭС 12 UTC 21.03.2021. Проведены 4 численных эксперимента в СППР JRODOS с метеоданными GFS и WRF, а также моделями атмосферной диффузии RIMPUFF и LASAT. Дана оценка потенциального загрязнения подстилающей поверхности I-131 от 5 до 100 км от БелАЭС.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, БелАЭС, численный прогноз погоды, СППР.

**USING THE NUMERICAL WRF WEATHER FORECAST MODEL IN SIMULATION OF
EMERGENCY SITUATIONS AT BELNPP**

ARTSIOM.Y.SHAMYNA, ALEXANDR.K.LABOKHA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The expediency of using the numerical weather forecast model WRF as a source of meteorological data in modeling the transport of radioactive substances in the atmosphere is considered, the technical details of the WRF are briefly described. As a reference emergency scenario, the scenario of the maximum design basis accident hypothetically occurred at the BelNPP 12 UTC on 03/21/2021 was chosen. Four numerical experiments were carried out in the JRODOS DSS with the GFS and WRF meteorological data, as well as the RIMPUFF and LASAT atmospheric diffusion models. An assessment of the potential contamination of the underlying surface of I-131 from 5 to 100 km from BelNPP is given.

Keywords: nuclear pollution, BelNPP, NWP, DSP, WRF, JRODOS.

Введение

Оперативные оценки во время аварии, прогнозирование её развития и возможного ущерба являются неотъемлемой частью аварийного реагирования на любую чрезвычайную ситуацию с радиологическими последствиями. В настоящее время существует большое количество систем поддержки принятия решений (СППР), которые позволяют оценить прогнозируемую радиационную обстановку на различных стадиях развития аварийной ситуации. Однако результат их работы напрямую зависит от качества входных параметров: характеристик выброса, погодных условий, параметров рельефа и т.д.

В настоящей работе рассматривается возможность применения данных численной прогнозной модели погоды *Weather Research and Forecasting (WRF)* [1] в качестве исходных для краткосрочного аварийного прогноза, рассчитанных на основе метеоданных *Global Forecast System (GFS)* [2], которые поставляются национальной метеорологической службой США. Данные WRF отличаются от исходных GFS более высоким пространственным и временным разрешением, что достигается благодаря численному решению негидростатических уравнений и использованию вложенных расчетных сеток с учетом локальных особенностей местности. Данные GFS используются для инициализации начальных значений и задания граничных условий WRF.

Для прогнозирования переноса радиоактивных веществ в результате радиационной аварии, а также ожидаемых дозовых нагрузок в данной работе используется СППР JRODOS [3] с моделями атмосферной диффузии RIMPUFF [4] и LASAT [5]. В качестве базового аварийного сценария был выбран сценарий максимальной проектной аварии (МПА), описанный в отчете об оценке воздействия на окружающую среду Белорусской АЭС [6].

Подготовка модели WRF для проведения эксперимента

Прогнозная модель *WRF* поставляется в виде открытого исходного кода, написанным преимущественно на языке программирования *Fortran*. Такой подход позволяет гибко настраивать модель на уровне исходного кода с учетом используемой платформы и решаемых задач. Однако в таком случае для запуска модели необходимо ее предварительно скомпилировать. Кроме компилятора необходима установка требуемых библиотек, что несколько затрудняет использование модели для неопытных пользователей. Для упрощения разворачивания окружения *WRF* на различных платформах предлагается использовать контейнеризатор приложений *Docker*. Эксплуатация *WRF* предполагается на ОС *Linux*.

В настоящей работе используется версия *WRF* 4.1.5, исходный код которой был взят с репозитория *GitHub* [7]. Запуск модели требует предварительной подготовки данных. Для этих целей используется система предварительной обработки *WRF Pre-Processing System (WPS)*, состоящая из трех модулей. Аналогично *WRF*, *WPS* компилируется из исходного кода. Версия *WPS* совпадает с версией *WRF*. Для автоматизации последовательного запуска модулей *WPS* и последующего запуска *WRF* был написан скрипт.

Описание проведения численного эксперимента

Для проверки гипотезы о возможности и целесообразности использования *WRF* в настоящей работе предлагается рассмотреть сценарий МПА на БелАЭС для нескольких наборов данных: *GFS* и построенной на его основе *WRF*. Также предполагается рассмотреть моделирование выбранного аварийного сценария с использованием нескольких моделей атмосферной диффузии: *RIMPUFF* и *LASAT*.

Данные о погоде были выбраны за 21.03.2021 г. Для указанной даты были загружены наборы прогнозных метеоданных *GFS* с файлового хранилища *NCAR (National Center for Atmospheric research)* в формате *GRIB2*. Набор данных содержит множество значений метеопараметров с привязкой к пространственной сетке для различных изобарических высот. Длительность прогноза составляет 48 часов с шагом в 3 часа. Пространственное разрешение сетки данных составляет 0.5° (для широт Беларуси размер ячейки составляет ~ 54 км в северном направлении и ~ 30 км в восточном).

Затем загруженные данные использовались как исходные для запуска *WRF*. Пространственное разрешение полученных данных составило ~ 5 км, а временное – 1 час. На рис. 1 представлена картографическая визуализация температуры воздуха на высоте 2 м за 06 UTC 21.03.2021 в радиусе 100 км от БелАЭС из двух наборов данных – *GFS* и *WRF*.

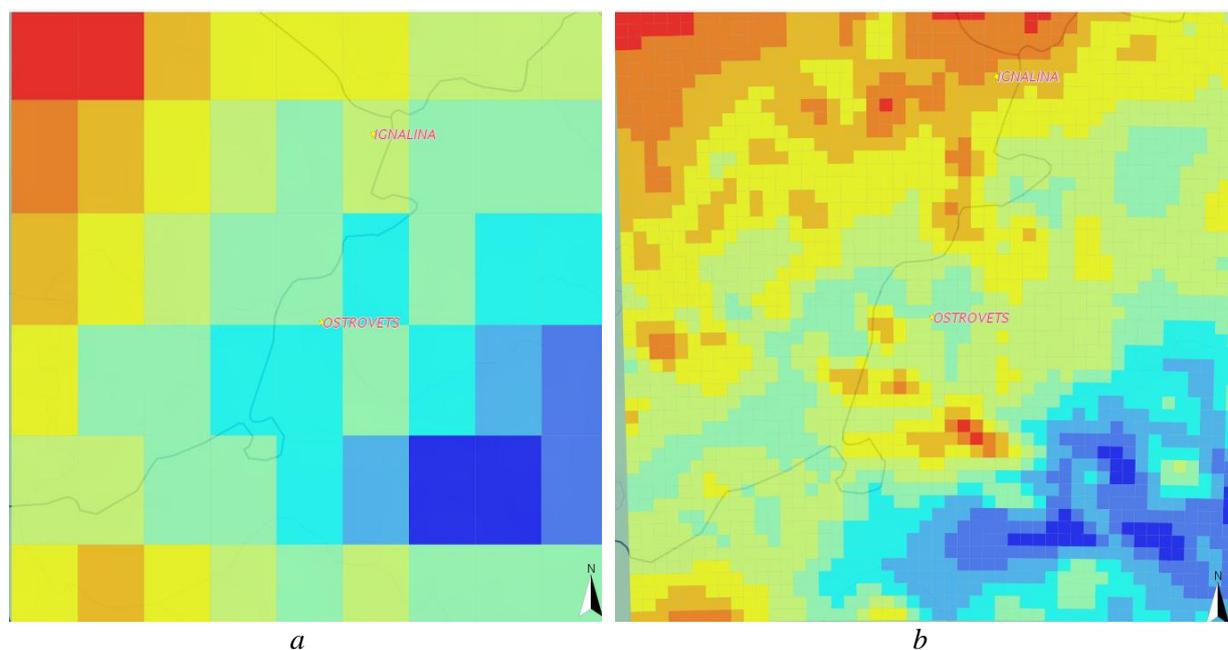


Рис. 1. Температура воздуха на высоте 2 м за 06 UTC 21.03.2021: a – *GFS*; b – *WRF*

Аварийный сценарий МПА предполагает выход большого количества радиоактивных веществ (РВ) в атмосферу за 1 час. Основные характеристики аварийного выброса представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики выброса РВ максимальной проектной аварии

Наименование	Значение
Период моделирования	24 часа
Продолжительность выброса	1 час
Динамика верхней и нижней границы выброса	21-25 м
Эффективный диаметр источника	3 м
Скорость выхода	1,8 м/с
Перегрев	30 °С
Активность I ₁₃₁ , Бк	3,1+E15
Активность Cs ₁₃₇ ,Бк	3,5+E14

Предполагается, что инцидент произошел в 12.00 UTC 21.03.2021. С учетом вышесказанного, а также параметров выброса были заданы исходные параметры моделирования в созданном проекте *JRODOS*. Для моделирования использовалась цепочка моделей «*EmergencyLite*», которая кроме моделей переноса РВ и оценки доз облучения включает модели по загрязнению продуктов питания и принятию контрмер.

Было выполнено 4 численных эксперимента, которые отличались между собой моделями атмосферной диффузии и используемыми наборами метеоданных. Рассмотрены модель атмосферной диффузии *RIMPUFF* с наборами метеоданных *GFS* и *WRF*, а также *LASAT* с наборами *GFS* и *WRF*.

Полученные результаты загрязнения подстилающей поверхности изотопом I₁₃₁ через 24 часа (22.03.2021 12 UTC) после гипотетического инцидента представлены на рисунках ниже (рис. 2, 3, 4, 5).

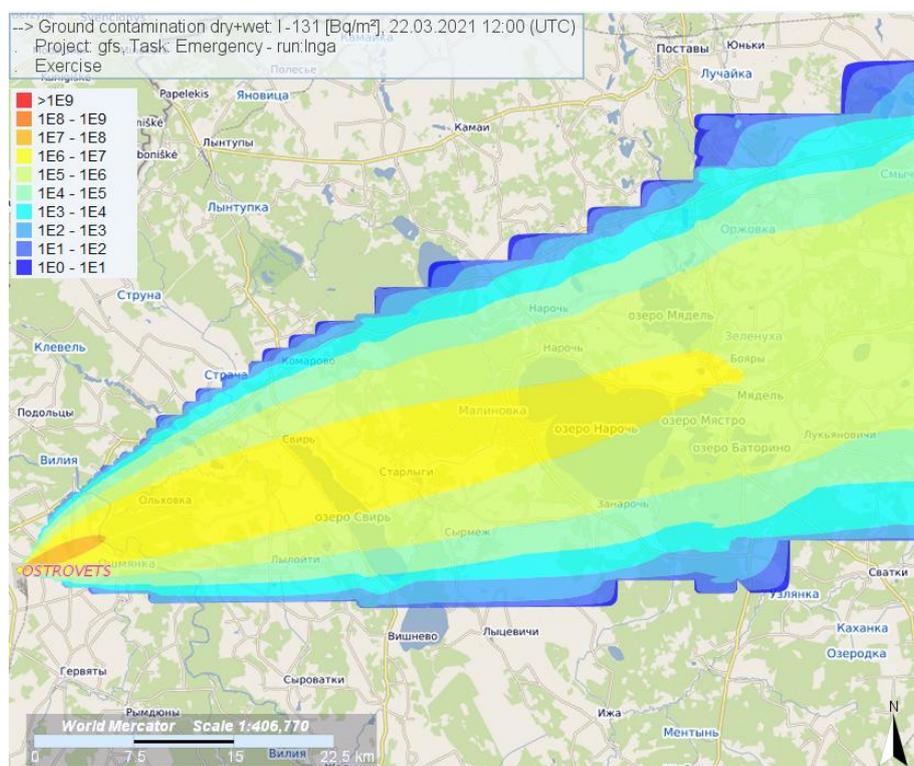


Рис. 2. Загрязнение подстилающей поверхности изотопом I₁₃₁ на 22.03.2021 12 UTC, полученное с использованием *GFS* и *RIMPUFF*, Бк/м²

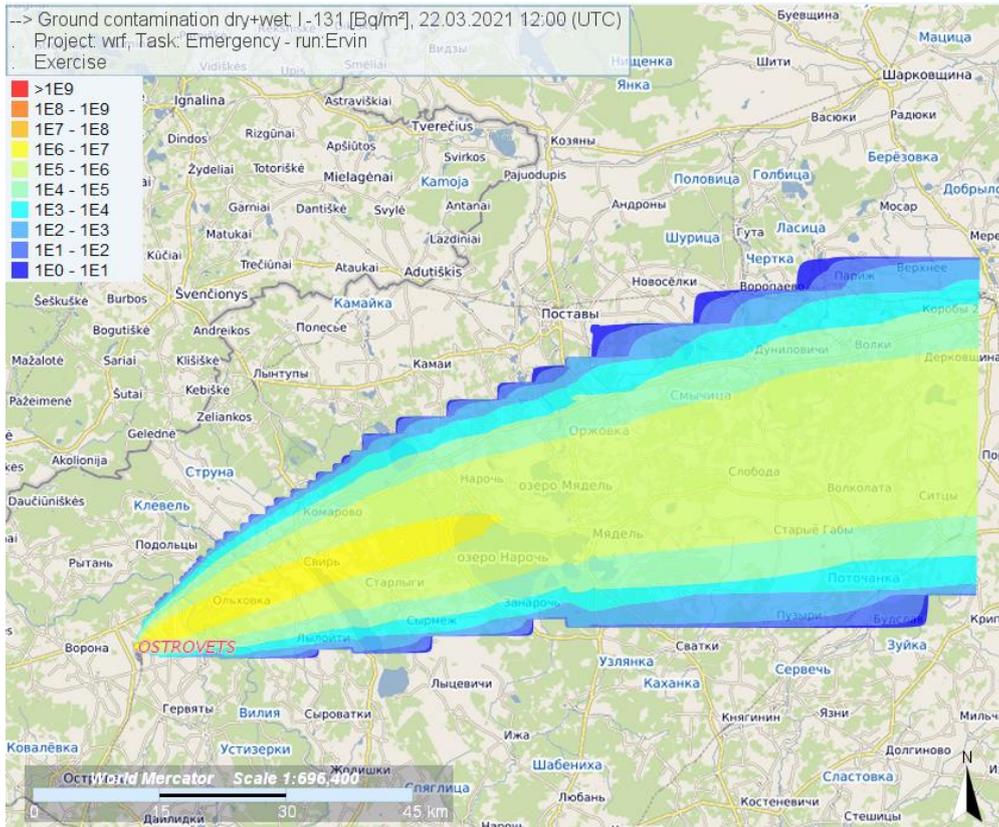


Рис. 3. Загрязнение подстилающей поверхности изотопом I_{131} на 22.03.2021 12 UTC, полученное с использованием WRF и RIMPUFF, Бк/м²

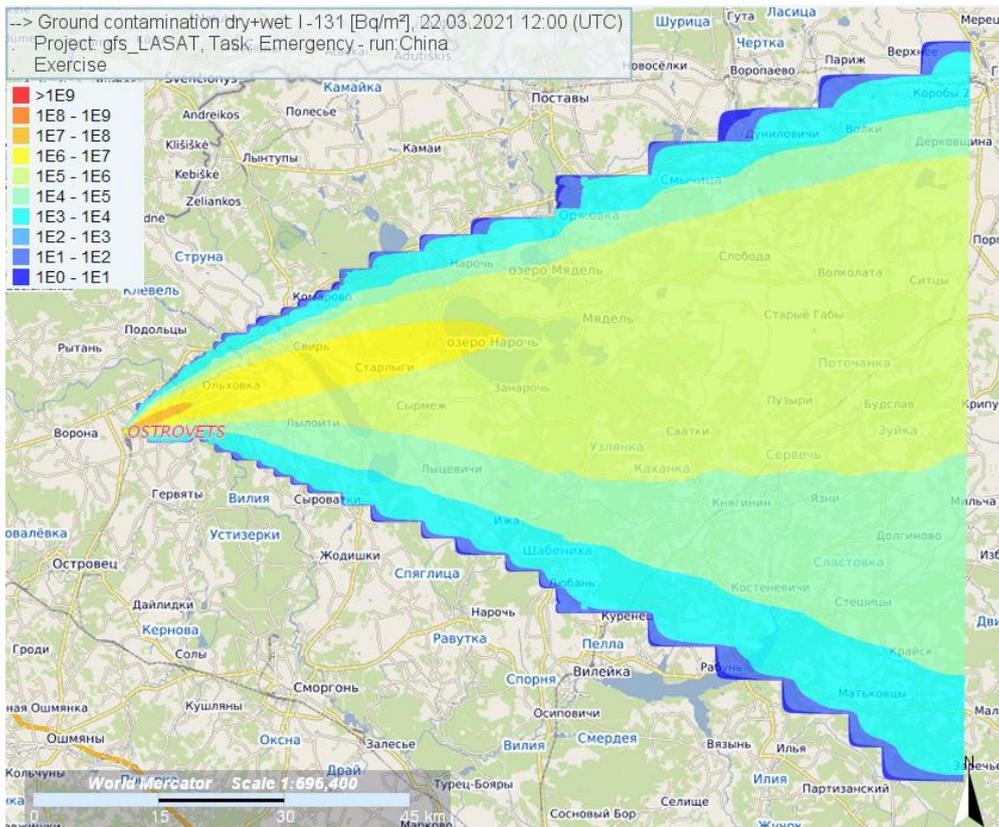


Рис. 4. Загрязнение подстилающей поверхности изотопом I_{131} на 22.03.2021 12 UTC, полученное с использованием GFS и LASAT, Бк/м²

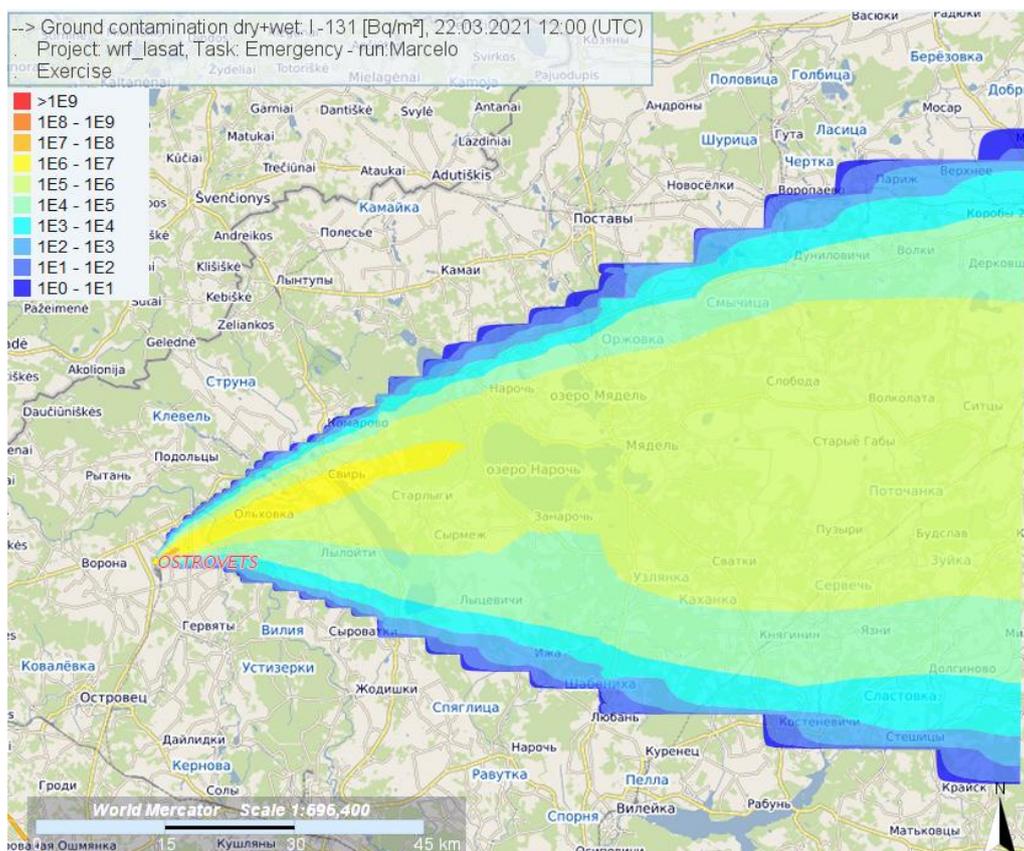


Рис. 5. Загрязнение подстилающей поверхности изотопом I_{131} на 22.03.2021 12 UTC, полученное с использованием WRF и LASAT, Бк/м²

На рис. 6 представлены максимальные значения загрязнения подстилающей поверхности I-131 на расстоянии от 5 до 100 км от БелАЭС, полученные в результате проведенных численных экспериментов.

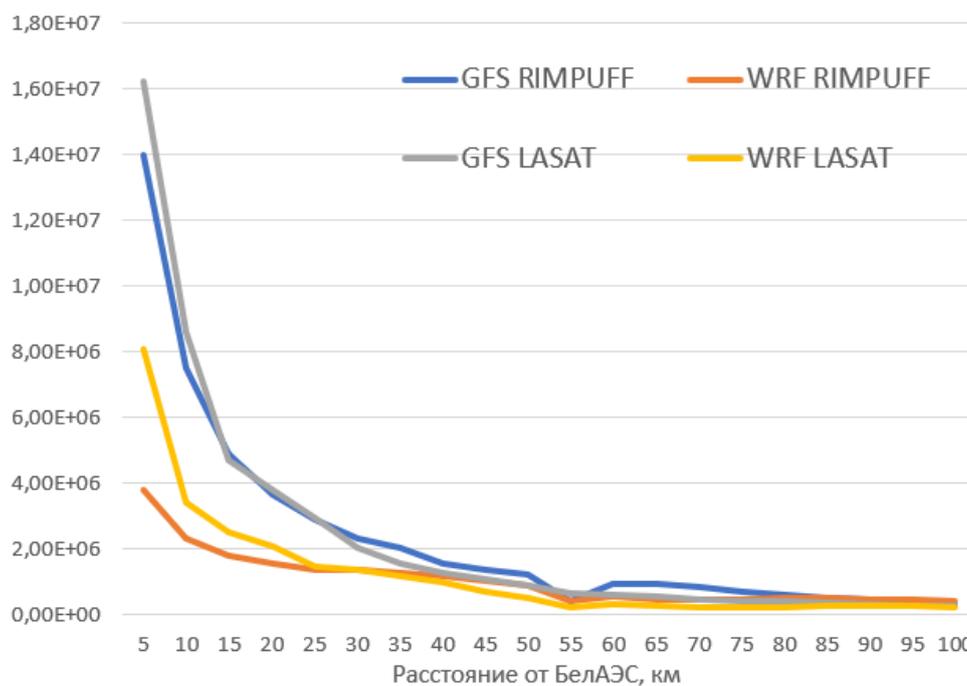


Рис. 6. Максимальные значения плотности загрязнения подстилающей поверхности I_{131} , Бк/м²

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования метеоданных модели *WRF* в контексте моделирования аварийной ситуации с выбросом РВ в атмосферу. Созданные в результате ее работы метеоданные более высокого пространственного и временного разрешения по сравнению с исходными данными *GFS* позволяют, вероятно, более точно оценить перенос РВ в результате аварийного инцидента. Особенно перспективной выглядит возможность подключения модуля ассимиляции данных наблюдений, использование которого также потенциально может увеличить качество и точность прогноза.

Однако использование *WRF* требует определенных навыков, а также дополнительного времени для расчета, что может негативно сказаться на скорости принятия защитных мер в случае возникновения аварийной ситуации. Поэтому целесообразность использования данных *WRF* требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Weather Research and Forecasting Model | MMM: Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory [Электронный ресурс]. – 2021 – Режим доступа: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model> – Дата доступа: 23.03.2021
2. Global Forecast System| National Centers for Environmental Information [Электронный ресурс]. – 2021 – Режим доступа: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/globalforecast-system-gfs> – Дата доступа: 23.03.2021
3. JRodOS: An off-site emergency management system for nuclear accidents, <https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/> – [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://resy5.iket.kit.edu/JRODOS/> – Дата доступа: 24.03.2021
4. Rodos, & Thykier-Nielsen, S & Deme, Sandor & Mikkelsen, Torben. (1999). Description of the atmospheric dispersion module RIMPUFF.
5. LASAT – A computer program for the calculation of pollutant dispersion in the atmosphere Janicke Consulting Environmental Physics [Электронный ресурс]. – 2021 – Режим доступа: <https://www.janicke.de/en/lasat.html> – Дата доступа: 24.03.2021
6. Validation of Investments in the Nuclear Power Plant Construction in the Republic Of Belarus. Book 11. Environmental Impact Assessment. Part 8. EIA Report. Part 8.3. NPP Environmental Impact Assessment", 2010, [online] Available: <http://www.belaes.by/images/Part8.3.pdf>
7. WRF-ARW Modeling System | The official repository for the Weather Research and Forecasting (WRF) model [Электронный ресурс]. – 2021 – Режим доступа: <https://github.com/wrf-model/WRF> – Дата доступа: 24.03.2021

УДК 621.311.25-049.5:006(476)

**АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ АВАРИЙНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

ДРОБОТ С.В., РУСАКОВИЧ В.Н., САЦУК С.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В работе проведен анализ нормативных правовых документов Республики Беларусь, Федеральных норм и правил Российской Федерации, Требований Государственной инспекции ядерного регулирования Украины и документов МАГАТЭ, устанавливающих требования к системам аварийного электроснабжения атомных электростанций, и даны рекомендации для разработки нормативного документа Республики Беларусь, учитывающего современный опыт проектирования и эксплуатации атомных электростанций.

Ключевые слова: атомная электростанция, система аварийного электроснабжения, ядерная и радиационная безопасность, принцип независимости, принцип единичного отказа, резервирование, принцип разнообразия, отказ по общей причине.

**ANALYSIS OF REQUIREMENTS FOR EMERGENCY POWER SYSTEMS OF NUCLEAR
POWER PLANTS**

SIARHEI V. DROBAT, ULADZIMIR M. RUSAKOVICH, SIARHEI M. SATSUK

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The paper analyzes the regulatory legal documents of the Republic of Belarus, Federal norms and rules of the Russian Federation, Requirements of the State Inspectorate for Nuclear Regulation of Ukraine and IAEA documents establishing requirements for emergency power systems for nuclear power plants, and gives recommendations for the development of a regulatory document of the Republic of Belarus, taking into account modern experience of design and operation of nuclear power plants.

Keywords: nuclear power plant, emergency power system, nuclear and radiation safety, principle of independence, single failure principle, redundancy, principle of diversity, common cause failure.

Введение

Важную роль в обеспечении безопасности атомной электростанции (АЭС) выполняет система аварийного электроснабжения (САЭ), основное назначение которой состоит в снабжении электроэнергией заданного качества электродвигателей, механизмов и другого оборудования систем безопасности АЭС во всех проектных авариях, в том числе в режиме полного обесточивания. Таким образом безопасность АЭС зависит от регулирующих требований к их САЭ, установленных для этапов проектирования и эксплуатации.

В связи с постоянным совершенствованием технологий и научных знаний, накоплением международным сообществом опыта проектирования и эксплуатации АЭС, актуальной является задача проведения сравнительного анализа требований Республики Беларусь и международных подходов в установлении требований к САЭ и обновления регулирующих требований Республики Беларусь с целью обеспечения наивысших реально возможных стандартов безопасности для защиты персонала, населения и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующих излучений при работе АЭС.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время в Республике Беларусь действуют нормы и правила в области ядерной и радиационной безопасности, устанавливающие требования к САЭ АЭС, введенные в действие в 2010 г. [1, 2]. За период, прошедший с 2010 г., в Серии норм безопасности МАГАТЭ публикация № SSR-2/1 «Безопасность атомных электростанций: проектирование», устанавливающая проектные требования в отношении конструкций, систем и элементов (компонентов) АЭС, была обновлена дважды – в 2012 и 2016 гг. [3]. Обновилась публикация МАГАТЭ № SSG-34, устанавливающая требования и к системам электроснабжения, важным для безопасности атомных электростанций [4]. Федеральные нормы и правила Российской Федерации, устанавливающие требования к САЭ АЭС, утверждены в 2011 г. [5]. Документ

Украины, определяющий требования к системам электроснабжения, важным для безопасности атомных электростанций, утвержден в 2015 г. [6].

В ходе работы проведен сравнительный анализ перечисленных выше документов, в котором основное внимание уделялось соблюдению основных принципов проектирования и критериев безопасности, определенных в документе МАГАТЭ [3].

Требования по соблюдению принципов независимости и единичного отказа. Документ МАГАТЭ [3], устанавливающий конкретные требования безопасности к проекту АЭС, определяет Требование 21 по соблюдению принципа независимости в системах безопасности. В документе [4, п.5.54, п.5.55, п.7.24, п.7.56 и др.] детализируются требования к системам электроснабжения в части соблюдения принципа независимости. Требование 25 документа [3] определяет необходимость применения критерия единичного отказа в проекте АЭС. В документе [4, п.7.23 – п.7.25 и др.] проводится детализация этого требования в отношении САЭ.

В Федеральных нормах и правилах Российской Федерации [5] требования в части соблюдения принципа независимости определены в пп. 9, 16, 18, 19, 48, 57, а требования по соблюдению принципа единичного отказа не приводятся.

Требования к системам электроснабжения в части соблюдения принципов независимости и единичного отказа при проектировании САЭ определены в Требованиях Государственной инспекции ядерного регулирования Украины [6].

Документы Республики Беларусь [1-2] содержат требования к соблюдению принципа независимости, но для их конкретизации необходимо выполнить ряд уточнений, и не содержат требований к соблюдению принципа единичного отказа в САЭ.

Требования по соблюдению принципа резервирования содержатся в документах Республики Беларусь [1-2], в Федеральных нормах и правилах Российской Федерации [5], в документе Государственной инспекции ядерного регулирования Украины [6].

Требования по соблюдению принципов разнообразия и отказов по общей причине. Документ МАГАТЭ [3] содержит Требование 24, в котором закрепляется необходимость с целью достижения заданной надежности оборудования использовать принцип разнообразия. В документе МАГАТЭ [4, п.5.42-5.51] конкретизируются и детализируются требования к системам электроснабжения в части соблюдения принципа разнообразия.

Требования по соблюдению принципа разнообразия в Федеральных нормах и правилах Российской Федерации [5] не приводятся и отсутствуют в ТНПА Республики Беларусь [1-2].

Требование по использованию принципа разнообразия при проектировании САЭ установлено в документе Государственной инспекции ядерного регулирования Украины [6, п. 5.1.12].

В Федеральных нормах и правилах Российской Федерации [5] приводятся также требования по надежности и соблюдению принципа отказов по общей причине (п. 23), по техническому обслуживанию и ремонту (пп. 27,28). Аналогичные требования установлены в документе Украины [6, п. 2.8, 2.11, 5.1 и др]. ТНПА Республики Беларусь [1-2] также содержат указанные требования.

Требования к аккумуляторным батареям и резервным дизельным электростанциям САЭ. Имеется различие в требованиях к аккумуляторным батареям САЭ, установленных ТНПА Республики Беларусь [1-2] и в документе МАГАТЭ [4, п.7.87-7.95]. В Федеральных нормах и правилах Российской Федерации [5] содержатся требования к типу батарей (п.71), условиям их заряда и подзаряда (п. 73). Украинские требования к аккумуляторным батареям САЭ [6, п. 5.2.12 – 5.2.12] в достаточной степени гармонизированы с рекомендациями МАГАТЭ.

Федеральные нормы и правила Российской Федерации [5] также устанавливают требования к резервным дизельным электростанциям (РДЭС) САЭ. Это относится к типу дизель-генераторов (п. 76), условиям их размещения (пп. 79-81), готовности к пуску (п. 83), технического обслуживания (п. 87). Требования к РДЭС, установленные в документе Украины [6, п. 7.1 – 7.17], практически соответствуют рекомендациям МАГАТЭ. ТНПА Республики Беларусь [1-2] устанавливают требования к РДЭС, которые по ряду пунктов требуют приведения в соответствие к требованиям МАГАТЭ [4, п.7.36-7.48].

Требования безопасности, обусловленные связью с энергосистемой. В документе МАГАТЭ [3] содержится Требование 41, определяющее, что нарушения в работе энергосистемы, в том числе колебания напряжения и частоты сетевого энергоснабжения, не должны угрожать функциональности узлов АЭС, важных для безопасности. Специальное руководство по безопасности МАГАТЭ [4, п. 2.29 – 2.31, п.6.2 – 6.6] детализирует требования к проекту системы электроснабжения АЭС устойчивой к нарушениям в работе энергосистемы.

Федеральные нормы и правила Российской Федерации [5] не устанавливают требований безопасности, обусловленных связью с энергосистемой.

Документ Украины [6, п. 5.3.3 – 5.3.4] устанавливает требования к проекту АЭС по выполнению анализа и определения основных критериев влияния энергосистемы на надежность и безопасность эксплуатации энергоблоков АЭС (вероятность обесточивания АЭС с отказом САЭ и др.), а также принятия дополнительных мер для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС.

В НП ЯРБ Республики Беларусь [1-2] отсутствуют какие-либо требования к проектированию САЭ при их энергоснабжении от энергосистемы с нестабильными значениями напряжения и частоты электрической энергии.

Заключение

Проведен сравнительный анализ требований, установленных к САЭ в ТНПА Республики Беларусь [1-2], документах МАГАТЭ [3-4], Федеральных нормах и правилах Российской Федерации [5], Требованиях Государственной инспекции ядерного регулирования Украины [6], и представлены рекомендации для разработки нормативного документа Республики Беларусь, учитывающего современный опыт проектирования и эксплуатации АЭС.

Список литературы

1. НП ЯРБ Общие положения по устройству и эксплуатации систем аварийного электроснабжения атомных электростанций, утвержденные постановлением МЧС Республики Беларусь от 11.05.2010 № 19. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/4b3/postanovlenie_mchs_19.pdf (дата обращения: 05.03.2021).
2. НП ЯРБ Правила проектирования систем аварийного электроснабжения атомных электростанций, утвержденные постановлением МЧС Республики Беларусь от 11.05.2010 № 19. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/76c/postanovlenie_mchs_19.pdf (дата обращения: 05.03.2021).
3. Безопасность атомных электростанций: проектирование. Нормы безопасности МАГАТЭ. Конкретные требования безопасности. № SSR-2/1 (Rev. 1) // МАГАТЭ, Вена, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1715_R_1rev1_web.pdf (дата обращения: 05.03.2021).
4. Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide. No. SSG-34 // IAEA, Vienna, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1673web-53477409.pdf> (дата обращения: 05.03.2021).
5. НП-087-11 «Требования к системам аварийного электроснабжения атомных станций», утвержденные приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации от 30.11.2011 № 671. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.secncrs.ru/documents/nps/НП-087-11/НП-087-11_conv.pdf (дата обращения: 05.03.2021).
6. НП 306.2.205-2016. Вимоги до систем електропостачання, важливих для безпеки атомних станцій. Затверджено наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 24.12.2015 № 234. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0078-16#Text> (дата обращения: 05.03.2021).

УДК 621.382

ОСНОВЫ ТЕОРИИ АТОМА ВОДОРОДА ДЛЯ ЗАДАЧ СИНТЕЗА КВАНТОВО-ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

КОБЯК И.П.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. На основе нетрадиционной концепции формирования линейчатого спектра атома водорода получено уравнение, необходимое для компьютерных расчетов энергии, излучаемой электроном при переходе с некоторого текущего энергоуровня на радиус приемник r_0 . Приведенное решение энергетического уравнения позволило вывести формальные соотношения, необходимые для расчетов значений радиусов энергоуровней атома водорода и, соответственно, скоростей электрона на данных орбитах. Прикладной аспект рассмотренной методологии состоит в использовании результатов выполненных расчетов для задач синтеза и анализа квантово-электронных схем.

Ключевые слова: атом водорода, центроаффинные пространства, Лоренц-фактор, энергия излучения, релятивистская масса.

FUNDAMENTALS OF THE THEORY OF A HYDROGEN ATOM FOR PROBLEMS SYNTHESIS OF QUANTUM ELECTRONIC CIRCUITS

KABIAK I.P.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. On the basis of the unconventional concept of the formation of the line spectrum of the hydrogen atom, an equation is obtained that is necessary for computer calculations of the energy emitted by an electron during the transition from a certain current energy level to the receiver radius. The given solution of the energy equation made it possible to derive the formal relations necessary for calculating the values of the radii of the energy levels of the hydrogen atom and, accordingly, the velocities of the electron in these orbits. The applied aspect of the considered methodology consists in using the results of the performed calculations for the problems of synthesis and analysis of quantum-electronic circuits.

Key words: hydrogen atom, centroaffine spaces, Lorentz factor, radiation energy, relativistic mass.

Введение

Предлагаемая в данной работе методология исследования физических систем путем рассмотрения явлений с двух точек зрения позволила сформировать уравнения, связывающие природу взаимодействия материальных частиц Re -пространства с учетом релятивистских скоростей не равных классической скорости света. В частности, в статье предполагается, что движение электрона в поле ядра, определяет известную энергетическую связь реализаций материи различных состояний, а именно: излучаемой плазмы и твердотельного остатка электрона в форме энергетического объекта вращения. При этом в решении поставленной задачи учитывается, что классические подходы к составлению уравнений в теоретических исследованиях «в силу» инерционности взглядов и неочевидности квантово-механических явлений зачастую приводят к явному нарушению физико-математической системности в соотношениях и, соответственно, в результатах проводимых испытаний.

С точки зрения теории представляется неправомерным формирование уравнений для параметров водородоподобных атомов с использованием классической электротехники. Данное утверждение следует из того, что движение электрона характеризуется взаимодействием с полями ядра, имеющими совершенно особые свойства по отношению к вакууму или материи третьего измерения. Таким образом, основой для расчетов атома водорода может служить только информация, полученная в результате практических измерений или косвенно-расчетные величины. Соответственно и представленные в данной работе аналитические исследования и выводы сделаны на основе постоянных и соотношений квантовой механики с учетом установления их реальной природы и физико-математической системности.

Уравнение для энергии излучения электрона

Основой для расчета принципа взаимодействия элементарных энергий, выступающих в качестве аргументов в задачах решаемых квантово-механическими подхемами, может служить физика излучений в водородоподобных атомах. Так, в общем случае, известно, что в процессе собственного Re -пространственного движения масса электрона может находиться на строго определенных энергоуровнях центроаффинных пространств ядра. При этом классический переход к радиусу-приемнику сопровождается формированием Re -пространственного спектра, описываемого для атома водорода обобщенной формулой Бальмера:

$$\omega_{\lambda,n} = \frac{R_1}{20} \left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad R_1 = 2,07 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}, \quad (1)$$

где $\omega_{\lambda,n}$ - частота излучения энергии электроном при переходе с энергоуровня λ, n на соответствующий уровень серии Лаймана ($1, \lambda$) или с уровня $\lambda = 1, n$ на боровский радиус r_0 , R_1 - значение постоянной Ридберга. При этом коррекция равенства (1) делением известной постоянной на 20 связана с необходимостью упомянутой выше физико-математической системности результатов, подтвержденной в ходе последующих исследований атома.

Недостаток данного формального подхода к формированию спектра состоит в рассмотрении нулевого радиуса как фиксированного и неизменяемого параметра, что, однако, противоречит всем природным концепциям существования материи.

В рамках предлагаемого не классического подхода к рассмотрению природы излучения энергии электроном будем считать, что известные «пинг-понг» механизмы в атоме отсутствуют, а переменным по величине параметра является сам нулевой радиус. Регулярность и циклическая повторяемость радиуса r_0 в рамках данной концепции приводит к одношаговому перемещению электрона на орбиту-приемник. Однако определенная природная регулярность указанного явления наводит на известную мысль о известном «пинг-понг» процессе излучения. В сформулированных условиях притяжение атомного ядра определяет излучение квантов заряженным электроном при перемещении последнего с радиуса $r_{\lambda,n}$ всегда и только на флуктуирующий радиус r_0 . При этом для $\lambda > 1$ радиус-приемник равен $r_0 = r_{1,n}$, а для $\lambda = 1$ - боровскому r_0 . Иными словами, если текущее излучение принадлежит серии с большим, чем классический радиус r_0 радиусом-приемником, то следует считать, что вся энергия излучилась при переходе на соответствующую орбиту $r_{1,n}$, очередное же обретение энергии на данной орбите осуществляется аналогично процессу поглощения энергии на боровском радиусе r_0 . Если же линии спектра излучения принадлежат серии Лаймана, то излучение в точности заканчивается на самом боровском радиусе.

Используя данный подход к анализу механизмов движения электрона в атоме, в соответствии с равенством для энергии, излучаемой субнаночастицей (электроном или просто наночастицей), движущейся бесконечно малый квант времени по траектории радиуса $r_{\lambda,n}$, можно записать уравнение:

$$E_{sum} = E_{\lambda,n} - E_0,$$

где E_0 - это кинетическая энергия радиуса-приемника $r_0 = r_{1,n}$ или радиуса Бора r_0 , а параметр $E_{\lambda,n}$ представляет собой энергию скорости $v_{\lambda,n}$ на радиусе $r_{\lambda,n}$:

$$E_{\lambda,n} = \frac{m_{\lambda,n} v_{\lambda,n}^2}{2}. \quad (2)$$

В соотношении (2) масса $m_{\lambda,n} = m_0 \gamma_{\lambda,n}$, где Лоренц-фактор $\gamma_{\lambda,n}$ определен для скорости $v_{\lambda,n} = 2\pi\omega_{\lambda,n}r_{\lambda,n}$ на соответствующем энергоуровне λ, n , m_0 - масса покоя электрона.

Однако, для наночастицы находящейся на радиусе $r_0 = r_{1,n}$ (или боровском r_0) центроаффинного пространства ядра не может быть записано аналогичное формуле (2)

соотношение. Данный факт следует из того, что на радиусе-приемнике всегда выполняется поглощение энергии разряженным электроном. Таким образом, общее уравнение для энергии, излучаемой электроном при переходе с $\lambda > 1$ -ой орбиты на переменную орбиту $r_0 = r_{1,2}, r_{1,3}, \dots, r_{1,\infty}$, или для $\lambda = 1$ при переходе на радиус Бора r_0 принимает вид:

$$E_{sum} = \frac{m_{\lambda,n} v_{\lambda,n}^2}{2} - E_0. \quad (3)$$

При этом для $\lambda > 1$ имеем:

$$E_0 = \frac{m_{1,\lambda} v_{1,\lambda}^2}{2} = 0, \quad (4)$$

где $m_{1,\lambda} = m_0$ - масса частицы на текущем радиусе приемнике $r_{1,\lambda}$, а $v_{1,\lambda}$ - скорость, определяющая излучение энергии электроном на указанном радиусе. Очевидно, что за счет отсутствия энергии излучения параметр $v_{1,\lambda}$ может быть принят равным нулю.

Если излучение выполняется с радиусов $r_{1,2}, r_{1,3}, \dots, r_{1,\infty}$ серии Лаймана при перемещении электрона на боровский радиус r_0 то уравнение (4) трансформируется к виду:

$$E_0 = \frac{m_{0,1} v_{0,1}^2}{2} = 0,$$

где $m_{0,1} = m_0$ - это масса электрона на боровском радиусе, $v_{0,1} = 0$ - скорость излучения с указанного радиуса. Индекс 0,1 определяет $\lambda = 0$, то есть сам радиус Бора, $n = 1$ говорит о том, что перемещение осуществлялось с уровня $\lambda = 1$.

Итак, констатируем, что окончанию излучения электрона всегда соответствует момент перехода наночастицы на радиус $r_0 = r_{1,\lambda}$ или боровский радиус r_0 . На данной орбите имеет место обратный процесс, то есть начинается поглощение энергии ядра за счет релятивистских вращающих моментов последнего. При этом произведение $\frac{m_{1,\lambda} v_{1,\lambda}^2}{2}$ или $\frac{m_{0,1} v_{0,1}^2}{2} = \frac{m_0 v_0^2}{2}$ определяет процесс заряда электрона при движении по данному радиусу.

С точки зрения классической квантовой теории уравнение (3) должно быть эквивалентно известному соотношению для энергии $E = mc^2$. Однако, следует учитывать, что измеренная «скорость света» для материальных объектов в *Re*-пространстве, в том числе и для плазмы третьего измерения, достигается, как правило, только в макрообъектах (фотосфера солнечного шара, например) или в нанообъектах, существующих в рамках теории «струн». В связи с указанным обстоятельством можем заключить, что скорость излучения плазмы электроном на радиусе $r_{\lambda,n}$ будет определяться запасом энергии на указанном уровне, причем для излучаемой энергии будет справедливо соотношение:

$$\hbar\omega_{\lambda,n} = \frac{1}{2} m_{\lambda,n}^* (v_{\lambda,n}^*)^2, \quad (5)$$

где * - означает принадлежность параметра энергии или процессу излучения вещества с текущего радиуса $r_{\lambda,n}$.

Используя теперь формулу для энергии (5) можем записать:

$$m_{\lambda,n}^* = \frac{2E_{sum}}{(v_{\lambda,n}^*)^2}.$$

Таким образом, упрощенно *Re*-пространственная масса электрона $m_{\lambda,n}$ будет определяться с учетом двух составляющих: 1) с учетом запаса энергии, из соотношения (5), определяющего массу излучения $m_{\lambda,n}^*$ и 2) с учетом массы покоя электрона m_0 . Следовательно, не трудно установить связь между релятивистской массой орбиты $r_{\lambda,n}$ и излучаемой массой в виде:

$$m_{\lambda,n} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v_{\lambda,n}^2}{c^2}}} = m_0 + \frac{2E_{sum}}{(v_{\lambda,n}^*)^2}. \quad (6)$$

Рассматривая, теперь формулы (3), (5) и (6) запишем соотношение для энергии излучения в виде:

$$E_{\lambda,n} = \frac{1}{2} \frac{m_0 (v_{\lambda,n}^*)^2 + 2E_{sum}}{(v_{\lambda,n}^*)^2} v_{\lambda,n}^2, \quad (7)$$

где $E_{\lambda,n} = E_{sum}$ в соответствии с нулевым результатом для E_0 .

Из соотношения (5) можно сделать вывод, что в процессе излучения выполняется преобразование квантово-механического объекта с энергией $\frac{m_{\lambda,n} v_{\lambda,n}^2}{2}$ в квантовый объект с энергией (7) и энергетическим остатком $E(m_0)$. Следовательно, в уравнении (7) очевидна связь параметров:

$$E_{sum} = E_{\lambda,n} = 2\hbar\omega_{\lambda,n}.$$

Приведенное равенство позволяет заключить, что в процессе излучения выполняется физическое и математическое преобразование энергии вида:

$$\hbar\omega_{\lambda,n} = \frac{m_{\lambda,n} v_{\lambda,n}^2}{4},$$

а также формирование электрона с массой m_0 и собственной энергией существования

$$E(m_0) = \frac{m_{\lambda,n} v_{\lambda,n}^2}{4}, \quad (8)$$

то есть энергия (8) определяет энергетику существования электрона в рамках постизлученного движения последнего к радиусу-приемнику. Данное равенство определяет представление об электроне как о квантовом элементе, а также как о твердотельном объекте Re -пространства.

Теперь, для решения уравнения (7) относительно скорости $v_{\lambda,n}$, определим параметр $v_{\lambda,n}^*$ который необходимо считать принципиально неизвестным, что следует из неоднозначного представления его в периодических изданиях и расчетах микроэлектронных схем.

Скорость электрона на борновском радиусе атома водорода

Воспользуемся классическим соотношением для радиуса r_0 и выполним его преобразование к виду:

$$r_0 = \frac{\hbar^2}{m_0 e}. \quad (9)$$

В данном равенстве вместо значения квадрата заряда электрона использовано значение параметра в первой степени, численно совпадающее с квадратом классического параметра. Это связано с тем, что выраженные из известного соотношения для борновского радиуса единицы измерения для $[e^2]$ порождают внесистемность двух входящих в состав классического равенства параметров и их единиц измерения в СГСМ, а именно:

$$\left[\sqrt{e^2} \right] = \left[\sqrt{\frac{e \cdot \text{см}^3}{c^2}} \right] = \left[\frac{\text{см}}{c} \sqrt{e \cdot \text{см}} \right].$$

Очевидно, что в природных механизмах взаимодействия материи (в различных измерениях) не существует корня квадратного из массы или длины, что и предполагает замену квадрата заряда на первую степень. Иными словами, при сохранении численного результата в равенстве (9), единицы измерения заряда электрона должны быть представлены в виде:

$$[e] = \left[\frac{e \cdot \text{сМ}^3}{\text{с}^2} \right].$$

Учитывая выше сказанное, для определения скорости наночастицы на радиусе r_0 рассмотрим численное значение постоянной Ридберга в стандартном соотношении для волнового числа. Так, используя известные работы, можем записать:

$$\frac{1}{\theta_{\lambda,n}} = R_2 \left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

при этом с учетом результатов [2] и [3] имеем:

$$R_2 = \frac{2m_0 \pi e^2}{v_{\lambda,n}^* h^3} = 109677 \text{ см}^{-1}, \quad (10)$$

где $\theta_{\lambda,n}$ - длина волны, \hbar - постоянная Планка, $v_{\lambda,n}^*$ - скорость излучения энергии электроном с радиуса $r_{\lambda,n}$. Значение заряда электрона с учетом доработки равенства для боровского радиуса в (10) принято равным $e = 23,0708 \cdot 10^{-20}$ Фр.

Выполненная коррекция формулы (10) по отношению к работе [2], то есть замена скорости света $c = 299792,458 \text{ км/с}$ на скорость излучения $v_{\lambda,n}^*$, связана с тем, что использование классических параметров при подстановке в соотношение (9) не подтверждает известного значения константы $R_2 = 109677 \text{ см}^{-1}$. Попытка установить равенство путем изменения величины заряда с помощью Лоренц-фактора представляется нецелесообразной, так как данный параметр является постоянным и практически измеренным. Будем учитывать также, что равенство (10) получено косвенно экспериментальным путем [2]. Таким образом, снова полагая, что скорость света материальных объектов в Re -пространстве достигается только в макрообъектах или на нано- уровне, считаем, что излучение квантов заряженным электроном характеризуется скоростью движения текущего центроаффинного пространства ядра. Соответственно, подстановка стандартных параметров в формулу (10), позволяет получить значение скорости $v_{\lambda,n}^*$ с помощью следующих численных величин:

$$v_{\lambda,n}^* = \frac{2 \cdot 9,109 \cdot 10^{-28} \cdot 3,14 \cdot 23,0708^2 \cdot 10^{-40}}{109677 (6,626 \cdot 10^{-27})^3} = 95,4824 \cdot 10^3 \text{ км/с}. \quad (11)$$

В приведенном соотношении использовано значение заряда электрона из соотношения (2), однако, постоянное для всех уровней атома [2]. Из закона же сохранения энергии следует, что приобретенная энергия электрона с массой m_0 на некотором радиусе вращения соответствует излученной энергии на радиусе $r_{\lambda,n}$. Таким образом, можно утверждать, что скорость излучения квантов (11) примерно соответствует некоторой псевдостатистической скорости начала преобразования электрона из твердотельного состояния с массой m_0 в плазменный объект. Это для любого радиуса поглощения энергии, в том числе и для радиуса Бора, дает соотношение: $v_{\lambda,n}^* \approx v_0 = v_{0,l} \sqrt{2} = 95,4824 \cdot 10^3 \text{ км/с}$, где $v_{0,l}$ линейная скорость наночастицы на радиусе r_0 .

При полученном в (11) значении скорости несложно рассчитать и другие параметры атома, необходимые для выполнения последующих исследований квантово-электронных устройств и систем.

Решим уравнение (7) и вычислим излучающие радиусы атома водорода $r_{\lambda,n}$.

Решение уравнения для энергии излучения относительно $v_{\lambda,n}$

Из равенства для скорости $v_{\lambda,n}$ определим параметр $r_{\lambda,n}$, выполнив преобразование энергетического уравнения (7) к следующему виду:

$$2(v_{\lambda,n}^*)^2 E_{\lambda,n} = v_{\lambda,n}^2 \left[m_0 (v_{\lambda,n}^*)^2 + 2E_{\lambda,n} \right]. \quad (12)$$

Учитывая, что энергия $E_{\lambda,n}$ является расчетно-измеренной, а скорости $v_{\lambda,n}^*$ и $v_{\lambda,n}$ Лоренц-фактором не корректируется, решим данное уравнение (в системе СГСМ) используя представление параметров (например, угловой частоты) в виде $\omega_{\lambda,n} = \omega'_{\lambda,n} \cdot 10^{16} \tilde{n}^{-1}$. Тогда для радиусов $r_{\lambda,n}$ получим равенство:

$$r_{\lambda,n} \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\hbar}{\omega_{\lambda,n} m_0}}. \quad (13)$$

Подстановка частот $\omega_{\lambda,n}$ в формулу (13) дает набор значений радиусов, требуемых для дальнейшего вычисления скоростей $v_{\lambda,n}$:

$$v_{\lambda,n} = 2\pi\omega_{\lambda,n}r_{\lambda,n}.$$

Использование полученных параметров для определения энергии излучения подтверждает правильность выполненных расчетов при сравнении с результатом (5).

Заключение

Выполненные исследования показали, что достижение физико-математической системности в базовых соотношениях квантовой механики позволяет уточнить ряд взглядов на природу явлений в атоме водорода. Так правильное толкование известных теоретических результатов и их связь с практически измеренными величинами приводит к достаточно точному представлению о регистрируемых значениях реальных параметров. В частности, анализ классического соотношения для волнового числа (10) показал, что использование понятия «скорость света» не всегда допустимо в вопросах описания физических процессов. Это связано с тем, что подстановка указанного значения в Лоренц-фактор неизбежно ведет к появлению практически не достижимых значений параметров в реальных системах и, в частности, «нуля» или «бесконечности» для центроаффинных пространств ядра. Сформулированный контраргумент для «скорости света» при анализе физических задач позволил сформировать научный взгляд на скорость движения электрона на радиусах $r_{\lambda,n}$ и с учетом несложных соотношений определить ряд параметров данной наночастицы.

Список литературы

1. Соколов А.А., Тернов И.М. Квантовая механика и атомная физика. М.: Просвещение, 1970. 423 с.
2. Слейбо У., Персонс Т. Общая химия. Пер.с англ. М.: Мир, 1979, 552 с.
3. Кобяк И.П. Физика атома в расчетах криптографических каналов связи. Технические средства защиты информации : тез. докл. XVII Белорусско-российской науч.-техн. конф. (Республика Беларусь, Минск. 11 июня 2019 года). Мн.: БГУИР, 2019. С. 84.

УДК 681.2.08

ДАТЧИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ PSoC ТЕХНОЛОГИИ
НАДЕЖДИН И.С., ГОРЮНОВ А.Г.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Инженерная школа ядерных технологий
(Томск, Российская Федерация)*

Аннотация. Целью данной работы является разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными эксплуатационными и метрологическими характеристиками. Измерительный блок разработанного датчика основан на дифференциальном емкостном чувствительном элементе. При разработке электронного блока была использована технология программируемой системы на кристалле (PSoC). Благодаря использованию PSoC-технологии удалось повысить помехозащищенность разработанного датчика дифференциального давления, а также обеспечить беспрецедентное сочетание гибкости, интеграции, аналоговой и цифровой функциональности.

Ключевые слова: дифференциальное давление, емкостной сенсор, математическая модель, программируемая система на кристалле, PSoC.

DIFFERENTIAL PRESSURE SENSOR BASED ON PSoC TECHNOLOGY

IGOR S. NADEZH DIN, ALEKSEY G. GORYUNOV

*National Research Tomsk Polytechnic University,
School of Nuclear Science & Engineering
(Tomsk, Russian Federation)*

Abstract. The purpose of this work is to develop a smart differential pressure sensor with improved operational and metrological characteristics. The measuring unit of the developed pressure sensor is based on a differential capacitive sensitive element. Programmable system-on-chip (PSoC) technology has been used to develop the electronics unit. Due to the use of PSoC technology, it was possible to increase the noise immunity of the developed differential pressure sensor, as well as provide an unparalleled combination of flexibility, integration analog and digital functionality.

Keywords: differential pressure, capacitive sensor, mathematical model, programmable system-on-chip, PSoC.

Введение

Контроль и измерение параметров любого технологического процесса является важной задачей. Одним из важных технологических параметров, нуждающимся в постоянном контроле является давление. В связи с этим, публикуются работы целью которых является обзор и классификация существующих датчиков давления [1, 2].

На сегодняшний день развитие промышленности и сооружение сложных физико-химических производств требует совершенствования измерительных устройств и накладывает повышенные требования при их разработке. Это обуславливается тем, что измерительным устройствам приходится работать в крайне тяжёлых промышленных и природно-климатических условиях [3].

Несмотря на большое количество исследований посвященных разработке и совершенствованию датчиков давления существуют не решенные задачи (проблемы). Остаются актуальными такие задачи, как уменьшение температурной погрешности измерений, уменьшение габаритов, повышение чувствительности, уменьшение энергопотребления, повышение помехоустойчивости и т.д. [4, 5].

В последнее время при разработке электронных блоков измерительных преобразователей используют однокристалльные решения. Это позволяет решить некоторые проблемы из тех, что были перечислены выше. На сегодняшний день набирает популярность применение технологии программируемой системы на кристалле (PSoC-технология) для реализации различных электронных модулей, в том числе в измерительных устройствах [6].

Целью этой работы является разработка датчика дифференциального давления на базе PSoC технологии для обеспечения улучшенных метрологических и эксплуатационных характеристик.

Описание разработанного датчика дифференциального давления

Принцип действия, разработанного датчика дифференциального давления основан на использовании зависимости между измеряемым давлением и упругой деформацией чувствительного элемента первичного преобразователя. Функционально датчик состоит из двух частей: измерительного блока и блока электроники. В данной работе роль первичного преобразователя выполняет дифференциальный емкостной сенсор. В этом случае выходной величиной измерительного блока является резонансная частота. Структурная схема разработанного датчика дифференциального давления показана на рис. 1.

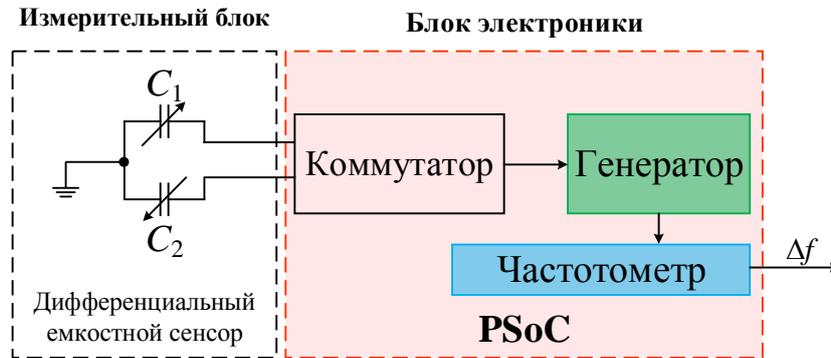


Рис. 1. Структурная схема разработанного датчика дифференциального давления

Для определения дифференциального давления в зависимости от изменения резонансной частоты емкостного сенсора необходима его математическая модель. На основании проведенных экспериментальных исследований была выбрана модель емкостного сенсора в виде полинома третьей степени:

$$\Delta P = Kt \cdot K \cdot (c_{43} \cdot \Delta f^3 + c_{42} \cdot \Delta f^2 + c_{41} \cdot \Delta f + c_{40} + adit) + dP_0, \quad (1)$$

где Kt – коэффициент для компенсации мультипликативной составляющей температурной погрешности; K – коэффициент перевода шкалы измерения; $adit$ – коэффициент для компенсации аддитивной составляющей температурной погрешности; dP_0 – корректировка баланса нуля; Δf – разность частот контуров; c_i – переводные коэффициенты (частота–давление).

Разработанный датчик дифференциального давления (рис. 1) имеет унифицированный блок электроники. Этот блок электроники базируется на программируемом модуле PSoC-5LP (Programmable System-on-Chip). На базе модуля PSoC-5LP были реализованы генератор и частотомер. В ходе работы было разработано, реализовано и исследовано две схемы генератора. Первая схема генератора базировалась на двух источниках тока, а вторая схема – на прецизионном операционном усилителе. В ходе проведенных исследований для дальнейшей работы была выбрана схема генератора на базе прецизионного операционного усилителя, так как эта схема обладает большей чувствительностью и хорошей температурной стабильностью.

Применение PSoC технологии дает возможность не использовать дискретные и аналоговые элементы в разработанном блоке электроники. Все необходимые электронные компоненты были реализованы программно на базе одного программируемого модуля PSoC-5LP. Это позволило значительно уменьшить размеры блока электроники и повысить помехоустойчивость разработанного датчика дифференциального давления. Использование PSoC технологии позволяет создать унифицированный блок электроники, пригодный для работы с любым первичным преобразователем (емкостной сенсор, тензорезистивный сенсор и т.д.). Для этого не нужно изменять аппаратную часть блока электроники, а достаточно лишь изменить программное обеспечение модуля PSoC-5LP.

Результаты и их обсуждение

В ходе работы был изготовлен экспериментальный образец разработанного датчика дифференциального давления на базе емкостного сенсора с унифицированным блоком

электроники [7, 8]. На рис. 2 представлена диаграмма, показывающая метрологические характеристики разработанного датчика.

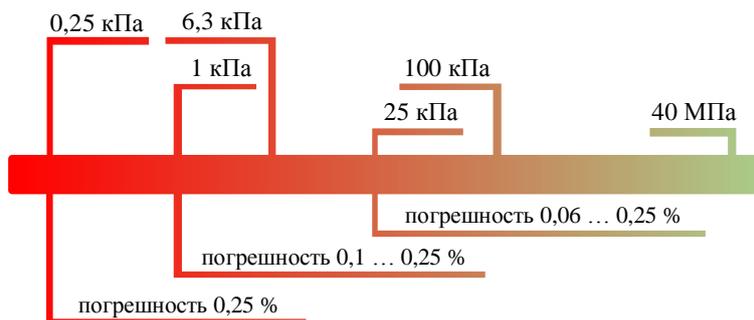


Рис. 2. Метрологические характеристики (погрешность измерений) разработанного датчика дифференциального давления

Как видно, разработанный датчик дифференциального давления способен работать в широком диапазоне давлений от 0,25 кПа до 40 МПа. При этом разработанный датчик обладает погрешностью не более 0,25 % для малых давлений до 100 кПа и не более 0,1 % для высоких давлений от 100 кПа.

Заключение

Результатом данного исследования является разработка датчика дифференциального давления на базе емкостного сенсора. Неоспоримым преимуществом разработанного датчика дифференциального давления является использование PSoC технологии, которая обеспечивает беспрецедентное сочетание гибкости, интеграции, аналоговых и цифровых функций. Применение PSoC технологии позволяет минимизировать схему, при этом схема будет иметь повышенную помехозащищенность. Также упрощается процедура отладки и изменения программного обеспечения блока электроники. Кроме того, возможно использование разработанного блока электроники совместно с другими сенсорами. Для этого достаточно всего лишь изменить программное обеспечение блока электроники. Все это делает разработку и производство рентабельными.

Проведенные экспериментальные исследования показали целесообразность использования схемы блока электроники с генератором на базе прецизионного операционного усилителя. Эта схема обладает большей чувствительностью и хорошей температурной стабильностью. Разработанный датчик дифференциального давления на базе дифференциального емкостного сенсора способен работать в широком диапазоне давлений от 0,25 кПа до 40 МПа. При этом разработанный датчик давления обладает погрешностью измерений не более 0,1 % для давлений от 100 кПа.

Список литературы

1. Tandeske D. Pressure Sensors: Selection and Application. *Sensor Review*. 2002;22(3):265-265.
2. Xu F., Li X., Shi Y., Li L., Wang W., He L., Liu R. Recent Developments for Flexible Pressure Sensors: A Review. *Micromachines*. 2018;9(11):580.
3. Venugopal A., Agrawal A., Prabhu S.V. Performance evaluation of piezoelectric and differential pressure sensor for vortex flowmeters. *Measurement*. 2014;50:10-18.
4. Liu Z., Pan Y., Wu P., Du L., Zhao Z., Fang Z. A novel capacitive pressure sensor based on non-coplanar comb electrodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019;297:111525.
5. Zhu L., Xie B., Xing Y., Chen D., Wang J., Wang Y., Wei Q., Chen J. A Resonant Pressure Sensor Capable of Temperature Compensation with Least Squares Support Vector Machine. *Procedia Engineering*. 2016;168:1731-1734.
6. Tomanek D. What is PSoC. 2010 International Conference on Applied Electronics. 2010; 11580659.
7. Nadezhdin I.S., Goryunov A.G. Single-chip solution for electronics unit of a smart pressure sensor. *Sensor Review*. 2020;40(5):529-534.
8. Nadezhdin I.S., Goryunov A.G. Differential Pressure Transmitter With Unified Electronics Unit. *IEEE Sensors Journal*. 2020;20(18):10460-10468.

УДК 53.083.92

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УРОВНЕМЕРА С ФУНКЦИЕЙ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО САМОКОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО
ЭФФЕКТА**

КАЛАШНИКОВ А.А.

*АО «Русатом автоматизированные системы управления» (АО «РАСУ»),
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. С внедрением и развитием программно-технических комплексов в современной энергетике наблюдается спрос к повышению уровня автоматизации, все большая роль в управлении технологическим процессом стала отводиться автоматике. Вследствие этого на современных АЭС нового поколения «3+» число измерительных каналов возросло более чем в 2,5 раза по отношению к проектам 2010 г. и стало составлять свыше 15 тысяч единиц на один энергоблок. Такие тенденции привели к новому промышленному вызову о необходимости оптимизации метрологического обслуживания АЭС, обновления подходов в организации метрологического обеспечения и создания качественно новых измерительных систем и средств измерений с функцией метрологического самоконтроля. В настоящей статье рассмотрены возможности и пути решения конструкторских задач по созданию такого интеллектуального уровнемера с функцией метрологического самоконтроля на основе концентрационного эффекта.

Ключевые слова: метрологический самоконтроль, измерение уровня жидких сред, концентрационный эффект

**DEVELOPMENT OF INTELLIGENT FLUID LEVEL SENSOR WITH METROLOGICAL
SELF-CHECK FUNCTION BASED ON THE CONCENTRATION EFFECT**

ALEKSANDR.A. KALASHNIKOV

*JSC «Rusatom Automated Control Systems»,
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. With the introduction and development of software and hardware complexes in modern power engineering, there is a demand for an increase in the level of automation, an increasing role in the control of the technological process began to be assigned to automation. As a result, at modern NPPs of the new generation "3+", the number of measuring channels has increased by more than 2.5 times in relation to the projects of 2010 year and has become more than 15 thousand measuring channels per NPP unit. This trends have led to a new industrial problem on the need to optimize the metrological service of NPPs, to update approaches to organizing metrological support and to create new intelligent measuring systems and measuring instruments with the of metrological self-check function. This article describes the possibilities and design ways for development of the intelligent fluid level sensor with metrological self-check function based on the concentration effect.

Keywords: metrological self-check, fluid level measurement, concentration effect

Введение

В 2019 г. в России произошло значимое событие в развитии метрологии, которое было отмечено на Международном конгрессе «19th International metrology congress CIM 2019» (Франция, Париж) [1]. Впервые в электроэнергетике РФ, на Саяно-Шушенской ГЭС, введена в эксплуатацию первая интеллектуальная измерительная система с функцией метрологического самоконтроля в современной классификации ГОСТ Р 8.734-2011 «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля» [1, 2]. Это повысило надежность и точность автоматического контроля за перемещениями крышки гидротурбины и одновременно обеспечило повышение межповерочных интервалов датчиков с 1 года до 4 лет. На основе полученных результатов ПАО «РусГидро» принято решение об отраслевом внедрении таких интеллектуальных измерительных систем.

Столь значительные результаты позволяют рекомендовать разработку и развитие интеллектуальных измерительных систем и средств измерений с функцией метрологического самоконтроля в атомной отрасли с целью повышения уровня безопасной эксплуатации АЭС и оптимизации метрологического обслуживания. Последнее является особенно актуальным в связи с современными тенденциями многократного увеличения числа ИК и степени

автоматизации вновь проектируемых и строящихся энергоблоков АЭС российского дизайна поколения «З+».

Создание таких новых измерительных систем и средств измерений требует освоение новых принципов измерений, обеспечивающих выполнение метрологического самоконтроля. В части измерений уровня жидких и двухфазных сред наиболее перспективным является освоение концентрационного принципа измерений [3, 4].

Некоторые сведения о концентрационных элементах в электрохимии датируются XIX веком. Однако, из-за практической потребности в высоких значениях ЭДС самое широкое распространение в технике получили другие электрохимические элементы с гальваническими парами и сильными электролитами. Область же применения концентрационных элементов в промышленности практически ограничена кондуктометрами, pH-метрами и концентратомерами, которые в основном имеют сложные принципы работы и дорогостоящие конструкции, например, с применением каломельных или водородных электродов и электролитов с диффузионными барьерами [5 –7].

В настоящей работе показаны перспективы применения концентрационных элементов для задач измерения уровня жидких сред и реализации метрологического самоконтроля. Разработка и возможность реализации вновь предлагаемого принципа базируется на результатах исследования свойств концентрационных элементов, проявляющихся на больших объемах измеряемых полярных и/или ионосодержащих жидкостей. Рассмотрим подробнее некоторые выявленные свойства концентрационных элементов, позволяющие реализовать метрологический самоконтроль уровнемеров.

Некоторые результаты исследования свойств концентрационных элементов

Для исследования свойств концентрационных элементов (ЭК) в ряде опытов выполнялось поочередное погружение одинаковых электродов в кювету с дистиллятом и другими полярными жидкостями. В качестве дистиллята использовался «Дистиллят бутилированный (для АКБ)» с электропроводимостью не более $5 \cdot 10^{-4}$ См/м согласно данным сертификата. Задействованные в опытах электроды в основном выполнялись из одной жилы медного кабеля для обеспечения идентичности их составов. Кроме меди, использовались электроды из нержавеющей стали. Основные измерения производились мультиметром «М-830» с входным сопротивлением 1 МОм, что позволило измерять ЭДС самого концентрационного элемента непосредственно. В определенных опытах применялся гальванометр.

На рис. 1 представлены типовые характерные графики зависимости концентрационной ЭДС от времени, построенные на примере результатов одного из опытов с поочередным погружением медных электродов в кюветы с дистиллятом. Воспроизведение и запись результатов выполнена посредством фото-регистрации показаний мультиметра с максимальной частотой 10 кадр/сек

Появление и наличие ЭДС на концентрационных элементах объясняется законами электрохимии. Вкратце, процесс образования зарядов следующий. Полярные молекулы воды взаимодействуют с ионами меди. Происходит перенос ионов металла в воду, в которой образуются гидратированные ионы. Электрод приобретает электрический заряд, и на границе «металл - вода» возникает двойной электрический слой. Ввиду разных концентраций образовавшихся гидратированных ионов погруженные электроды приобретают разные по значению заряды. Далее происходит выравнивание концентраций ионов, приводящее к снижению разности потенциалов на электродах (ЭДС) до нуля по логарифмическим законам [6-8]. Другими словами, такая система стремится к своему электрическому равновесию.

При беглом поверхностном взгляде ничего примечательного в полученных результатах нет, но только не в аспекте изначально решаемой задачи измерений уровня жидких сред. На самом деле, первое, что показали поставленные опыты, на больших объемах даже слабых электролитов - полярных жидкостей - значение ЭДС достигает десятки и сотни мВ, а процессы падения ЭДС до нуля у ЭКС носят весьма инерционный характер (рис. 1). Так, на объемах дистиллята даже в пределах от 1 до 3 литров падение концентрационной ЭДС до нуля не наблюдалось при длительности опытов до 100 ч. На объеме дистиллята 1 литр были зарегистрированы лишь периодические переходы ЭДС через ноль со сменой знака, что само по себе является примечательным. В пробирочных объемах, менее 30 мл, падение значений ЭДС

до нуля длилось не более 20 мин. Отсюда справедливо констатировать, что с увеличением объема контактируемой полярной жидкости многократно растет инерционность процесса снижения ЭДС до нуля.

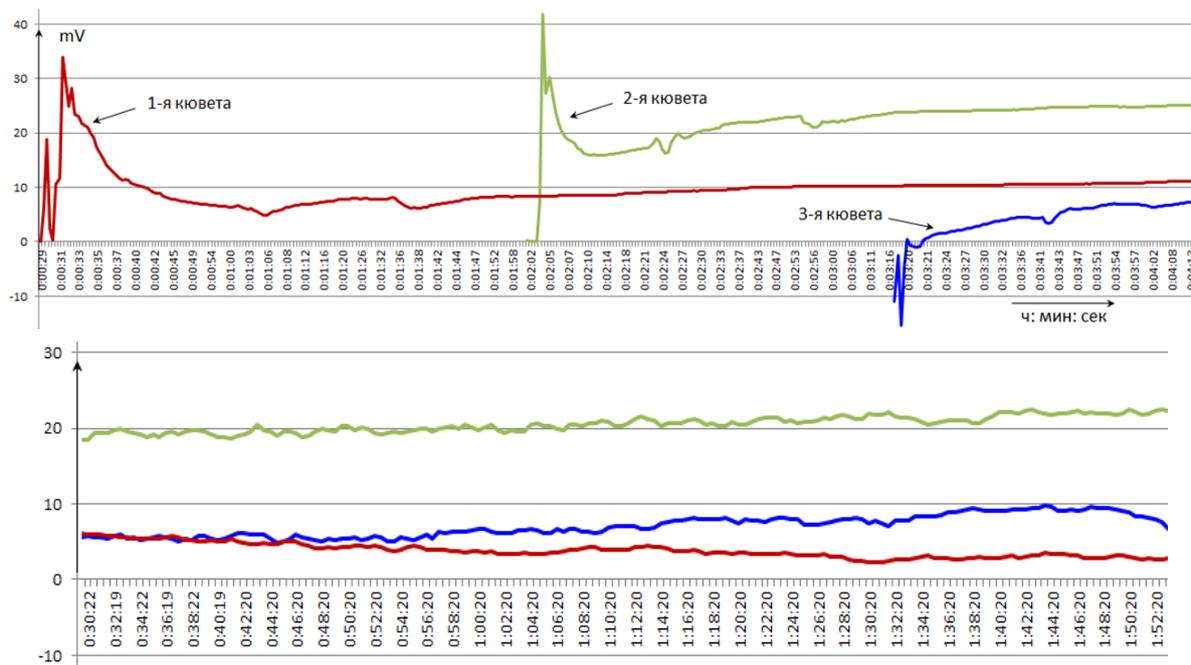


Рис. 1. Графики изменения концентрационной ЭДС во времени.
Начальный бросок ЭДС - момент погружения электрода

Примечательными в аспекте электрохимии являются наблюдаемые колебания ЭДС с длинным периодом, достигающим нескольких часов. Так, детальная картография результатов измерений позволила установить, что такие длинные волны в изменениях ЭДС имеют свою условную «скользящую точку равновесия». В результате это может приводить даже к периодической смене полярности ЭДС. Предположительно это вызвано инерционностью процессов. При этом при погружении в одну кювету нескольких электродных пар колебания ЭДС на них никогда не совпадали во времени. В полученных результатах вызывает интерес не только смена полярности ЭДС, но и сам факт периодического роста ЭДС по модулю. Для максимально точного описания таких процессов и вывода математических закономерностей с учетом обратимого электродного потенциала, и ряда других факторов требуется отдельная детальная проработка.

Другими, значимыми в аспекте решаемой задачи, являются следующие установленные особенности ЭК:

- ЭДС концентрационных элементов в полярных средах, таких как дистиллированная вода и даже ацетон (диэлектрик), достигает десятки милливольт вольт;
- любое движение жидкости или вибрация электродов приводит к нарушению концентрационного равновесия, в связи с чем происходит рост ЭДС и возобновление химических реакций,
- на протяжении всего времени выравнивания потенциалов электродов наблюдаются хаотичные частые колебания ЭДС амплитудой до 0,3 мВ, а также длительные колебания (волны) в изменениях ЭДС с периодом до 5 часов, которые могут приводить к смене полярности электродов,
- концентрационные элементы устойчивы к образованию диэлектрических масляных пленок на электродах, обладают реакцией на нагрев или охлаждение одного из электродов, схожей с работой дифференциально включенных термопар.
- при контакте электродов с насыщенным паром концентрационная ЭДС не возникает,
- в условиях образования пленок жидкостей между электродами при дренировании кюветы концентрационная ЭДС мгновенно падает до нуля.

Подробно результаты поставленных экспериментов и описания перечисленных и других особенностей ЭЖ раскрыты в работе [3].

В совокупности установленные особенности ЭЖ позволяют реализовать концентрационный принцип измерений уровня жидкостей, обеспечивающий стабильную работу уровнемера в условиях однофазных и двухфазных насыщенных сред (пар-вода), проводящих жидкостей и полярных диэлектриков, а также в условиях измерения жидкостей с маслостоками. Преимущества концентрационного принципа перед известными гидростатическими, кондуктометрическими и емкостными методами измерений подтверждают целесообразность разработки соответствующего уровнемера.

Пути решения конструкторских задач в создании уровнемера с функцией метрологического самоконтроля

Уникальность концентрационного принципа состоит в том, что для кратковременных измерений уровня требуется только подключение вольтметра к электродам первичного преобразователя. Вследствие этого появляется возможность сочетать несколько принципов измерений уровня на базе одного унифицированного погружного зонда с электродами, расположенными на разной высоте. Так, например, в режиме концентрационных измерений уровень регистрируется по факту наличия ЭДС на электродах, погруженных в измеряемую жидкость, а в режиме кондуктометрических измерений уровень регистрируется по факту падения электрического сопротивления на тех же электродах, погруженных в измеряемую жидкость. Переключая режимы измерений, обеспечивается возможность реализации адаптивности датчика под изменения характеристик измеряемой среды, а также реализации метрологического самоконтроля. За счет этого расширяются возможности датчика, и повышается его надежность.

Например, в случае совмещения кондуктометрического и концентрационного принципов измерений уровня жидкости происходит следующая синергия. Концентрационный принцип позволяет измерять проводящие жидкости и все полярные диэлектрики, привносит стабильность работы уровнемера в условиях образования пленок проводящей жидкости между электродами, непроводящих масляных пленок на электродах, а также в условиях наличия насыщенного пара и интенсивной конденсации. Кондуктометрический принцип за счет подачи тока на электроды обеспечивает долговременную работу ЭЖ на малых объемах абсолютно неподвижных жидкостей. Естественно, такое техническое решение обеспечивает стабильную работу уровнемера в разных режимах работы технологического оборудования. Именно такие сочетания разных принципов работы и позволяют реализовывать функции адаптивности и метрологического самоконтроля датчиков.

Если задача постоянных измерений уровня требует проработки решений по обеспечению долговременной и стабильной работы концентрационных элементов на неподвижных жидкостях, то задача метрологического самоконтроля в этом отношении проще, так как не требует их долговременной работы. Длительности работы концентрационных элементов в 20 секунд более чем достаточно, чтобы оценить метрологическую исправность датчика и всего измерительного канала в целом.

Конструкция такого датчика должна отвечать двум главным требованиям, электроды уровнемера должны быть электрически изолированы друг от друга, а его корпус должен быть герметичным. Один из возможных вариантов корпуса, позволяющий выполнить данные требования, а также обеспечить простоту сборки представлен на рис. 2. Основной корпус уровнемера в таком решении представляет собой трубу 1, заваренную сверху (фланец 2) и открытую снизу. В верхней части ниже крепёжного фланца находится прорезь 3 (одно или несколько отверстий) для сообщения давления со стороны технологической ёмкости во внутреннюю полость корпуса, что обеспечивает ток жидкости внутри уровнемера. Для установки защитного кожуха 4 предусмотрены резьбовые соединения 5 и 6. Для вывода кабельных связей 4 предусмотрена проходная трубка 8 (одна или несколько) через резьбовой верхний и крепёжный фланец. Электроды 9 монтируются таким образом, чтобы через отверстия 10 они выступали во внутренней полости корпуса для обеспечения контакта с измеряемой жидкостью. Для обеспечения изоляции между электродами либо сам корпус 1

выполняется из диэлектрических материалов, например, фторопласта или капролона, либо в отверстиях 10 до монтажа электродов устанавливается изоляционная прокладка.

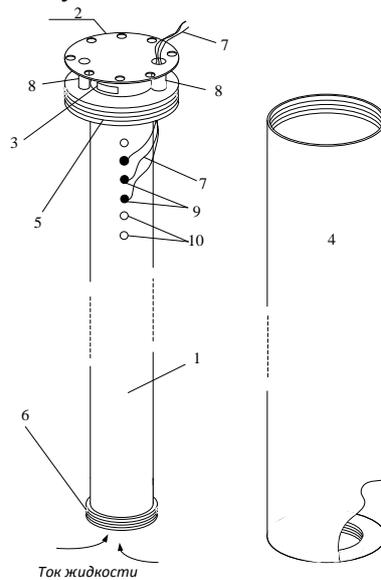


Рис. 2. Корпус уровнемера с внутренней полостью для протока измеряемой жидкости

Исполнение корпуса, представленное на рис. 2, снижает гидравлическое воздействие (влияние динамического давления потоков) на электроды и обеспечивает ремонтпригодность уровнемера за счет возможности снятия защитного кожуха 4. Однако, для осуществления ремонта требуется демонтаж уровнемера, что несколько усложняет обслуживание. Для обеспечения ремонтпригодности без демонтажа уровнемера корпус 1 может быть выполнен в виде байпаса, соединяемого с технологической ёмкостью путем трубных проводок с фланцевыми соединениями 11 (рисунок 3). В таком случае уровнемер не занимает объема внутри технологической емкости и его обслуживание, и ремонт кабельных связей могут производиться без демонтажа.

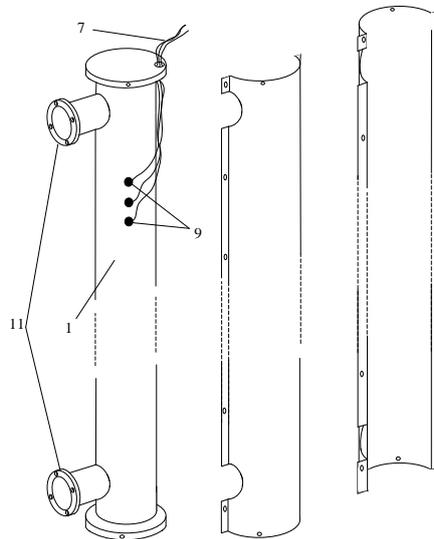


Рис. 3. Байпасная конструкция уровнемера

Вышеуказанные конструктивные решения представляют собой унифицированную многоэлектродную конструкции первичного преобразователя, применимой для уровнемера с концентрационным, кондуктометрическим, емкостным и комбинированными принципами измерений. Реализация соответствующих разных режимов работы датчика будет определяться возможностями вторичной многоканальной аппаратуры.

Реализация функции метрологического самоконтроля в автоматическом режиме позволяет удаленно осуществлять диагностику технической и метрологической исправности датчика, что позволяет снизить воздействия вредных факторов на эксплуатационный персонал и сократить трудозатраты на периодическое обслуживание.

Заключение

По результатам поставленных опытов установлено, что концентрационные элементы даже в условиях слабых электролитов представляют собой самостоятельные источники малых ЭДС, обладающих следующими основными особенностями:

- ЭДС концентрационных элементов даже в полярных средах, таких как дистиллированная вода и даже ацетон, достигает десятки милливольт вольт;

- протекание реакций и постепенное снижение ЭДС при высокоомной нагрузке имеет сильный инерционный характер. Так, на объемах дистиллята в пределах от 1 до 3 литров падение концентрационной ЭДС до нуля не наблюдалось при длительности опытов до 100 ч. На объеме дистиллята 1 литр были зарегистрированы лишь периодические переходы ЭДС через ноль со сменой знака;

- любое движение жидкости или вибрация электродов приводит к нарушению концентрационного равновесия, в связи, с чем происходит рост ЭДС и возобновление химических реакций,

- на протяжении всего времени выравнивания потенциалов на электродах наблюдаются хаотичные частые колебания ЭДС амплитудой в десятые доли мВ, а также длительные колебания (волны) в изменениях ЭДС с периодом до 5 часов, которые могут привести к смене полярности электродов,

- концентрационные элементы устойчивы к образованию диэлектрических масляных пленок на электродах, обладают реакцией на нагрев или охлаждение одного из электродов, схожей с работой дифференциально включенных термопар.

- при контакте электродов с насыщенным паром концентрационная ЭДС не возникает,

- в условиях образования пленок жидкостей между электродами при дренировании кюветы концентрационная ЭДС мгновенно падает до нуля.

Такие особенности позволяют реализовать концентрационный принцип измерений уровня жидкостей и реализовать функцию метрологического самоконтроля кондуктометрических, емкостных и потенциометрических уровнемеров. Это позволяет повысить надежность работы уровнемеров и сократить трудозатраты на их техническое и метрологическое обслуживание, решая тем самым актуальные проблемы современной энергетики.

Список литературы

1. Sapozhnikova K, Baksheeva I, Taymanov R. Improving reliability of power plant equipment due to measurement information redundancy // Proceedings of 19th International congress of metrology. Paris, 2019. Art. num. 26004. 6 p. DOI: doi.org/10.1051/metrology/201926004
2. ГОСТ Р 8.734–2011 Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. М.: Стандартинформ, 2011. 19 с.
3. Калашников А.А. Новое применение концентрационного эффекта в измерительной технике Ч.1: Об особенностях самообразующихся концентрационных элементов // Автоматизация в промышленности. 2020. №1. С 60 – 64
4. Патент № 2695588 RU. Способ измерения уровня жидкости и устройство для его осуществления (варианты) / А.А. Калашников. МПК G01F 23/22 (2006.01). опубл. 24.07.2019
5. Девис С., Джеймс А. Электрохимический словарь. М.: Мир, 1979. 281 с.
6. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия. Л.: ГХИ, 1963. 608 с.
7. Ralph H. General Chemistry: Principles and Modern Applications. New York: Macmillan Coll Div, 1993. 1115 p.

УДК 621.039

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ТВСА**ДМИТРИЕВ С.М., ДЕМКИНА Т.Д., ДОРОНКОВ Д.В., ДОРОНКОВА Д.С., ПРОНИН А.Н.,
РЯЗАНОВ А.В., СОЛНЦЕВ Д.Н., ХРОБОСТОВ А.Е.*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)*

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований перемешивания теплоносителя между соседними тепловыделяющими сборками в активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА-Т и усовершенствованной ТВСА. Моделирование процессов течения потока теплоносителя в активной зоне проводилось на аэродинамическом исследовательском стенде. Эксперименты проводились на моделях, представляющих собой различные фрагменты твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР и заключались в измерении поперечных и аксиальной скоростей воздушного потока в характерных зонах, расположены как в самих тепловыделяющих сборках, так и межкассетном пространстве. Измерения проводились пятиканальным пневмометрическим зондом. Анализ пространственного распределения поперечных и аксиальной составляющих вектора скорости позволил детализировать картину обтекания теплоносителем дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок различных конструкций. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВСА различных конструкций является основой инженерного обоснования надежности и работоспособности активных зон реакторов ВВЭР.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие решетки, перемешивающие решетки, межкассетное взаимодействие, гидродинамика теплоносителя.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE COOLANT FLOW IN THE VVER
REACTOR CORE WITH TVSA FUEL ASSEMBLIES**DMITRIEV S.M., DEMKINA T.D., DORONKOV D.V., DORONKOVA D.S., PRONIN A.N.,
RYAZANOV A.V., SOLNTSEV D.N., KHROBOSTOV A.E.*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Ye. Alekseyev
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)*

Abstract. The paper presents the results of an experimental study to investigate the coolant interaction in adjoining fuel assemblies in the VVER reactor core composed of TVSA-T and upgraded TVSA FAs. The processes of the in-core coolant flow were simulated in a test wind tunnel. The experiments were conducted using models representing different portions of the VVER reactor core fuel bundle and consisted in measuring the radial and axial airflow velocities in representative areas within the FAs and in the interassembly space. The measurements were performed using a five-channel pressure-tube probe. An analysis for the spatial distribution of the radial and axial velocity vector components has made it possible to obtain a detailed pattern of the coolant flow about the FA spacer, mixing and combined spacer grids of different designs. The accumulated database for the coolant flow in FAs of different designs forms the basis for the engineering justification of the VVER reactor core reliability and serviceability.

Keywords: reactor core, fuel assembly, spacer grids, mixing grids, interassembly interaction, coolant fluid dynamics.

Введение

В настоящее время была проведена частичная перегрузка активной зоны реактора ВВЭР второго энергоблока АЭС «Темелин» [1], в рамках которой были загружены тепловыделяющие сборки новой модификации, пришедшие на замену штатным ТВСА-Т. Обе тепловыделяющие сборки разработаны АО «ОКБМ Африкантов».

По сравнению с тепловыделяющими сборками ТВСА-Т, основным отличием усовершенствованной ТВСА является применение отдельно стоящих перемешивающих решеток (ПР), которые обеспечивают более интенсивное перемешивание теплоносителя в поперечном сечении сборки, что позволило улучшить эксплуатационные характеристики новой тепловыделяющей сборки [2-7].

Поскольку оба типа ТВС являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в одной топливной сборке, но и между соседними сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе обоснования теплотехнической надежности активной зоны [12], что обусловило необходимость проведения комплексных исследований процесса межкассетного перемешивания теплоносителя, между соседними ТВСА различных конструкций в смешанной активной зоне реактора ВВЭР.

Исследовательский стенд и методика проведения эксперимента

Моделирование течения теплоносителя в активной зоне производилось на аэродинамическом исследовательском стенде [8].

Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные модели (ЭМ), геометрически соответствующие конструкциям различных высотных участков твэльного пучка активной зоны реактора ВВЭР. Все компоненты ЭМ пропорционально увеличены на коэффициент геометрического подобия $K_r = 4,4$.

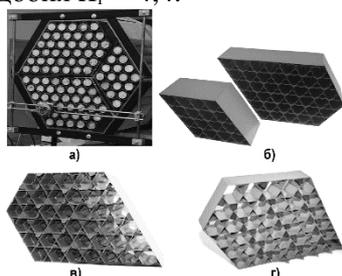


Рис. 1. ЭМ и пояса решеток топливных кассет: *а* – ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР; *б* – пояс ДР усовершенствованной ТВСА и ТВСА-Т; *в* – пояс КДР ТВСА-Т; *г* – пояс ПР усовершенствованной ТВСА

Экспериментальные модели включали в себя один сегмент сборки ТВСА-Т, два сегмента усовершенствованной ТВСА и межкассетное пространство (рис. 1а).

Дистанционирующая решетка (ДР), представленная на рис. 1б, состоит из пружинистых элементов, расположенных согласно треугольной упаковке, и объединённых стальным ободом. Комбинированная дистанционирующая решетка (КДР) ТВСА-Т, представленная на рис. 1в, снабжена турбулизаторами потока, размещёнными по схеме «закрутка вокруг твэла», угол отгиба турбулизаторов составляет 38° . Перемешивающая решетка (ПР), представленная на рис. 1г, снабжена турбулизаторами с углом отгиба в 30° и размещёнными согласно схеме «порядная прогонка». Все решетки снабжены имитаторами профилированного отгиба обода.

Измерение локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя производилось пневмометрическим зондом. Датчик выполнен в виде пяти стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу плоскостях. Полученное поле давлений потока согласно зависимостям, полученным при тарировке, пересчитывалось в направление и величину абсолютной скорости потока [9]. Зонд выполнен таким образом, чтобы не вносить возмущения в поток и не искажать направление его течения. Погрешность определения составляющих вектора скорости не превышает 7%. Снятие показаний с зонда осуществлялось преобразователем давления САПФИР-22Р, имеющие допусаемый предел основной погрешности $\pm 0,25\%$.

В поперечном сечении смешанной активной зоны была выделена показательная область, состоящая из одной штатной ТВСА-Т и двух усовершенствованных ТВСА. В продольном сечении твэльный пучок активной зоны был разделен на три характерных высотных фрагмента, обозначенных как «нижний», «средний» и «верхний» согласно движению потока теплоносителя снизу-вверх.

«Нижний» фрагмент твэльного пучка начинается от первых идентично расположенных ДР тепловыделяющихборок обоих типов (рис. 2а). «Средний» фрагмент твэльного пучка начинается от первых идентично расположенных КДР и ДР штатной ТВСА-Т и усовершенствованной ТВСА (рис. 2б). «Верхний» фрагмент начинается от первой отдельно установленной ПР в усовершенствованной ТВСА (рис. 2в).

Особенностью ЭМ «нижнего» фрагмента твэльного пучка является симметричность входных условий движения потока, т.е. на входе в ЭМ установлены дистанционирующие решетки единой конструкции для обеих ТВСА (рис. 2а). Особенностью ЭМ «среднего» фрагмента твэльного пучка является несимметричность входных условий движения потока, то есть на входе в ЭМ установлены дистанционирующая и комбинированная дистанционирующая решетки соответствующих топливных сборок (рис. 2б). Для ЭМ «верхнего» фрагмента твэльного пучка, помимо установленных на входе дистанционирующей и комбинированной дистанционирующей решетки, характерно наличие отдельно стоящих перемешивающих решеток (рис. 2в).

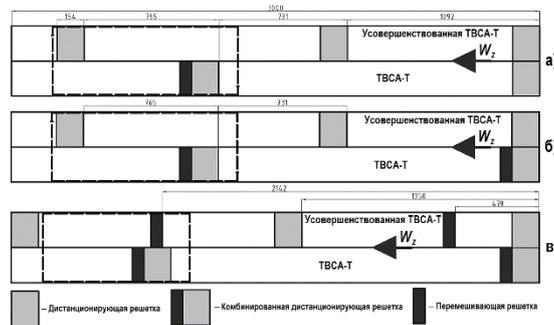


Рис. 2. Схема расположения решеток в различных фрагментах твэльного пучка ТВСА: а - «нижний» фрагмент твэльного пучка; б - «средний» фрагмент твэльного пучка; в - «верхний» фрагмент твэльного пучка

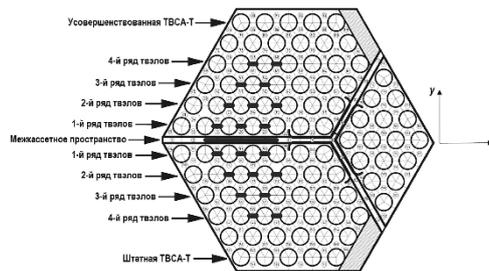


Рис. 3. Схема расположения характерных зазоров в поперечном сечении ЭМ

Методика проведения исследований заключалась в следующем.

1. Для изучения процесса межкассетного перемешивания теплоносителя были выбраны характерные области в поперечном сечении ЭМ, представленном на рис. 3. Данные характерные области расположены в зазоре между соседними ТВСА и зазорах между твэлами каждой из тепловыделяющих сборок (рис. 3).

2. Далее характерные области поперечного сечения ЭМ разбивались на определенное количество зон измерения, в каждой из которых с помощью пневмометрического зонда проводились замеры поля давлений потока в характерных сечениях по длине ЭМ. Области измерения поля давления воздушного потока в продольном сечении ЭМ выделены пунктирной линией на рис. 2. Полученное распределение давлений затем пересчитывалось в проекции скорости на координатные оси x , y , z и усреднялись по зазорам между твэлами и межкассетному пространству (рис. 3).

3. По полученным данным строились графики распределения составляющих вектора скорости и картограммы распределения осевой скорости в поперечном сечении ЭМ.

Обоснование представительности проведения экспериментального изучения течения потока теплоносителя за решетками-интенсификаторами на исследовательском стенде было изложено в работах [3 - 5].

Экспериментальные исследования проводились при постоянной среднерасходной скорости воздушного потока на входе в ЭМ, данный параметр имеет одинаковую величину для каждой из моделей и составляет $W_{cp} = 27,5$ м/с. Число Рейнольдса, при котором проводились

эксперименты, составляло 78000. Температурный диапазон воздушного потока при проведении исследований составлял от 23°C до 25°C.

Результаты исследований межкассетного перемешивания теплоносителя

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить общие закономерности течения потока и заключить следующее:

1. Поперечные течения теплоносителя на всех фрагментах твэльного пучка имеют схожий характер и характеризуются следующим распределением поперечных потоков: при обтекании КДР, расположенной в ТВСА-Т, поперечный поток движется в усовершенствованную ТВСА, а перед ДР и ПР, расположенных усовершенствованной ТВСА, поперечный поток направлен в ТВСА-Т. Сформированные таким образом потоки оказывают значительное влияние на движение теплоносителя в соседних топливных кассетах.

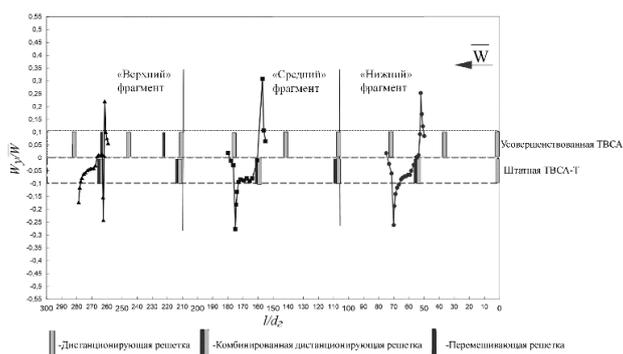


Рис. 4. Распределение поперечной скорости в межкассетном пространстве ($W_{cp} = 27.5$ м/с, $Re = 78000$)

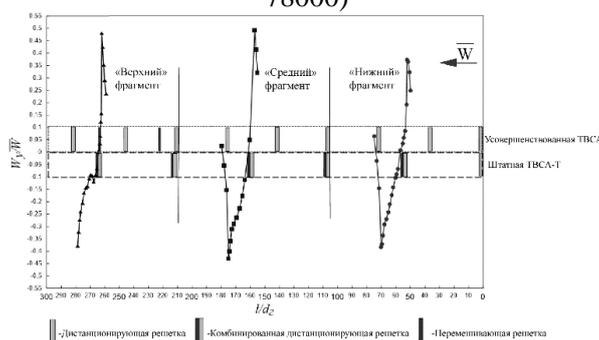


Рис. 5. Распределение поперечной скорости в первых рядах твэлов ТВСА ($W_{cp} = 27.5$ м/с, $Re = 78000$)

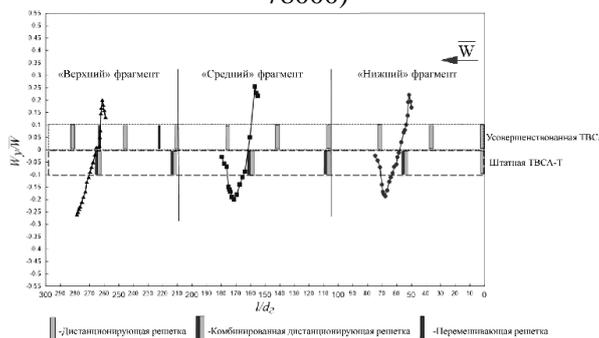


Рис. 6. Распределение поперечной скорости во вторых рядах твэлов ТВСА ($W_{cp} = 27.5$ м/с, $Re = 78000$)

2. В области межкассетного пространства было отмечено:

а) величина поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР имеет близкие значения и составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,3$ для «среднего» фрагмента твэльного пучка и $(W_y/W_{cp}) = 0,25$ для «нижнего» фрагмента (рис. 4). Для «верхнего» фрагмента твэльного пучка величина

поперечной скорости при обтекании потоком КДР и ДР также имеет близкие значения и составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,2$, что несколько меньше, чем на других исследуемых участках (рис. 4);

б) перед ПР, расположенной в «верхнем» фрагменте твэльного пучка, поперечный поток движется в ТВСА-Т, значение скорости составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,25$. Данное явление характерно только для области межкассетного пространства и не наблюдается в твэльном пучке (рис. 6).

3. В первом ряду твэлов каждой из тепловыделяющих сборок, прилегающем к межкассетному пространству, наблюдается следующее:

а) при обтекании потоком КДР и ДР, расположенных в «нижнем» фрагменте твэльного пучка, значения поперечной скорости одинаковы и составляют $(W_y/W_{cp}) = 0,4$ (рис. 5);

б) наибольшая величина поперечной скорости наблюдается при обтекании потоком КДР, расположенной в «среднем» фрагменте твэльного пучка, значение поперечной скорости составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,5$, а при обтекании потоком ДР, поперечная скорость имеет близкое значение, равное $(W_y/W_{cp}) = 0,45$ (рис. 5);

в) в «верхнем» фрагменте твэльного пучка при обтекании потоком КДР значение поперечной скорости составляет $(W_y/W_{cp}) = 0,47$, а при обтекании ДР поперечная скорость имеет величину $(W_y/W_{cp}) = 0,4$ (рис. 5);

г) при движении теплоносителя через «нижний» и «средний» фрагменты твэльного пучка наблюдается рост величины поперечной скорости, а именно при обтекании потоком КДР и ДР «среднего» фрагмента значения поперечной скорости (W_y/W_{cp}) соответственно на 20% и 10% выше, чем при обтекании потоком решеток на «нижнем» фрагменте (рис. 5). В «верхнем» фрагменте твэльного пучка величина поперечной скорости (W_y/W_{cp}) близка к значениям скорости на «среднем» фрагменте (рис. 5).

4. Анализ распространения тангенциальных скоростей теплоносителя в поперечном сечении тепловыделяющих сборок показал следующее:

а) закономерности распределения поперечных течений теплоносителя по длине исследуемых фрагментов твэльного пучка, характерные для ряда твэлов, прилегающего к межкассетному пространству, распространяются на последующие за ним ряды стержней каждой из ТВСА. Распространение тангенциальных скоростей потока теплоносителя в поперечном сечении ЭМ ограничиваются третьим или четвертым рядом каждой из сборок, в зависимости от исследуемого фрагмента;

б) начиная со второго ряда твэлов величина поперечной скорости (W_y/W_{cp}) , при обтекании решеток различных конструкций, для всех исследуемых фрагментов уменьшается в два раза (рис. 5, 6);

в) в «среднем» фрагменте твэльного пучка глубина распространения поперечных течений теплоносителя в сечении смежных тепловыделяющих сборок одинакова и ограничивается четырьмя рядами твэлов, начиная с пятого ряда твэлов наблюдается турбулентное движение теплоносителя, поперечная скорость имеет значение $(W_y/W_{cp}) \approx (0,1 - 0,05)$;

г) в «нижнем» и «верхнем» фрагментах твэльного пучка распространения поперечных течений теплоносителя в сечении ТВСА ограничивается тремя рядами твэлов, начиная с четвертого ряда твэлов наблюдается турбулентное движение теплоносителя, поперечная скорость имеет значение $(W_y/W_{cp}) \approx (0,1 - 0,05)$.

5. Максимальное значение аксиальной скорости потока на исследуемых фрагментах твэльного пучка реализуется в области трех рядов твэлов, расположенных около межкассетного пространства, в момент обтекания потоком поясов КДР и ДР и составляет $(W_z/W_{cp}) \approx 1,45$.

7. Вследствие наличия гидравлически неидентичных КДР и ДР распределение расхода теплоносителя между соседними топливными кассетами приобретает сильную неравномерность. Максимальное различие расхода теплоносителя между смежными кассетами составляет 38%, наблюдается на среднем фрагменте твэльного пучка и обусловлено наибольшей интенсивностью поперечного потока на данном фрагменте твэльного пучка.

8. Выравнивание расхода теплоносителя между смежными топливными кассетами наблюдается непосредственно перед ДР. Различие расхода теплоносителя между кассетами составляет не более 10%.

Заключение

Анализ результатов исследований процесса перемешивания теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР позволил сделать следующие выводы:

а) на движение теплоносителя в твэльном пучке активной зоны, состоящей из кассет ТВСА различных конструкций, оказывают влияние поперечные потоки, сформированные при обтекании гидравлически неидентичных решеток;

б) в области межкассетного пространства величина поперечной скорости при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей и дистанционирующей решеток на «нижнем» и «среднем» фрагментах твэльного пучка соответствующих тепловыделяющих сборок одинакова;

в) максимальная величина поперечной скорости наблюдается при обтекании потоком комбинированной дистанционирующей решетки, расположенной в «среднем» фрагменте твэльного пучка;

г) глубина распространения поперечных течений теплоносителя в сечении тепловыделяющих сборок на «среднем» фрагменте твэльного пучка ограничивается четырьмя рядами твэлов, а на «нижнем» и «верхнем» фрагментах тремя рядами твэлов;

д) при движении теплоносителя через «нижний» и «средний» фрагменты твэльного пучка наблюдается рост величины поперечной скорости потока, в свою очередь, в «верхнем» фрагменте рост поперечной скорости отсутствует;

е) выравнивание расхода теплоносителя между соседними тепловыделяющими сборками на «среднем» и «нижнем» фрагментах твэльного пучка наблюдается непосредственно за дистанционирующей решеткой.

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник. – М.: Машиностроение. – 2013. – С. 415.
2. Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б., Сорокин Н.М. Особенности гидродинамики теплоносителя в альтернативных ТВС реакторов ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2006. – Вып. 4. – С. 70-76.
3. Самойлов О.Б., Куприянов А.В., Фальков А.А., Шипов Д.Л., Молодцов А.А., Лукьянов В.Е. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с перемешивающими решетками // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – Вып. 1. – С. 11-14.
4. Дмитриев С.М., Лукьянов В.Е., Самойлов О.Б. Обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции с перемешивающими решетками-интенсификаторами для ВВЭР-1000 // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2012. – Вып. 1. - С. 99-108.
5. Самойлов О.Б., Шипов Д.Л., Фальков А.А., Богряков В.Г., Сорокин Н.М., Дмитриев С.М. Теплогидравлические и гидродинамические исследования характеристик ТВС альтернативной конструкции ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. - 2004. – Вып. 2. - С. 47-55.
6. Самойлов О.Б., Кууль В.С., Преображенский Д.Г. Результаты создания и развития ТВС альтернативной конструкции для реактора ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. - 2005. – Вып. 1. - С. 126.
7. Самойлов О.Б., Фальков А.А., Морозкин О.Н., Лукьянов В.Е. Уточнение методики учета отклонений локальных параметров при обосновании теплотехнической надежности активной зоны из ТВСА ВВЭР-1000 // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2010. – Вып. 4. - С. 111-119.
8. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 5. – С. 252-257.
9. Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 188-195.

УДК 621.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НАПОРНОЙ КАМЕРЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРАДмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Рязанов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В.,
Пронин А.Н.*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)*

Аннотация. В представленной экспериментальной работе моделировалось явление перемешивания петлевых потоков теплоносителя внутри модели опускной камеры ядерного реактора. Исследование выполнялось на высоконапорном аэродинамическом стенде НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Масштабная модель ядерного реактора обладала конструктивными элементами, характерными для петлевых реакторных установок (опускной кольцевой тракт, нижняя напорная камера). Экспериментальные исследования были проведены в диапазоне чисел Рейнольдса от 20 000 до 50 000, определенных в кольцевом зазоре опускной части модели. В процессе исследований было определено пространственное распределение трассера в потоке теплоносителя в опускном кольцевом канале, а также в нижней напорной камере.

Ключевые слова: гидродинамика потока, перемешивание потоков, ядерный реактор, теплоноситель, метод непосредственного отбора проб, трассер.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW MIXING PROCESSES OF THE COOLANT IN THE PRESSURE CHAMBER OF A NUCLEAR REACTORSergei M. Dmitriev, Alexander E. Khrobostov, Maksim A. Legchanov, Anton V. Ryazanov,
Alexander A. Dobrov, Denis V. Doronkov, Alexey N. Pronin
*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
(Nizhniy Novgorod, Russian Federation)*

Abstract. In the presented experimental research, the phenomenon of the loop flows mixing of the coolant inside the model of the lowering chamber of a nuclear reactor was simulated. The study was carried out at the high-pressure aerodynamic stand of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev. The scale model of a nuclear reactor possessed structural elements characteristic of loop reactor plants (lowering ring duct, lower pressure chamber). Experimental studies were carried out in the range of Reynolds numbers from 20,000 to 50,000, determined in the annular gap of the lower part of the model. In the course of the research, the spatial distribution of the tracer in the coolant flow in the lowering annular channel, as well as in the lower pressure chamber, was determined.

Keywords: flow hydrodynamics, flow mixing, nuclear reactor, coolant, direct sampling method, tracer.

Введение

Создание новых водо-водяных ядерных энергетических установок требует проведения комплекса научно-исследовательских работ по обоснованию безопасности как новых конструкторских решений, так и режимов работы ЯЭУ. Обоснование теплотехнической надежности во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что требует информативности и достоверности параметров теплоносителя с учетом их локального распределения внутри реактора.

Проведение аэродинамического эксперимента с использованием изотермической модели напорного тракта водо-водяного ядерного реактора дает возможность исследовать особенности течения потока и смоделировать температуру теплоносителя на входе в активную зону в процессе перемешивания петлевых потоков. Такие исследования позволяют уточнить распределение температуры на входе в активную зону и в петлях теплообмена, что особенно важно в режимах работы реакторной установки с несимметричной нагрузкой [1]. Также результаты таких исследований необходимы для расчета распределения концентрации борной кислоты в активной зоне при инъекции ее в теплоноситель первого контура [2].

Методика проведения эксперимента

Экспериментальный стенд ФТ-50 НГТУ им. Р.Е. Алексеева (рис. 1) представляет собой аэродинамический разомкнутый контур. Стенд предназначен для проведения исследований

локальных значений скорости и давления потока, а также перемешивания теплоносителя в моделях основного оборудования ядерных реакторов [3]. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная ёмкость, подводной гидравлический коллектор, экспериментальная модель, измерительный комплекс.

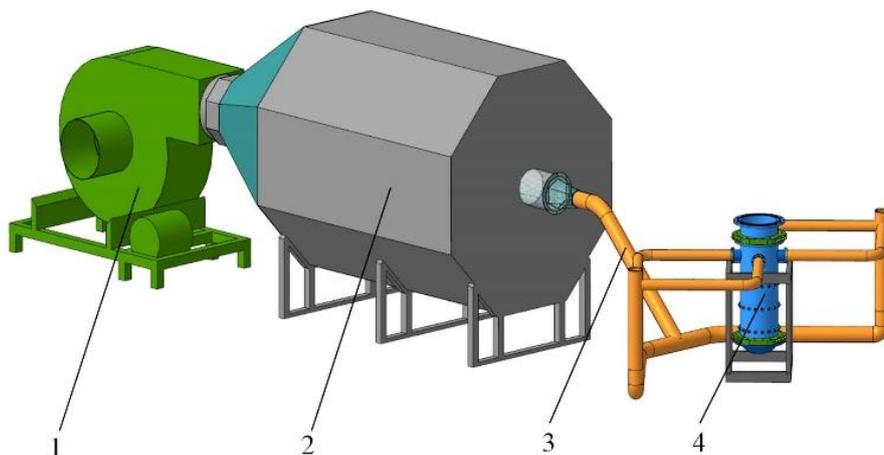


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда: 1 – вентилятор; 2 – ресивер; 3 – подводной коллектор; 4 – экспериментальная модель опускной камеры реактора

Экспериментальная модель (рис. 2) – это упрощенная масштабная модель напорной камеры водо-водяного ядерного реактора с четырьмя петлями циркуляции теплоносителя.

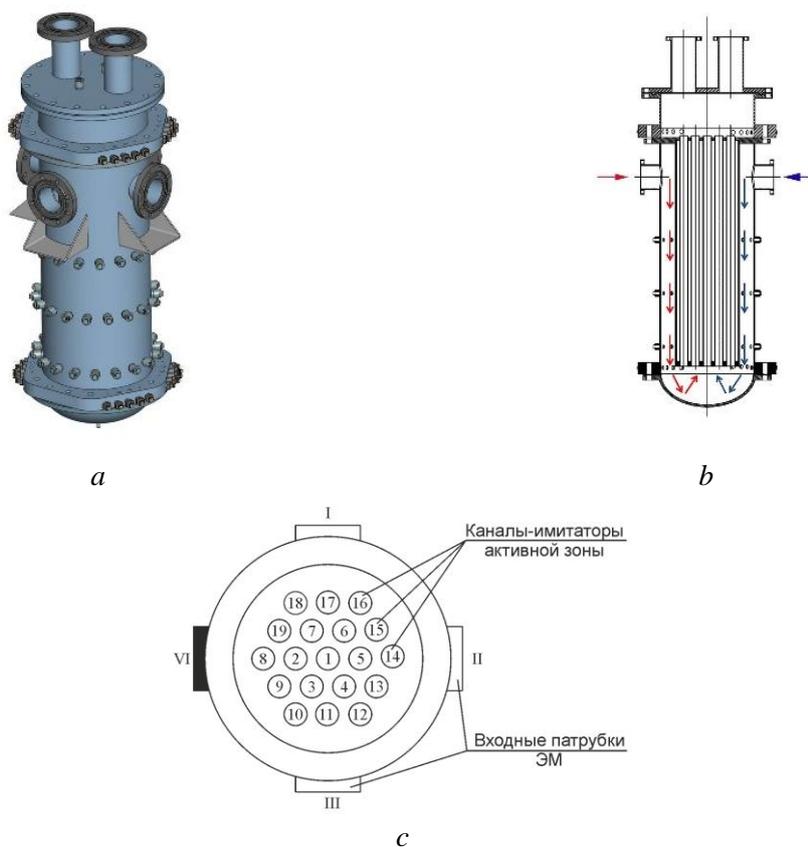


Рис. 2. Экспериментальная модель напорной камеры ядерного реактора: а – общий вид; б – схема движения потоков; с – нумерация каналов-имитаторов активной зоны

Движение рабочей среды организуется следующим образом: радиальный подвод по четырем патрубкам, прохождение опускного кольцевого канала до нижней напорной камеры,

сформированной эллиптическим днищем и нижней частью имитатора активной зоны, подъем через имитаторы активной зоны с последующим осевым выходом из верхней сливной камеры. Конструктивно экспериментальная модель обладает четырьмя вводными патрубками, отстоящими друг от друга на 90 градусов. Имитатор активной зоны представляет собой набор из девятнадцати дросселированных вертикальных каналов, которые моделируют перепад давления в активной зоне.

По одному из патрубков экспериментальной модели подавался воздух с контрастной примесью, по трем другим – воздух.

В целом комплекс экспериментальных исследований, проводимых в НГТУ им. Р.Е. Алексеева, предусматривает варьирование критерия Рейнольдса за счет изменения отдельных входящих в него параметров: скорости потока и кинематической вязкости (используя разные рабочие среды – воздух/вода, а также нагрев среды), в диапазоне $Re=10\ 000\div 50\ 000$.

Изучение особенностей течения теплоносителя внутри модели реактора проводилось с использованием метода ввода трассера (контрастной пассивной примеси), в качестве которого был выбран пропан. Присутствие этого газа в малых количествах в воздушной среде в условиях конвективного высокотурбулентного потока не оказывает влияния на течение.

Для изучения процесса перемешивания петлевых потоков теплоносителя в модели ядерного реактора характерными областями были выбраны два участка модели: опускная кольцевая и нижняя напорная камеры.

В ходе эксперимента были получены данные о распределении скорости рабочей среды и концентрации примеси в характерных областях модели. Результаты далее приводятся в безразмерной форме – в виде безразмерной относительной концентрации примеси и безразмерной скорости.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе экспериментальных работ проводилось исследование картины движения потока теплоносителя при прохождении его через опускную камеру от входных патрубков до имитатора активной зоны.

Во всех экспериментальных режимах пятно контрастного трассера было обнаружено в области противоположной его вводу, что является следствием наличия закрутки потока теплоносителя относительно патрубка подачи трассера. При этом наибольший вклад в спиральное движение теплоносителя вносит опускная камера, при движении внутри которой поток отклоняется на угол примерно 120° ($Re=20\ 000$) и $170\text{--}180^\circ$ (во всех остальных экспериментальных режимах) (рис. 3).

По представленным картограммам распределения трассера в опускной камере можно определить, что для всех экспериментальных режимов угол раскрытия контрастной струи составляет $15\text{--}25^\circ$.

На полученных полях концентрации трассера можно заметить поворот локального максимума концентрации при перетекании теплоносителя от нижнего сечения опускной камеры к сечению входа в каналы–имитаторы активной зоны. При всех числах Рейнольдса угол поворота контрастного пятна находится в диапазоне $50\text{--}60^\circ$ относительно выхода из кольцевого канала. Это объясняется закруткой потока в нижней камере, обусловленной наличием дополнительного осевого вихря.

Следует отметить, что полного перемешивания контрастной примеси в экспериментальной модели не произошло, о чем свидетельствует существенное различие ее относительной концентрации на входе в каналы–имитаторы активной зоны. Для режима $Re=30\ 000$ минимальная относительная концентрация была обнаружена в канале № 8 и составила 0.05, максимальная относительная концентрация 0.44 локально расположена в канале № 12.

В распределении скорости теплоносителя через каналы экспериментальной модели отчетливо наблюдаются две области течения (рис. 4):

- в центральных семи каналах скорость потока ниже среднерасходной скорости;
- в периферийном ряду скорость потока выше среднерасходной скорости.

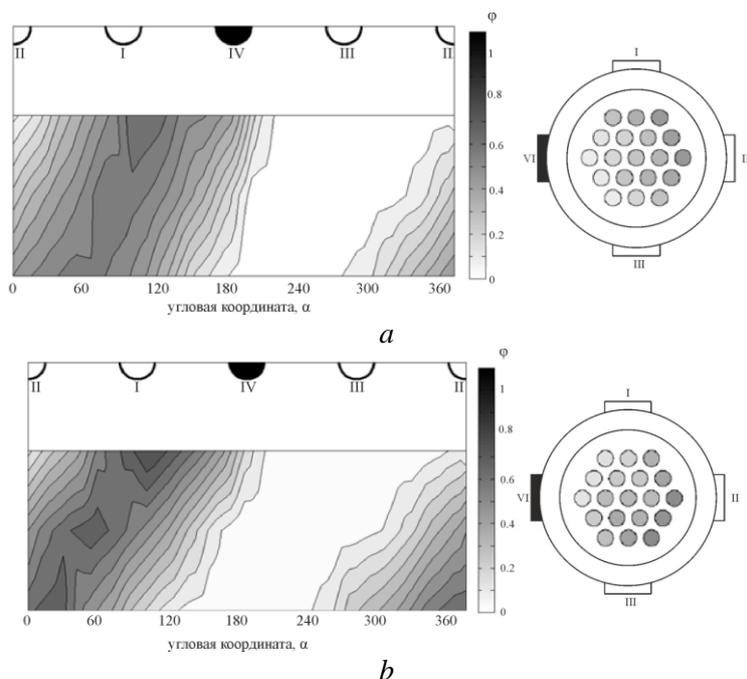


Рис. 3. Картограмма распределения трассера в опускной камере модели реактора (слева) и в нижней напорной камере (справа): *a* – $Re=20\,000$; *b* – $Re=50\,000$

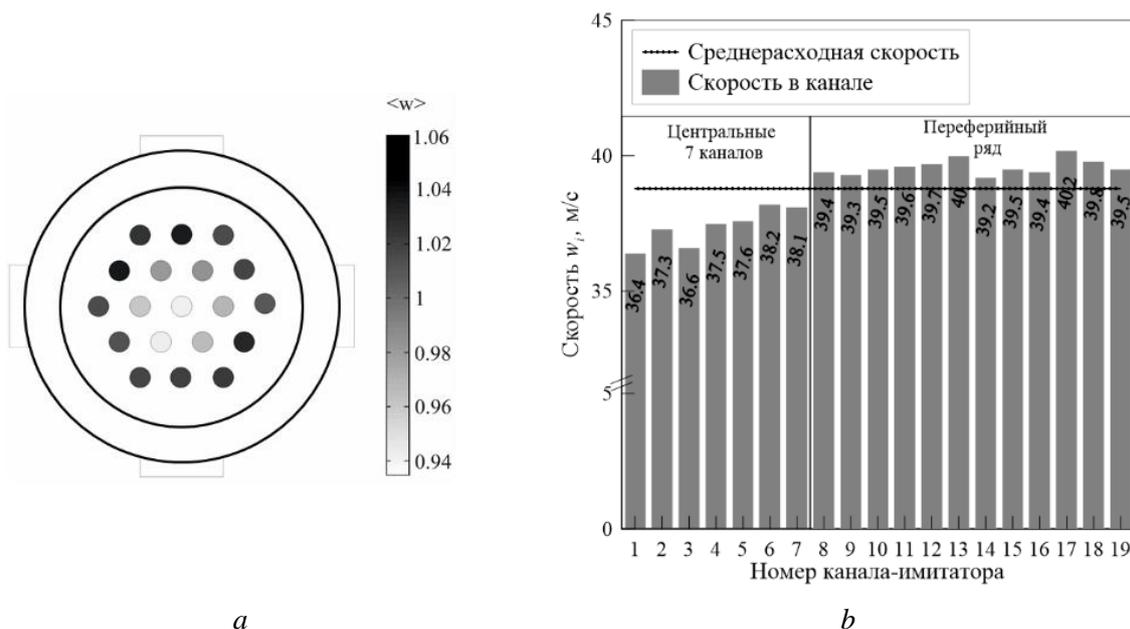


Рис. 4. Распределение относительных скоростей по каналам–имитаторам активной зоны при $Re = 50\,000$: *a* – относительные скорости; *b* – абсолютные скорости

Такое распределение скорости теплоносителя через каналы–имитаторы активной зоны экспериментальной модели является следствием перераспределения поля давления в нижней напорной камере. Существенное занижение полного давления на входе в имитатор активной зоны могло быть вызвано наличием крупного центрального вихря.

Заключение

1. Экспериментальные исследования и анализ результатов перемешивания петлевых потоков теплоносителя в опускной камере модели ядерного реактора показали, что закрутка потока происходит преимущественно в опускной камере модели реактора. Для разных экспериментальных режимов угол закрутки составлял $120\text{--}180^\circ$. При этом в нижней напорной

камере, независимо от значения критерия Рейнольдса, поток дополнительно подкручивался на 60° .

2. Основное перемешивание межпетлевых потоков обусловлено конвективным турбулентным переносом в опускной камере модели реактора, поэтому целесообразно в реакторных установках, для которых требуется обеспечение максимального перемешивания потоков теплоносителя, дополнительные турбулизирующие и перемешивающие устройства располагать в зоне опускного кольцевого канала, а не в нижней напорной камере.

3. Экспериментальные исследования продемонстрировали, что при увеличении числа Re от 20 000 до 50 000 характеристики процесса турбулентного смешения потоков существенно не меняются (максимальные и минимальные относительные концентрации, угол раскрытия струи, поворот потока в нижней напорной камере), однако происходит изменение угла закрутки потока теплоносителя в опускной камере (особенно существенно этот эффект выражен при переходе от режима $Re = 20\ 000$ к $Re = 30\ 000$). Поэтому целесообразно для выявления масштабируемости результатов изучения процессов межпетлевого перемешивания провести исследования с более высокими числами Рейнольдса. В связи с этим в НГТУ им. П.Е. Алексеева создан крупномасштабный стенд с водяным теплоносителем, на котором будут проведены аналогичные исследования при тех же и больших числах Рейнольдса, а также на увеличенной модели.

Список литературы

1. Farkas I., Hutli E., Farkas T., Takács A., Guba A., Tóth I. Validation of CFD calculation using ROCOM flow measurements in primary loop of coolant in PWR model. Nucl. Eng. Technol. 2016. V. 48. Is. 4. P. 941–951.
2. Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Pronin A.N., Ryazanov A.V., Solntsev D.N. Calculation and experimental studies of coolant hydrodynamics in the inlet region of fuel assembly. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1128, Issue 1, 2018, paper № 012125.
3. Дмитриев С.М., Баринов А.А., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования процессов турбулентного смешения в основном оборудовании ЯЭУ. Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы, №3, 2018, С.120-126.

УДК 621.391.82: 621.3.049.77

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИОПОМЕХ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

ТИТОВИЧ Н.А.

*Беларусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Исследовано влияние радиопомех на динамические параметры логических элементов. При проведении испытаний логические инверторы соединялись по схеме кольцевого генератора. Воздействия помехи проводились с использованием ТЕМ-камеры, а также по методу прямого введения мощности. Установлено, что быстродействующие микросхемы более восприимчивы к воздействию помех.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, интегральные микросхемы, радиопомеха, восприимчивость..

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF RADIO INTERFERENCE ON THE DYNAMIC PARAMETERS OF LOGIC ELEMENTS

N. A. TITOVICH

*Belarusian state university of informatics and radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The influence of radio interference on the dynamic parameters of logic elements is investigated. During the tests, the logic inverters were connected according to the circuit of the ring generator. Interference effects were carried out using a TEM-camera, as well as using the method of direct power injection. It was found that high-speed microchips are more susceptible to interference.

Keywords: electromagnetic compatibility, integrated circuits, radio interference, susceptibility.

Введение

В соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 32137-2013, устанавливающим требования к техническим средствам атомных станций по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС), включая требования устойчивости к электромагнитным помехам (ЭМП) и нормы помехоэмиссии, а также соответствующие методы испытаний, разработчик должен обеспечить устойчивую работу аппаратуры в условиях воздействия радиочастотного электромагнитного поля в полосе частот 0,15-2000 МГц и напряженностью от 1 до 30 В/м [1]. Источниками непреднамеренных кондуктивных помех, наведенных радиочастотными электромагнитными полями на входные и выходные порты, в том числе, электропитания переменного тока, электропитания постоянного тока, сигнальные порты, порты управления и ввода-вывода являются средства телекоммуникаций (прежде всего мобильные телефоны), различное промышленное оборудование. Наиболее восприимчивым рецептором к наведенным ЭМП являются полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные микросхемы (ИМС). В некоторых случаях не исключено и воздействие преднамеренных помех. Иногда влияние мощных СВЧ помех приводит к выходу ПП из строя или деградиационному изменению их параметров. Однако наиболее вероятными и трудно диагностируемыми являются маломощные радиопомехи, вызывающие обратимые сбои в работе цифровых и аналоговых устройств. За счет эффекта детектирования ВЧ огибающей радиопомехи происходит изменение параметров ПП и ИМС, что в конечном итоге приводит к функциональному сбою в работе радиоэлектронного устройства (РЭУ). При уровнях поглощенной p - n -переходом мощности в десятки-сотни мВт происходит деформация его вольт-амперной характеристики (ВАХ), уменьшается коэффициент передачи биполярного и крутизна характеристики полевого транзистора, происходит изменение уровней логических нуля, единицы и времени задержки логических элементов (ЛЭ) [2].

Одним из наиболее эффективных путей обеспечения ЭМС РЭУ является учет при проектировании информации о восприимчивости к воздействию ЭМП их элементной базы, в особенности ПП и ИМС. Путем выбора менее восприимчивых элементов, рациональной защиты их наиболее уязвимых цепей можно значительно снизить затраты на обеспечение ЭМС, уменьшить габариты и вес аппаратуры. В связи с этим при проведении исследований необходимо

расширить номенклатуру исследуемых ПП, изучить динамику изменения наиболее критичных их параметров, опробовать различные методики оценки восприимчивости.

Экспериментальные исследования

При исследовании восприимчивости простых микросхем широко использовался метод сравнения выходных сигналов эталонной и исследуемой микросхем, позволяющий определять порог восприимчивости ИМС по критерию «достоверного сбоя». Более точным является критерий «вероятного сбоя», предполагающий одновременный контроль всех параметров выходного сигнала ИМС [2]. Однако точную оценку динамики изменения времени задержки ЛЭ и других ИМС обоими методами сделать трудно, так как необходимо учитывать влияние нагрузки, параметров сигнальных линий. При разработке быстродействующих цифровых систем точная оценка возможных отклонений временных параметров под действием ЭМП очень важна. В ряде случаев изменение времени задержки распространения на единицы и даже десятые доли наносекунды может привести к возникновению гонок сигналов и к сбою в работе оборудования, управляющего сложными технологическими процессами.

При исследовании изменения временных параметров ЛЭ хорошую точность позволяет получить метод «кольцевого генератора» [3]. Известно, что если нечетное число n логических инверторов (ЛИ) соединить последовательно в кольцевую схему, то за счет задержки распространения сигнала в элементах возникает положительная обратная связь и схема начинает работать, как автогенератор. По частоте генерации f_0 можно определить среднее время задержки распространения ЛЭ $t_{з\ p\ ср} = 1/2nf_0$. При воздействии ЭМП на все ЛЭ одновременно изменяется их время задержки распространения, а соответственно и частота генерации кольцевого генератора (КГ). По начальному f_0 и новому f_1 значению частоты можно определить среднее значение изменения времени задержки распространения

$$\Delta t_{з\ p\ ср} = (1/f_0 - 1/f_1) / 2n .$$

В этом случае для получения достоверных результатов важно обеспечить подачу одинакового уровня помеховых воздействий на одноименные выводы ЛЭ (вход, выход, вывод питания). Задача построения экспериментального макета на много упрощается, если радиопомеха воздействует на шину питания ИМС, содержащей несколько ЛЭ.

При построении экспериментальной установки для исследования восприимчивости ИМС в соответствии со стандартом IEC 62132 применяют два способа подачи ВЧ помехи: ТЕМ-камеры [4] и прямого введения мощности [5] (кондуктивный). Структурная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

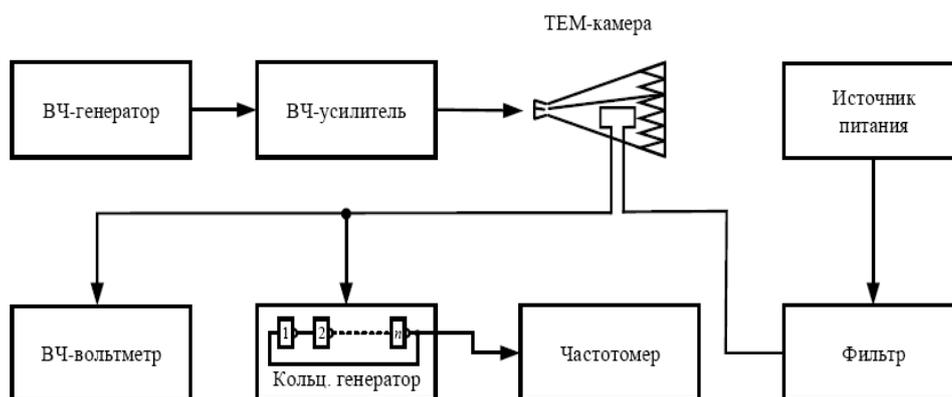


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

КГ из нечетного числа ЛИ помещен в экранированную измерительную камеру. На микросхему, на элементах которой собран КГ, через развязывающий фильтр подается питание. Контроль частоты генератора осуществляется с помощью частотомера или ВЧ осциллографа. При имитации ЭМП способом прямого введения мощности высокочастотная помеха подается от ВЧ-генератора (при необходимости усиливается) непосредственно в цепь питания ИМС. Уровень ВЧ помехи измеряется с помощью ВЧ вольтметра. При исследовании

восприимчивости к воздействию СВЧ помех схема предполагает измерение уровня поглощенной мощности и в соответствии со стандартом [5] после цепочки ВЧ-генератор – ВЧ-усилитель включается измеритель поглощенной мощности. Если применяется метод ТЕМ-камеры [4], то, как показано на рис.1, последовательно в цепь питания включается специальная рамка, расположенная непосредственно в камере, имеющую конструкцию рупорной антенны.

С использованием кондуктивного способа проведены исследования влияния радиопомех на работоспособность цифровых микросхем, производимых предприятиями Республики Беларусь и России. Результаты исследований показывают, что в большинстве случаев более критичными к воздействию радиопомех являются динамические параметры ЛЭ. У ЛЭ И-НЕ серий 531 и 555 недопустимые отклонения времени задержки распространения при включении и выключении наступают при уровнях ВЧ помех в несколько раз меньших тех, которые вызывают критические отклонения уровней логических нуля и единицы. Следует отметить, что ЛЭ с одинаковыми параметрами, но изготовленные по различным технологиям, по разному реагируют на помеховые воздействия. Для сравнения на рис. 2 приведены результаты исследований для ЛЭ 2И-НЕ серий 531 и 1533.

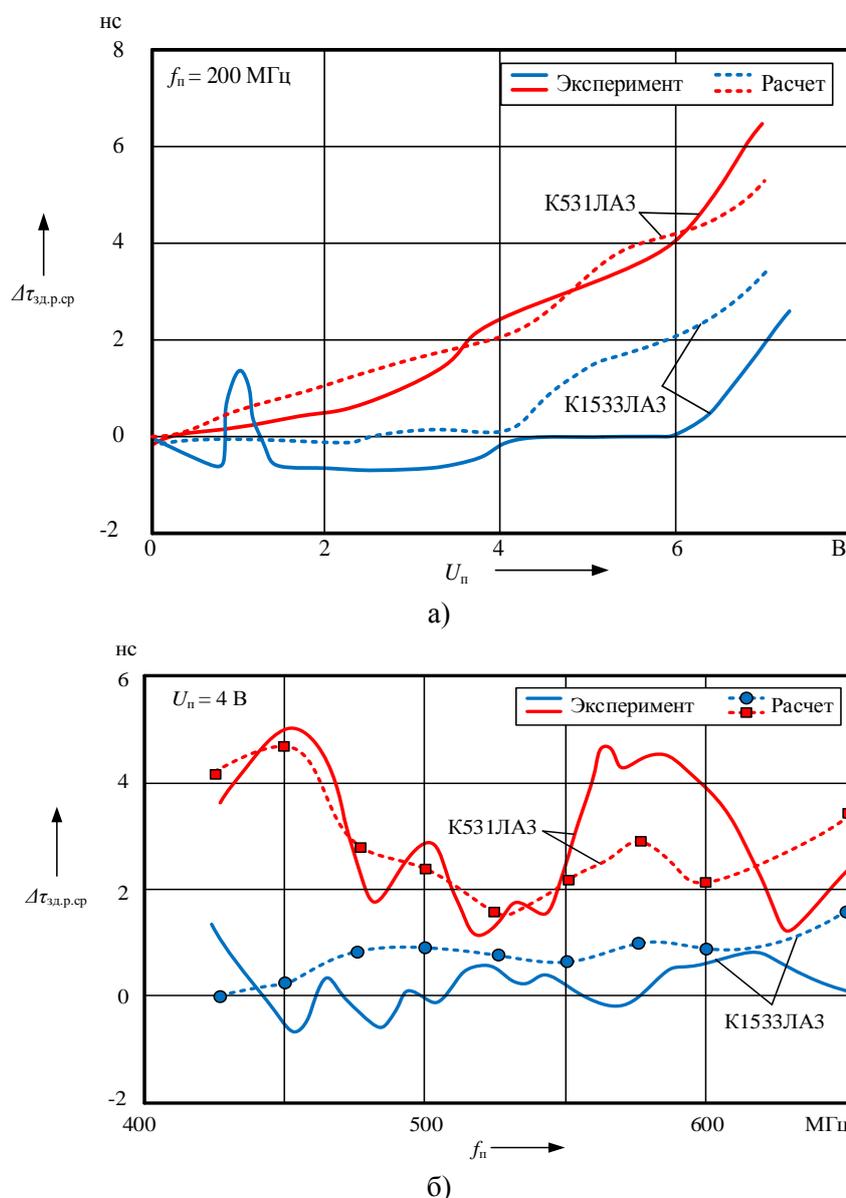


Рис.3. Результаты исследований методом прямого введения мощности.

Из приведенных зависимостей видно, что при разработке быстродействующих схем для уменьшения вероятности сбоев по причине гонок сигналов вместо микросхем серий 531

(аналогично 555 и 1554) следует использовать логические элементы серии 1533, среднее время задержки распространения которых значительно меньше изменяется по действием ЭМП. С целью оценки точности полученных результатов проведен расчет воздействия ЭМП на логические элементы И-НЕ серий 531 и 1533. Для анализа переходных процессов использовалась известная программа SPICE2. Модель базового ЛЭ микросхем представлялась эквивалентной электрической схемой самого элемента и элементами, моделирующими нагрузку, эквивалентную подключению к выходу исследуемого ЛЭ аналогичного элемента той же серии. Входной двухэмиттерный транзистор представлялся как одноэмиттерный, исходя из условий эксперимента, где входы соединялись между собой. Генератор помех моделировался источником ВЧ напряжения U_n , подключенным через разделительную емкость к цепи воздействия ЭМП, в нашем случае к шине питания ЛЭ. Параметры входного импульсного сигнала и напряжение питания моделировались введением в модель соответствующих источников и выбирались типовыми для элементов данных серий. Автор благодарен специалистам СКБ «Немига» Минского НПО «Интеграл» и Фрязинского филиала ЦНИИ «Циклон», предоставивших точные значения параметров моделируемых ЛЭ, что во многом отразилось на качестве результатов. Как видно из рис.2, данные расчетов и эксперимента достаточно хорошо совпадают.

При проведении эксперимента в качестве имитатора радиопомех использовались наиболее мощные отечественные ВЧ генераторы Г-143, Г-144. Их мощности достаточно для достижения значительного изменения параметров ЛИ при кондуктивном способе подачи ЭМП непосредственно в цепь питания через разделительный конденсатор. Для реализации же схемы с ТЕМ-камерой необходим ВЧ усилитель (рис.2).

Для проведения сравнительной оценки в лаборатории Дрезденского технического университета с помощью экспериментальной установки, изображенной на рис.2, содержащей ТЕМ-камеру, были испытаны шесть типов микросхем, выпускаемых западными фирмами: ТТЛ-схем - 7400 (4 двухвходовых элемента И-НЕ), 7402 (4 двухвходовых элемента ИЛИ-НЕ), 7404 (6 инверторов); КМОП-схем - 4011 (4 двухвходовых элемента И-НЕ), 4001 (4 двухвходовых элемента ИЛИ-НЕ), 4069 (6 инверторов). Этот способ подачи помехи более дорогой, т.к. требует больших аппаратных затрат (мощных имитаторов и усилителей ВЧ помех, ТЕМ-камеры). Однако он неизбежен при испытаниях готовых изделий и их блоков. В данном же случае одной из целей работы была сравнительная оценка результатов испытаний, полученных с помощью обоих методов подачи помех, для уточнения методики, использующей кондуктивный метод, и разработки в дальнейшем моделей для расчетной оценки восприимчивости цифровых устройств и их элементов к воздействию ЭМП. Благодаря применению новейшей аппаратуры удалось получить достаточные уровни электромагнитных полей и с высокой точностью измерить изменение среднего времени задержки распространения под действием помех.

Зависимость среднего времени задержки распространения ТТЛ и КМОП микросхем от уровня воздействующих на размещенную в ТЕМ-камере рамку электромагнитных полей представлены на рис. 4. Частота воздействующих радиопомех, как и в предыдущих экспериментах, выбрана равной 200 МГц. Испытания проводились не только для трех элементов в схеме кольцевого генератора, но и для $n=5$ и 7. Для КМОП микросхем исследования выполнены также и для различных напряжений их питания - 5, 10 и 15 В.

Анализ полученных результатов показывает, что при воздействии на перпендикулярно расположенную рамку площадью $0,002 \text{ м}^2$ электромагнитного поля с напряженностью 100 - 150 В/м (наводимое на шину питания ВЧ напряжение помехи соответственно 4 - 6 В) среднее время задержки распространения ТТЛ ИМС серии 74 возрастает на 2 - 4 нс, а КМОП схем на 4-6 нс. Аналогичная динамика $\Delta t_{з \text{ ср}}$ была получены ранее для микросхем серий 155 [3]. При увеличении напряженности поля до 200-250 В/м Δt ТТЛ ЛЭ возрастает на 6 и более наносекунд, а у КМОП схем оно уменьшается на 8-10 нс. Полученные зависимости имеют место как для случая включения трех элементов в схему КГ, так и для $n = 5$ и 7. Такой динамики не наблюдалось при исследованиях отечественных ЛИ. Но это можно объяснить скорее малой мощностью имитаторов, не позволивших создать достаточный уровень полей.

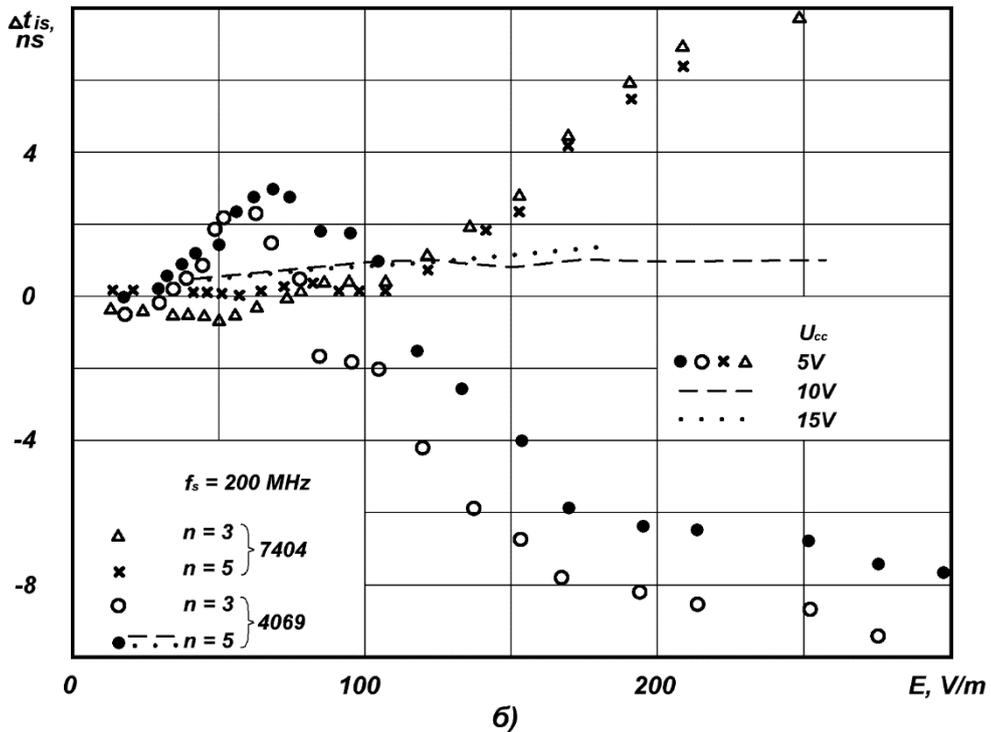
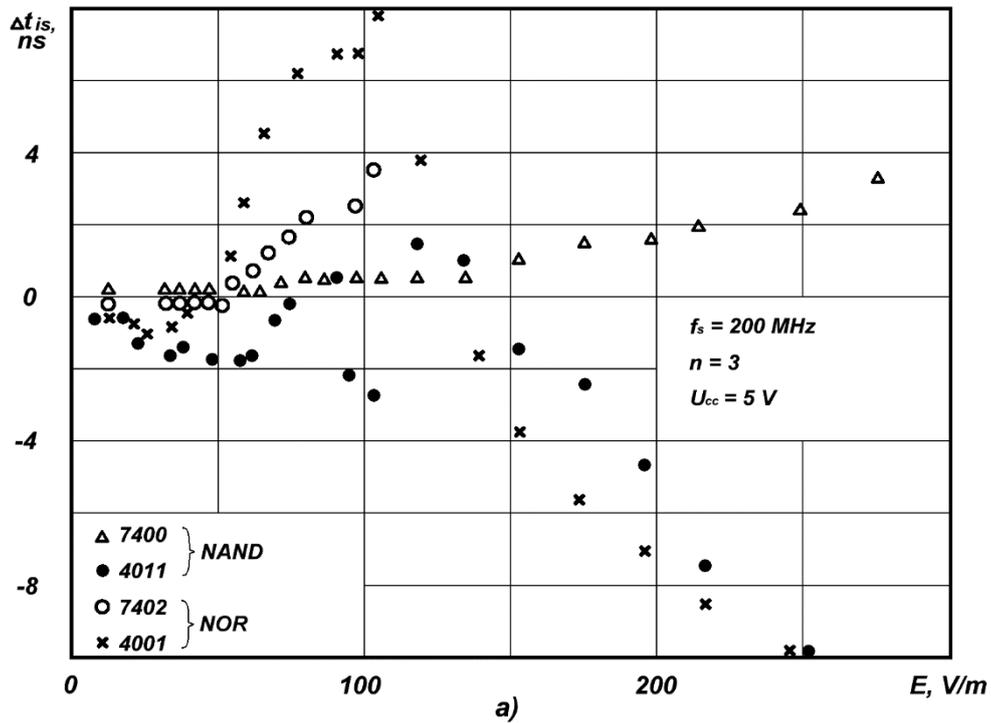


Рис.4. Результаты исследований при воздействии ЭМПс помощью ТЕМ-камеры.

Из приведенных результатов также видно, что в быстродействующих цифровых устройствах, когда к стабильности временных параметров предъявляются высокие требования, при питающих напряжениях 5 В лучше использовать ТТЛШ микросхемы. Для повышения помехоустойчивости КМОП схем необходимо увеличивать напряжение питания до 10 - 15 В. В

этом случае, как видно из рис. 4б, время задержки распространения изменяется незначительно (возрастает на 0,5 - 1 нс).

Заключение

Результаты эксперимента позволяют учесть все особенности влияния ЭМП на ПП и ИМС и разработать модели влияния радиопомех на простейшие элементы: диоды, транзисторы, ЛЭ. Хорошее совпадение результатов, полученных при расчете влияния радиопомех на базовые ЛЭ, с данными экспериментов дают основание использовать эти модели при оценке восприимчивости к воздействию ЭМП более сложных микросхем. Очевидно, что такой подход предполагает тесное сотрудничество радиоинженеров, работающих в этой области, с разработчиками микросхем. В этом случае важным является создание библиотеки точных простейших моделей, описывающих влияние помех на элементы схемы. Используя эту библиотеку для построения сложных схем можно расчетным путем оценить восприимчивость всего устройства, избежав тем самым сложного и дорогостоящего эксперимента. При проведении расчетов важно учитывать не только основные параметры элементов схемы и источника ЭМП, но и особенности конструкции микрочипа и корпуса. Исследования показывают, что неравномерности зависимости кривой восприимчивости ЛЭ от частоты, характерные для рис. 2б, объясняются чаще всего конструкцией корпуса, иногда конструкцией измерительной камеры. Анализ известных подходов к моделированию микросхем показывает, что при расчете удобнее разбивать модель на составные части: ядро, корпус, цепи питания и входные/выходные цепи [6].

При оценке же восприимчивости блоков и устройств целесообразно проводить испытания с использованием ТЕМ-камеры. Перед экспериментом проводится предварительное расчетное моделирование влияния ЭМП на элементы и устройства. Это позволяет значительно сократить затраты времени и средств. Используя для построения расчетов библиотеку простых моделей, можно прибегать к проведению эксперимента только на стадии испытаний законченного блока или устройства.

Список литературы

1. ГОСТ 32137-2013 Межгосударственный стандарт «Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний».
2. Титович Н.А., Ползунов В.В. Исследование восприимчивости полупроводниковых приборов к воздействию электромагнитных помех // Журнал «Доклады БГУИР», 2015, №1, с.114-118.
3. Титович Н.А. Оценка влияния электромагнитных помех на динамические параметры цифровых схем// Радиотехника и электроника. - Мн., Выш. шк. 1991, вып. 20. с.84-87.
4. Стандарт IEC62132-2(2010). Интегральные схемы. Измерение стойкости к электромагнитным помехам, от 150 kHz до 1 GHz. Часть 2. Измерение стойкости к излученным помехам. Ячейка ТЕМ и метод с использованием широкополосной ТЕМ.
5. Стандарт IEC62132-4(2006). Интегральные схемы. Измерение стойкости к электромагнитным помехам, от 150 kHz до 1 GHz. Метод прямой радиочастотной подпитки.
6. Титович, Н. А. Моделирование воздействия радиопомех на полупроводниковые приборы и микросхемы / Титович Н. А., Теслюк В. Н., Тарасенко В. А. // 8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, 16–17 мая 2019 г., Минск: сборник научных статей. В 5 ч. Ч. 4. / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск: Лаборатория интеллекта, 2019. – С. 67-69.

УДК 621.318.433

СИСТЕМА БЕСПРОВОДНОГО ПИТАНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ МОДУЛЕЙ

ЖМОЙДЯК А.П., ЯНОВИЧ А.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В работе рассмотрены возможности метода беспроводной передачи энергии (БПЭ) с помощью взаимосвязанных параллельных колебательных контуров и исследовано влияние различных форм приёмо-передающих катушек на эффективность передачи.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, параллельный колебательный контур, взаимоиנדуктивность.

ROTATING UNITS WIRELESS POWER SYSTEM

ZHMOIDZIAK A. P., YANOVICH A.I.

*Belarusian state university of informatics and radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The article considers the possibilities of the method of wireless power transmission (WPT) using interconnected parallel oscillatory circuits and investigates the influence of various forms of transmitting-receiving coils on the transmission efficiency.

Keywords: wireless power transfer, parallel oscillatory circuits, inductive coupling.

Больше полувека основным способом питания электронной аппаратуры и модулей, располагающихся на вращающихся частях устройства, является вращающееся контактное устройство (ВКУ). ВКУ - устройство, предназначенное для передачи постоянных, переменных и импульсных электрических сигналов между источником и приёмником, расположенными во взаимно вращающихся частях объекта. Такие устройства обеспечивают надёжный электрический контакт между вращающимися частями, но имеют низкую износостойкость, поэтому со временем в таких устройствах увеличивается количество отказов. В связи с этим возникает необходимость разработки новых материалов и конструктивных решений, позволяющих увеличить износостойкость данных устройств, но не устранить её. Альтернативным решением является система беспроводного питания, когда энергия передаётся с помощью электромагнитного поля, что исключает проблему износостойкости контакта.

Существует несколько методов беспроводной передачи энергии с помощью электромагнитного поля. Они подразделяются по характерным зонам распространения электромагнитного поля. Известно, что, в зависимости от расстояния от источника излучения выделяют две условные зоны распространения электромагнитного поля (ЭМП): ближнюю зону и дальнюю зону [1]. В ближней зоне ЭМП не носит волнового характера, то есть в этой зоне преобладают электрические и магнитные поля, накапливающие энергию вблизи поверхности антенны. В дальней зоне ЭМП уже носит волновой характер т.е. преобладают излучающие поля. Классификация методов беспроводной передачи энергии (БПЭ) представлена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация методов БПЭ

Метод СВЧ-излучения позволяет осуществлять точно направленную передачу энергии на значительное расстояние, за счёт использования электромагнитного излучения СВЧ-диапазона (300 МГц – 300 ГГц). Преобразование принятого СВЧ-излучения в электрическую энергию осуществляется с помощью ректенны.

В настоящее время известные устройства, использующие СВЧ-излучение, крайне громоздки, что не позволяет использовать данный метод для замены ВКУ.

В методе, реализуемом с помощью лазера, используются электромагнитные волны оптического диапазона 100 ТГц - 1 ПГц приём и преобразование принятого излучения осуществляется фотогальваническими элементами. Лазерное излучение, из-за низкой эффективности может быть оправдан при передаче огромного количества энергии, что не подходит для наших исследований.

Метод электростатической индукции основан на явлениях, происходящих в обычном конденсаторе, при подаче на него переменного напряжения. Существенным недостатком является необходимость создания высоких потенциалов на передающих пластинах для передачи большой мощности.

Метод электромагнитной индукции основан на явлениях, происходящих в трансформаторе, где первичная и вторичная катушки индуктивно связаны, благодаря сердечнику. Однако если убрать сердечник, тем самым физически разделить катушки получится так называемый воздушный трансформатор.

Недостатком метода является образование помех магнитным полем для окружающих устройств. Данный недостаток можно устранить с помощью использования экранирующих ферромагнитных листов. Достоинствами метода являются возможность передачи большой мощности при небольшом расстоянии между катушками, а также, так как, данный метод является наиболее распространённым.

На основании достоинств и недостатков всех методов БПЭ и анализа результатов лабораторий ведущих компаний в данной сфере, было решено использовать метод магнитной индукции.

Проектируемая система, структурная схема которой изображена на рис. 2, состоит из трёх основных устройств: передатчика, приёмника и устройства контроля.

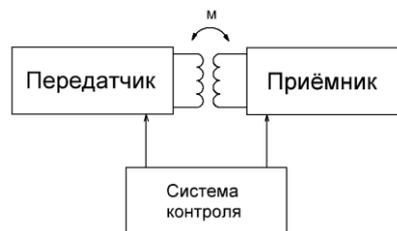


Рис. 2. Структурная схема системы БПЭ

Передатчик осуществляет преобразование постоянного напряжения в переменное напряжение синусоидальной формы с заданной частотой, которое формирует переменное магнитное поле вокруг передающей катушки (рис 3). На приёмной катушке, располагающейся в переменном магнитном поле, возникает ЭДС индукции. Формируемый переменный индукционный ток преобразуется в постоянный для питания нагрузки. Блок контроля следит за оптимальной передачей энергии и при необходимости вносит изменения в работу передатчика и приёмника.

Блок выпрямления и стабилизации построен на мостовой схеме выпрямления и линейном регулируемом стабилизаторе напряжения. Накопительный блок необходим для создания постоянного уровня напряжения на нагрузке независимо от взаимного расположения передатчика и приёмника. В качестве накопительного элемента можно использовать ионисторы (суперконденсаторы), т.к. они обладают долгим сроком службы, малым временем заряда и могут отдавать большие токи в нагрузку.

Блок контроля состоит из блоков контроля в передатчике и приёмнике, имеющих связь через радиоканал 2.4 ГГц. Данная частота выбрана в соответствии с отчётом МСЭ-R SM.2303-2 [2]. В передатчике блок контроля осуществляет выключение генератора при отсутствии приёмной катушки в магнитном поле, формируемом передающей катушкой. В приёмнике блок контроля управляет уровнем мощности на выходе блока выпрямления и стабилизации, а также управляет процессами заряда и разряда накопительных элементов.

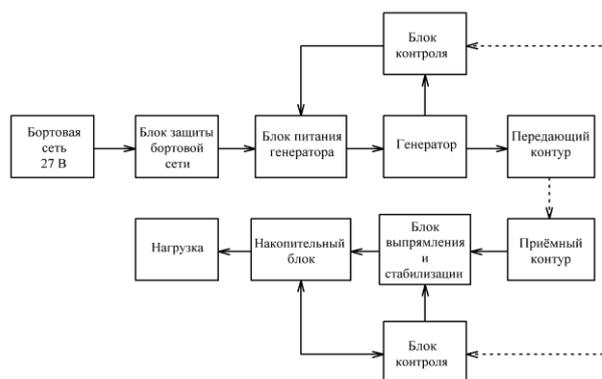


Рис. 3. Функциональная схема системы БПЭ

Очевидно, что передающая и приёмная катушки должны быть расположены перпендикулярно относительно оси вращения устройства, на которое передаётся энергия, а центр катушек должен располагаться на оси вращения для того, чтобы в любой момент времени получать максимальную мощность на приёмнике. Необходимо также рассмотреть случай, когда данное расположение катушек невозможно и предусмотреть постоянное изменение взаимного положения центров приёмных и передающих катушек. Поэтому основными задачами исследований являлись:

1. Изучение различных типов катушек;
2. Изучение влияния расстояния между контурами катушек на эффективность передачи;
3. Изучение влияния взаимного смещения центров катушек на эффективность передачи.

Исследовались три вида катушек, имеющих форму круга: однослойная плоская, намотанная одиночным проводом (1, рис.4); однослойная плоская бифилярная катушка (2); однослойной плоская катушки из многожильного провода (3). Каждая катушка изготавливалась, как в однослойном, так и в двухслойном исполнении.

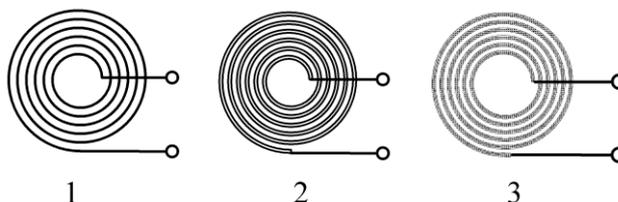


Рис. 4. Внешний вид исследуемых катушек: 1 - Однослойная плоская катушка; 2 - Двухслойная плоская бифилярная катушка; 3 - Двухслойная плоская катушка из многожильного провода

Для расчёта индуктивности плоских спиральных катушек использовалась следующая формула [3]:

$$L = \mu_0 \sum_{n=0}^{q-1} \sum_{f=0}^{q-1} \sum_{k=1}^{\omega} \sum_{m=1}^{\omega} \int_0^{\pi} \frac{\left(r + \frac{d}{2} + h_n n \right) (r + h_n f) \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{h_n^2 (m-k)^2 + \left(r + \frac{d}{2} + h_n n \right)^2 + (r + h_n f)^2 - 2 \left(r + \frac{d}{2} + h_n n \right) (r + h_n f) \cos \varphi}}$$

где μ_0 - магнитная постоянная равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м;

r - радиус минимального витка катушки;

d - диаметр провода;

h_n - шаг намотки;

h - расстояние между соседними слоями катушки;

ω - количество витков;

q - количество слоёв;

n и f - порядковые номера слоёв катушки, внутренний слой принят за нулевой;

k и m - порядковые номера витков катушки в одном слое.

В качестве материалов использовались: для намотки катушек использовались: одножильные медные провода 1,8 мм и 1,15 мм; многожильный медный провод ПВАМ 2,5 кв. мм.

На изготовленном макете системы БПЭ проведены исследования её эффективности для различных конструкций передающей и приёмной катушек. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исследование эффективности системы БПЭ при различных типах катушек

Тип катушек	Мощность, потребляемая передатчиком, Вт	Мощность, отдаваемая приёмником в нагрузку, Вт	КПД, %
Плоская однослойная	36.6	23.3	63.6
Плоская двухслойная	18.7	8.69	46.48
Плоская бифилярная двухслойная	25.2	13.46	53.5
Плоская двухслойная из многожильного провода	19.8	12.37	62

Для измерения зависимости КПД от расстояния между катушками приёмная и передающая катушки, обозначенные соответственно красным и синим цветом, располагались соосно в двух параллельных плоскостях на расстоянии l . Между катушками находился диэлектрик (воздух). При проведении измерений приёмная катушка отдалялась от передающей с шагом в 5 мм.

Из полученных результатов видно, что при передаче энергии на расстояние до 15 мм оптимальным решением будет использование однослойных катушек или двухслойных катушек из многожильного провода.

При вращении системы соосность катушек нарушается вследствие чего снижается передаваемая мощность и принимаемая энергия имеет пульсационный характер. Для снижения потерь и пульсаций необходимо использовать оптимальное количество и расположение катушек. Число катушек берётся из расчёта на максимальную длительность интервала с наибольшей передаваемой мощностью. Поэтому была исследована зависимость КПД системы при смещении центров катушек по эллиптической траектории.

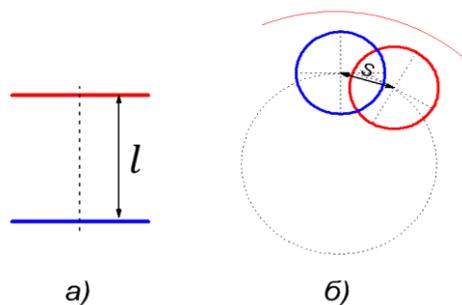


Рис.5. Конфигурация размещения катушек при эксперименте:
а) в плоскостях; б) во вращающейся системе.

По полученным зависимостям можно сказать, что однослойная катушка и двухслойная катушка из многожильного провода являются наиболее перспективными для применения во вращающейся системе. За счёт довольно длинного участка зависимости с КПД $> 60\%$ можно использовать всего пять катушек на приёмной стороне и две катушки - на передающей, что снижает её общую сложность и габариты системы.

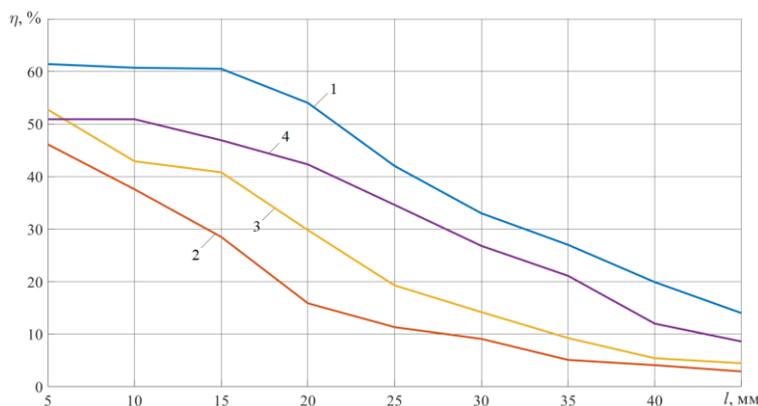


Рис. 6. Зависимость КПД устройства от расстояния между передающей и приёмной катушками: 1 - Однослойная катушка; 2 - Двухслойная катушка; 3 - Двухслойная бифилярная катушка; 4 - Двухслойная катушка из многожильного провода

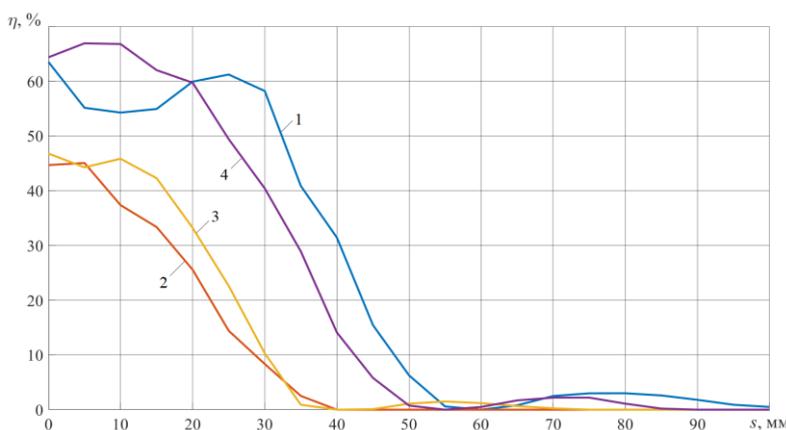


Рис. 7. Зависимость КПД устройства от расстояния смещения центров передающей и приёмной катушек по эллиптической траектории: 1 - Однослойная катушка; 2 - Двухслойная катушка; 3 - Двухслойная бифилярная катушка; 4 - Двухслойная катушка из многожильного провода

Заключение

По результатам исследований можно утверждать о перспективности метода магнитной индукции в области обеспечения питания вращающихся элементов различных устройств. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что однослойная катушка и двухслойная катушка из многожильного провода являются наиболее подходящими для применения в подобных системах питания. В дальнейших исследованиях планируется изучить зависимость передаваемой мощности от количества витков в передающей и приёмной катушках, а также определить минимально необходимое количество приёмных и передающих контуров в системе для обеспечения заданной мощности и уровня пульсаций. Довольно перспективным может быть использование прямоугольных катушек. Используя прямоугольные катушки, возможно, получится сократить необходимое количество приёмных катушек с пяти до трёх. Результаты данной работы будут внедрены в производство новых изделий ОАО «Пеленг».

Список литературы

1. Кураев А.А. Электродинамика и распространение радиоволн / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А. К. Сеницын. Минск: Бестпринт; 2004.
2. Отчёт МСЭ-R SM.2303-2 (06/2017) Беспроводная передача энергии с использованием технологий, не предусматривающих передачу с помощью радиочастотного луча.
3. Немцов М.В. Справочник по расчёту параметров катушек индуктивности. 2-е издание. Москва: Энергоатомиздат; 1989.

УДК 624.074.432(539.374)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ SIMCENTER 3D И SIMCENTER TESTLAB

КОЖЕВНИКОВ С.В., ПИМЕНОВ С.А.

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (Нижний Новгород, Российская Федерация)

Аннотация. Учет влияния внешних воздействующих факторов на работу оборудования АСУ ТП АЭС является важной составляющей получения надежной и конкурентно способной продукции. В этом плане проводятся как расчетные оценки, так и экспериментальная отработка изделий. Это классические (стандартные) составляющие современного процесса проектирования. Однако на современном этапе развития появилось понятие «модельно-ориентированных испытаний». Здесь подразумевается связь испытаний с расчетным (численным) моделированием, а расчетчики и испытатели работают в одной команде в рамках процесса расчетно-экспериментальной отработки. Реализация процесса «модельно-ориентированных испытаний» (расчетная-экспериментальная отработка изделий) рассматривается в рамках использования платформы Simcenter и применительно к изделиям ПТС, на которые действуют различные механические нагрузки динамического характера.

Ключевые слова: надежность, метод конечных элементов, долговечность, радиоэлектронная аппаратура, блочный пункт управления, атомная электростанция.

SIMULATION MODELING OF SOFTWARE AND HARDWARE USING SIMCENTER 3D AND SIMCENTER TESTLAB

SERGEY VASILEVICH KOZHEVNIKOV, STANISLAV ALEKSANDROVICH PIMENOV

Branch of Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center-All-Russian Research Institute of Experimental Physics» «Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov» (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. Taking into account the influence of external influencing factors on the operation of NPP APCS equipment is an important component of obtaining reliable and competitive products. In this regard, both computational assessments and experimental development of products are carried out. These are the classic (standard) components of the modern design process. However, at the present stage of development, the concept of "model-oriented tests" has appeared. This implies the connection of tests with computational (numerical) modeling, and the calculators and testers work in one team within the process of computational and experimental development. The implementation of the process of "model-oriented testing" (computational and experimental development of products) is considered within the framework of using the Simcenter platform and in relation to PTS products, which are subject to various mechanical loads of a dynamic nature.

Keywords: reliability, finite element method, durability, radio-electronic equipment, main control room, nuclear power plant.

Введение

В настоящий момент на атомных электростанциях (АЭС) для управления энергоблоком (ЭБ) используются автоматизированные системы управления АСУ, которые состоят из программно-технических средств (ПТС). ПТС представляют собой сложно-функциональную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА), построенную по модульному иерархическому принципу и являются информационным и управляющим инструментом и состоят из отдельных самостоятельных систем:

- технические средства оперативного диспетчерского управления энергоблоком (ТС ОДУ) – служат для создания на блочном пункте управления ЭБ АЭС средств обобщенной мнемосхемы и резервной зоны контроля, и управления оборудованием нормальной эксплуатации энергоблока;

- программно-технический комплекс системы верхнего блочного уровня управления (СВБУ) – служит для централизации информационных потоков и предоставления оперативному персоналу АЭС необходимых средств управления АЭС;

- система регистрации важных параметров эксплуатации энергоблока (СРВПЭ) – служит для сбора данных от всех предусмотренных источников информации, их запись и хранение, а также для передачи информации на СБДУ о неисправностях технических и программных средств СРВПЭ.

Конструкция ПТС состоит из множества составных элементов, количество которых может достигать нескольких тысяч. В соответствии с техническими условиями эксплуатации и требованиями ГОСТ [1] конструкция ПТС должна быть прочной и работоспособной при воздействии:

- механических (синусоидальная вибрация, удары, сейсмические нагрузки, воздействия от удара падающего самолета и воздушной ударной волны) факторов;
- климатических (перепады температуры окружающей среды в заданном диапазоне и относительной влажности) факторов.

Эффективную разработку данного класса РЭА, быструю адаптацию проектов под новые требования заказчиков, обеспечение конкурентоспособности по техническим параметрам и стоимостным показателям можно реализовать только с применением систем автоматизированного проектирования.

Моделирование ПТС с применением САПР Simcenter 3D

Для решения поставленных задач при конструировании ПТС в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» используется система автоматизированного проектирования (САПР) Simcenter 3D [2] с расчетным модулем от САПР NX [3].

В данном разделе рассматривается пример оценки вероятности безотказной работы секции безопасности (секция ПБ) (рис.1) из состава ТС ОДУ Нововоронежской АЭС-2.

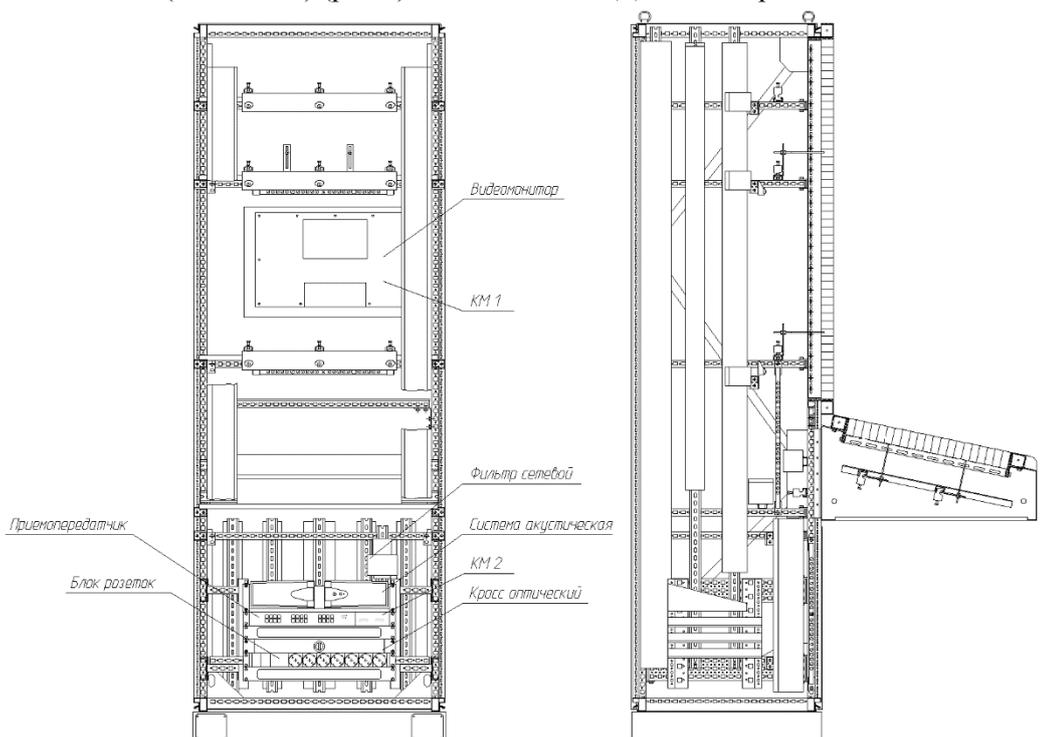


Рис.1. Общий вид секции ПБ

Секция ПБ представляет собой шкаф с установленными в нем электронными блоками. Шкаф состоит из прямоугольного каркаса, сваренного из особо жесткого профиля, передней вибростойкой двери с замком, задней вибростойкой двери с замком, верхней съемной крышки, комплекта сейсмостойкого усиления. На передней плоскости шкафа установлен LCD–монитор размером 24". Монитор встроен в вертикальную мозаичную панель контроля и управления (МПКУ). К передней плоскости шкафа крепится консольная часть с установленной на неё мозаичной панелью. Дно шкафа состоит из съемных панелей. Внизу каркаса шкафа расположены вводные кабельные панели с гермоводами для подводки внешних

соединительных кабелей. Над вводными кабельными панелями установлены шины с кабельными зажимами для закрепления внешних кабелей.

Внутри шкафа установлены 19" адаптеры, на которые монтируется оборудование. Конструктивно это оборудование установлено друг над другом так, чтобы расположенные на их лицевой панели элементы индикации, управления и подключения были видны и доступны при открытой задней двери. В нижней части шкафа и по бокам шкафа установлены клеммные соединители для подключения электропитания секции ПБ. Масса секции составляет 300 кг.

Основным видом нагрузок на ПТС являются динамические нагрузки. Динамические нагрузки для ПТС, представлены синусоидальной вибрацией: максимальное расчётное землетрясение (МРЗ), проектное землетрясение (ПЗ), падение самолёта (ПС), воздушная ударная волна (ВУВ), определение динамических свойств конструкции, работоспособность при воздействии эксплуатационной синусоидальной вибрации. В данном примере рассмотрим воздействие на конструкцию ПТС динамической нагрузки представленной проектным землетрясением силой в 8 баллов включительно по шкале MSK-64 (высотная отметка – +7.8 м). Согласно [1] интенсивность сейсмических нагрузок должна соответствовать одновременному действию синусоидальной вибрации по трем взаимно перпендикулярным осям объекта в диапазоне частот от 0,5 до 100 Гц.

Физические свойства материалов конструкции объекта при расчетах принимаются в соответствии с конструкторской документацией (КД) на объект и данных государственных и отраслевых стандартов.

Расчет с применением CAE-системы Simcenter 3D

CAE-расчет можно разбить на пять этапов.

На первом этапе в соответствии с КД разрабатывается геометрическая модель конструкции (ГМК). При разработке ГМК учитываются особенности компоновки и несущей конструкции.

На втором этапе разрабатывается КЭМ конструкции с учетом следующих положений:

- КЭМ объекта разрабатывается в соответствии с его ГМК;
- при разработке КЭМ объекта использовались КЭ из библиотеки конечных элементов программного обеспечения Simcenter 3D, а также рекомендации отчета;
- при выборе конечных элементов (КЭ) учитывались особенности работы несущей конструкции ПТС в процессе действия динамической нагрузки, представленной проектным землетрясением силой в 8 баллов.

Для построения КЭМ используется смешанный способ построения:

- стержневые элементы конструкции моделируются КЭ класса Beam. Применение класса Beam при расчете дает меньшую погрешность, нежели использование другого класса КЭ;
- плоские элементы конструкции (на примере стандартного металлического цоколя) построены на базе КЭ CQUAD4 (КЭ первого порядка из состава библиотеки Simcenter 3D). Выбор плоских КЭ обусловлен снижением погрешности моделирования при соединении с КЭ класса Beam;
- жесткие элементы конструкции моделируются с применением объемных КЭ первого порядка (КЭ CHEXA8 из библиотеки Simcenter 3D);
- для КЭ сеток, на уровне физических свойств, задаются следующие механические характеристики материала: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность.

На третьем этапе разрабатывается расчетная модель (РМ) ПТС. При разработке РМ в модели учитываются условия закрепления ПТС; коэффициенты демпфирования по частотам; условия нагружения; контрольные узлы.

На четвертом этапе проводится расчёт собственных частот конструкции ПТС. Определение собственных частот проводится с учетом динамических параметров КЭМ. Алгоритм задания динамических параметров КЭМ объекта включает в себя расчет спектра собственных колебаний КЭМ, как модели с распределенными параметрами. При расчётах точек крепления конструкции ПТС считались неподвижными (в узлах модели, расположенных в точках крепления, запрещались все степени свободы). Расчет собственных частот проводился с применением расчетного модуля Simcenter Nastran.

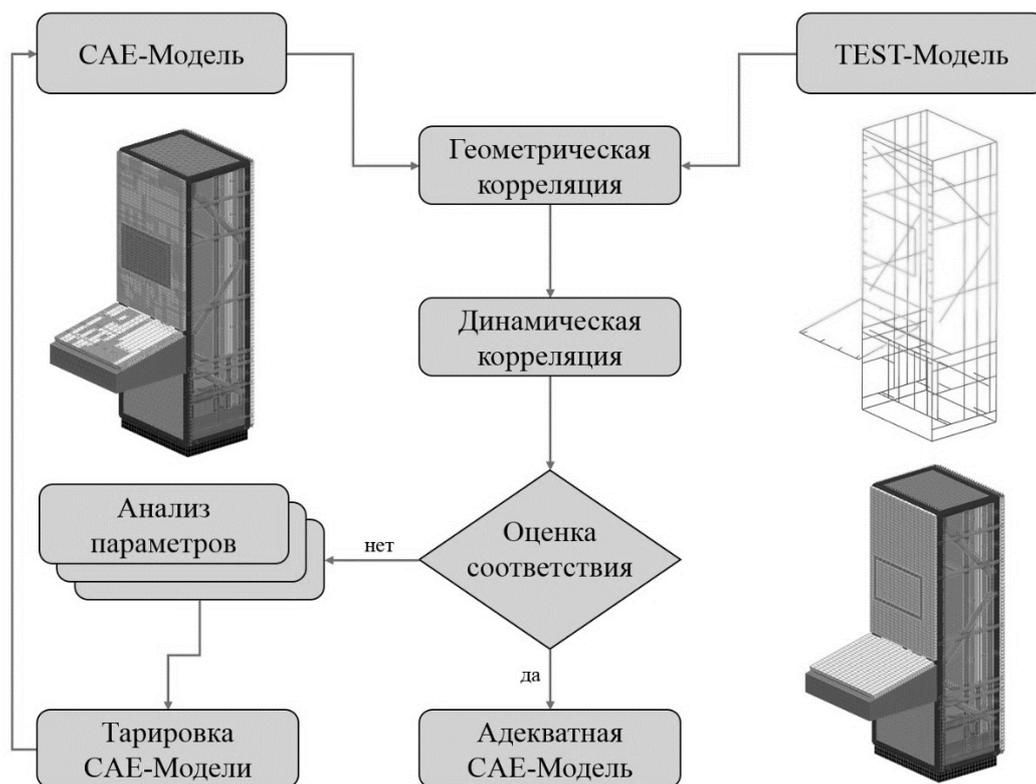


Рис.2. Блок-схема корреляции CAE↔TEST моделей

На пятом этапе проводится расчет напряженно-деформационного состояния (НДС). Для этого в РМ производится учет собственных частот ПТС. Расчет НДС проводится для экстремальных условий воздействия нагрузок. На этом этапе на базе геометрической модели построена CAE-модель. После проведенного анализа выпускается отчет. Расчет уровней эквивалентных напряжений по Мизесу σ_{VM} , приведенных деформации ϵ и перегрузок A в конструктивных элементах ПТС при экстремальных воздействиях [4] проводился средствами программного обеспечения Simcenter 3D с применением расчетного модуля 103 Response Simulation (расчетный функционал САПР I-DEAS, модуль Response Analysis).

Планирование эксперимента

Основными исходными данными при планировании эксперимента являются КЭМ и собственные колебания конструкции ПТС, полученные после инженерного анализа.

При подготовке к испытаниям разрабатывается методика испытаний, в которой определяется оптимальное расположение измерительных датчиков, способы крепления конструкции ПТС к стенду и параметры динамической нагрузки. При необходимости разрабатывается оснастка.

Для обеспечения сравнения результатов контрольные узлы CAE-модели совпадают с местами установки датчиков натурной модели, т.е. расположение и нумерация контрольных узлов соответствует расположению и нумерации датчиков измерения: узел 12482 (рис.1,3) совпадает с КМ1 и узел 12482 совпадает с узлом КМ2 (рис.1,3) [5].

Проведение натуральных испытаний

Натурные испытания проводились на вибрационной электродинамической полупроводниковой установке УВЭП-80000К с измерительным регистрирующим контроллером 16М5. Натурные испытания проводятся в несколько этапов:

- Определение динамических свойств конструкции для каждой оси X, Y, Z;
- Проведение испытаний на режиме согласно ТЗ;
- Выпуск отчета.

Корреляция

Корреляция расчетных и экспериментальных данных производится в Simcenter 3D на уровне «тест» и «экспериментальной» моделей. Общая схема корреляции представлена на рис.2. Дальнейшее уточнение (тарировка) РМ производится на основе корреляции «экспериментальной» и «тест» моделей с применением оптимизатора Simcenter Nastran Sol 200 [6]. Оптимизации подвергается конечно-элементная структура РМ за счет изменения величины дискретизации сеток, параметров материала, ввода специальных конечных элементов и т.п. При этом целевая функция направлена на совпадение расчетных и испытательных собственных частот, их амплитуд и форм колебаний с учетом экспериментальных коэффициентов демпфирования. В результате получается тарированная РМ, результаты расчета собственных частот и откликов на динамические воздействия которой с минимальной погрешностью совпадают с результатами испытаний. Это уже верифицированная по результатам испытаний математическая модель изделия.

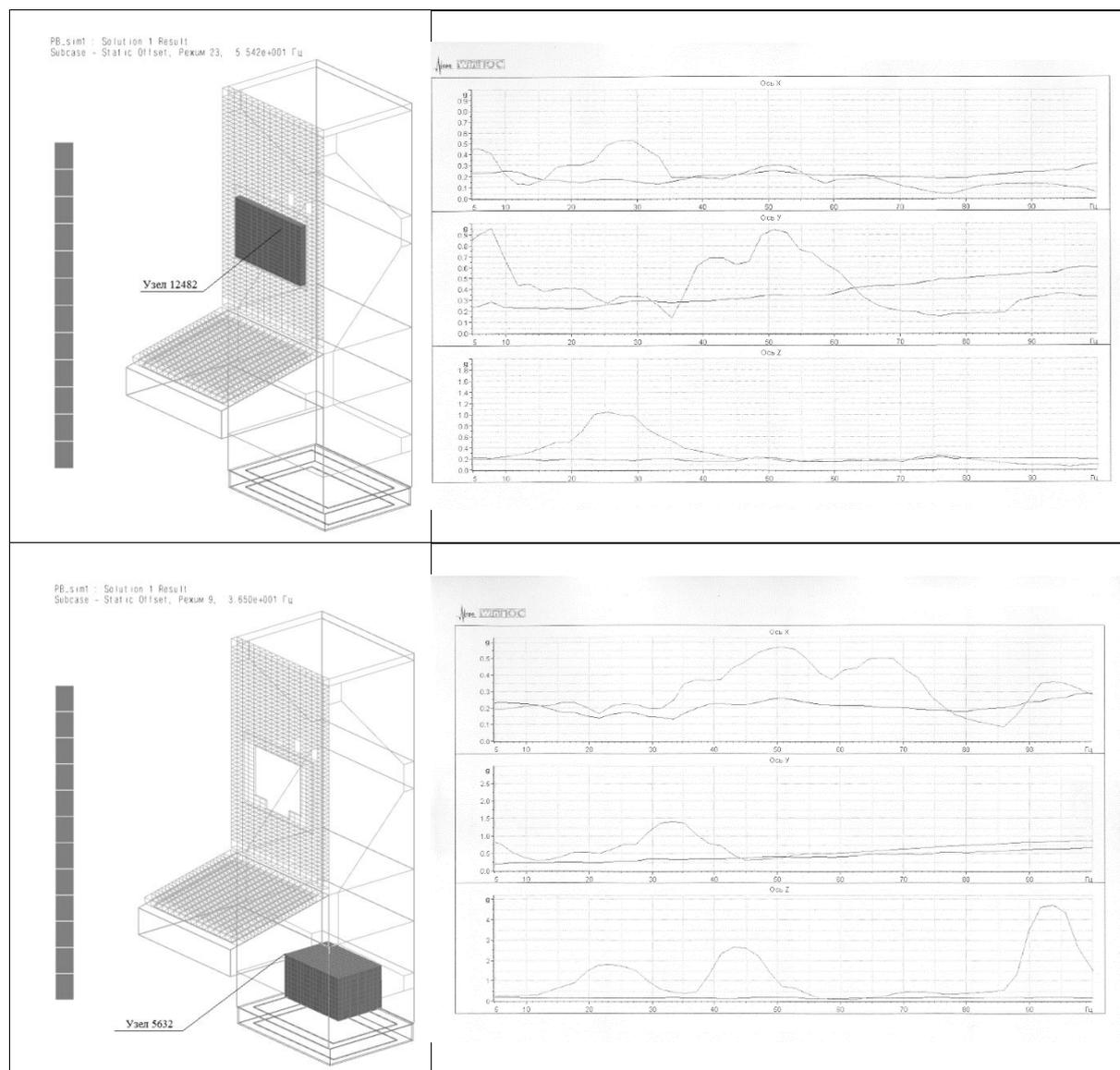


Рис.3. Спектры ответа в контрольных узлах и точках замеров спектров ответа по осям X,Y,Z

На основе верифицированной математической модели можно провести и другие расчетные исследования, которые невозможно воспроизвести на имеющемся испытательном оборудовании ввиду массогабаритных характеристик изделия. Верифицированные

математические модели также могут использоваться в рамках Simcenter Amesim для общесистемных расчетных исследований.

На рис.3 представлены спектры ответа в контрольных узлах и точках замеров спектров ответа по осям X, Y, Z. При сравнении результатов видно, что экстремумы спектров имеют совпадения (по совпадению частот результаты испытаний показали хорошую корреляцию с инженерным анализом и имеют допустимую погрешность не более 10%; уровень амплитуды отклика на данных частотах в расчетных исследованиях в основном превышает уровень амплитуды отклика, полученный в результате испытаний – это свидетельствует о введенных в расчетную модель допущениях в безопасную сторону).

О расчетно-экспериментальной отработке объектов ПТС

Проведенные исследования точности вычислительных алгоритмов, а также сравнительный анализ САЕ-расчета с результатами натурных испытаний и TEST-моделью позволили разработать обоснование распространения результатов испытаний опытных образцов конструкций ПТС на соответствующие ряды идентичных конструкций. Дальнейшее накопление статистических данных дало возможность разработать методику по проведению расчетно-экспериментальной отработки объектов ПТС на подтверждение требованиям технического задания к воздействию внешних факторов. Согласно данной методике натурные испытания проводятся для одной базовой конструкции соответствующего модельного ряда, тогда как для всех остальных модификаций испытания заменяются расчетами в САПР Simcenter 3D.

Заключение

Разработанная методика с применением САПР Simcenter 3D внедрена и используется в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова». Проведение инженерного анализа и натурных испытаний головных/опытных образцов позволили распространить результаты на соответствующие ряды идентичных конструкций для оборудования Белорусской АЭС и АЭС Куданкулам, что оказало экономический эффект при поставках оборудования на один энергоблок АЭС.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 25804.3-83. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Требования по стойкости, прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам;
2. Siemens Simcenter 3D software. Version: 2019.2/ Software license - 1765556/ WebKey Access Code: JBC2Z2SCAZ// Created: 11.11.2019
3. Кожевников С.В. Оценка прочности конструкций программно-технических средств АСУ ТП АЭС при динамическом нагружении [Текст]/ С.В. Кожевников, С.А. Пименов // Молодежь в науке: сборник докладов 14-й научно-технической конференции. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» - 2015. С.525-529.
4. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике [Текст]/ О.К. Зенкевич. -М.: Мир, 1975. 541с.
5. Пименов, С.А. Применение численных методов для оценки надежности конструкций [Текст]/ С.А. Пименов. // Журнал «Новые промышленные технологии» - 2010. -№3. С.55-57.
6. NX Nastran Numerical Methods User's Guide [Electronic version]/ -UGS, 2005. - From: http://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/customer/numerical/numerical.pdf

УДК 004.722.2

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ
ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ**

ЛИСТОПАД Н.И., ЛАВШУК О.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Приведен обзор протоколов динамической маршрутизации. Произведен анализ преимуществ и недостатков протоколов векторов расстояния и протоколов на базе состояния канала. Приведены подходы к решению задач многокритериальной оптимизации с учетом требований качества обслуживания.

Ключевые слова: протокол, динамическая маршрутизация, качество обслуживания.

TECHNOLOGICAL AND THEORETICAL SOLUTIONS FOR DYNAMIC ROUTING**LISTOPAD N.I., LAVSHUK O.A.***Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. Provides an overview of dynamic routing protocols. The analysis of the advantages and disadvantages of distance vector protocols and protocols based on the state of the channel was carried out. Approaches to solving the problems of multicriteria optimization taking into account the requirements of the quality of service are given.

Keywords: protocol, dynamic routing, quality of service.

Введение

В настоящее время в сетях *IP*, составляющих транспортную основу сетей телекоммуникаций нового поколения *NGN (Next Generation Network)*, используется достаточно широкий перечень внутренних протоколов динамической маршрутизации: протокол маршрутной информации (*Routing Information Protocol, RIP*), протокол маршрутизации внутреннего шлюза (*Interior Gateway Routing Protocol, IGRP*), расширенный протокол внутреннего шлюза (*Enhanced IGRP, EIGRP*), протокол взаимодействия промежуточных систем (*Intermediate System-to-Intermediate System, IS-IS*), открытый протокол кратчайшего пути (*Open Shortest Path First, OSPF*) [1] и др.

В данной статье проведем анализ внутренних протоколов динамической маршрутизации.

Протоколы динамической маршрутизации подразделяются на две основные категории: протоколы векторов расстояния и протоколы на базе состояния канала.

Маршрутизаторы, работающие по протоколам маршрутизации на основе векторов расстояния, совместно используют сведения о сетях с напрямую подключенными соседями. Соседние маршрутизаторы далее передают эти сведения своим соседям, пока они не будут известны всем маршрутизаторам корпоративной сети. Маршрутизатор, работающий по протоколу на основе векторов расстояния, не знает весь путь до адреса назначения, ему известно только расстояние до удаленной сети и направление, или вектор.

Протокол *RIP* является внутренним протоколом маршрутизации дистанционно-векторного типа и был первым протоколом на основе вектора расстояния *IP*. В качестве метрики используется количество переходов, которое ограничено максимум 15-ю маршрутизаторами.

Существует две версии *RIP*. Версия 1 передает полные обновления (таблицы маршрутизации) каждые 30 секунд, используя широковещательную рассылку. Версия 2 поддерживает частичные, запускаемые событиями обновления и использует многоадресную рассылку. *RIP* — это протокол медленной маршрутизации по сравнению с другими протоколами внутренних шлюзов. Достоинства протокола *RIP* версии 1: простота реализации, низкие требования к вычислительным ресурсам маршрутизаторов, низкие требования к объемам памяти маршрутизаторов, простота настройки. Недостатки протокола *RIP* версии 1: неэффективность метрики маршрутов, высокая загрузка каналов, ограниченный диаметр сети, медленная сходимость, отсутствие маски подсети, отсутствие подтверждения подлинности, отсутствие шифрования. В версии 2 предусмотрены важные

усовершенствования: аутентификацию, маску сети, групповую адресацию, метку маршрута, ссылку на следующий маршрутизатор. В настоящее время используется на маршрутизаторах более старых моделей с меньшей мощностью и требуют меньшего объема памяти и вычислений. [2]

Протокол маршрутизации *IGRP* разработан корпорацией Cisco, в 1980-х. Протокол создан для преодоления недостатков протокола *RIP*. *IGRP* – дистанционно-векторный протокол, использует алгоритм Бэллмана- Форда. Используется и другими производителями (не только *Cisco*). В протоколе *IGRP* в качестве метрики интерфейса используется величина:

$$M_{IGRP} = [K_1 * B + \frac{K_2 * B}{256 - L} + K_3 * D] \frac{K_5}{R + K_4} \quad (1)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – постоянные коэффициенты; B, L, D, R – отдельные метрики маршрута, причем B – ширина полосы (bandwidth), значение в диапазоне 1200 б/с – 10Гб/с; L – нагрузка (load), определяется долей (0-1); D – задержка (Internetwork delay), значение в диапазоне 10мс-167с; R – надежность (reliability), определяется вероятностью (0-1).

Весовые коэффициенты $K_i, i=\overline{1,5}$ являются административно настраиваемыми параметрами, по умолчанию их значения равны $K_1 = K_3 = 1, K_2 = K_4 = K_5 = 0$.

В результате формула (1) принимает вид

$$M_{IGRP} = [B + D] \quad (2)$$

В протоколе *IGRP* используется широковещательный механизм рассылки маршрутных обновлений.

Достоинства протокола *IGRP*: многопараметрическая метрика, возможность настройки коэффициентов в метрике, невысокие требования к вычислительным ресурсам, простота реализации. Недостатки протокола *IGRP*: медленная сходимость, невозможность работы с маской сети, низкая защищенность (отсутствие аутентификации, отсутствие шифрования).

Протокол *EIGRP* гибридный дистанционно-векторный протокол с элементами протокола состояния канала. В протокол *EIGRP* входит множество функциональных возможностей: поддерживает *VLSM* и бесклассовую маршрутизацию, использует составную метрику, использует частичные обновления для быстрой конвергенции, поддерживает лучший и возможный лучший маршруты, распределяет нагрузку между маршрутами с равной и неравной стоимостью. В силу всех этих факторов протокол *EIGRP* – оптимальный выбор для больших многопротокольных сетей, в которых используются, в основном, устройства компании *Cisco*. [2]

В протоколе *EIGRP* в качестве метрики используется величина:

$$M_{EGRP} = 256[K_1 * M_b + \frac{K_2 * M_b}{256 - M_l} + K_3 * M_d] \frac{K_5}{M_r + K_4} \quad (3)$$

где K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – постоянные коэффициенты; M_b, M_d, M_r, M_l – отдельные метрики маршрута, причем M_b – величина обратной логической пропускной способности маршрута; M_d – кумулятивная логическая задержка маршрута; M_r и M_l – надежность и загрузка маршрута соответственно.

Весовые коэффициенты $K_i, i=\overline{1,5}$ (3) являются административно настраиваемыми параметрами, по умолчанию их значения равны $K_1 = K_3 = 1, K_2 = K_4 = K_5 = 0$.

В результате формула (3) принимает вид (часть $\frac{K_5}{M_r + K_4}$ не используется):

$$M_{EGRP} = 256[K_1 * M_b + K_3 * M_d] \quad (4)$$

Недостатки протокола *EIGRP*: несколько худшая по сравнению с *OSPF* сходимость, работает эффективно, если не изменять параметры по умолчанию.

Протоколы маршрутизации на базе состояния канала, такие как *OSPF*, не производят частой периодической рассылки полной таблицы маршрутизации. Вместо этого после объявления сети отправка обновления производится только при каком-либо изменении в топологии сети, например, при отключении канала. Кроме этого каждые 30 минут протокол *OSPF* выполняет полное обновление. Для протоколов маршрутизации по состоянию канала требуется следующее: более сложный процесс планирования и конфигурации сети, большой объем памяти для хранения большого количества таблиц, более высокая мощность процессора для сложных расчетов маршрутизации.

Протокол *OSPF* основывает метрику стоимости для отдельного канала на его пропускной способности. Метрикой для конкретной сети назначения является сумма стоимости всех каналов пути. Если существует несколько путей к сети, предпочтительным является путь с наименьшей стоимостью, и он заносится в таблицу маршрутизации.

Для расчета стоимости канала протокола *OSPF* используется следующее уравнение:

$$C = \frac{100000000}{P} \quad (5)$$

где P – пропускная способность канала в бит/с.

После получения объявлений *LSA* с описанием всех каналов в пределах соответствующей области маршрутизатор *OSPF* использует алгоритм *SPF*, так называемый алгоритм Дейкстры, для создания топологической древовидной схемы, или карты сети. Каждый маршрутизатор, на котором выполняется данный алгоритм, определяет себя в качестве корневого элемента своего собственного дерева *SPF*. Начиная от корневого элемента, дерево *SPF* определяет кратчайший путь к каждому месту назначения и общую стоимость каждого пути. Маршрутизатор заносит кратчайший путь к каждой сети в таблицу маршрутизации. Объявления о состоянии каналов рассылаются при появлении в сети каких-либо изменений. [2]

Достоинства протокола *OSPF*: использование пропускной способности как метрики, уменьшение размера базы данных состояний каналов, т.е. уменьшение числа расчетов *SPF*, быстрая конвергенция, поддержка бесклассовой маршрутизации, иерархическая структура с использованием областей. Недостатки протокола *OSPF*: Требуется больше памяти и более мощный процессор, первоначальная лавинная рассылка объявлений о состоянии канала заметно снижает производительность сети, высокая сложность конфигурирования.

Однако, все рассмотренные протоколы не укладываются в полной мере в рамки маршрутизации на основе качества обслуживания, поскольку в них заложена идея поиска кратчайшего пути по одной, пусть даже комбинаторной, метрике без учета достигаемых при этом значений других метрик. Так, например, в протоколе *EIGRP* при выборе маршрута может учитываться множество показателей качества обслуживания (задержка, загрузка, надежность, пропускная способность), использование комбинаторной метрики вовсе не гарантирует наилучших значений других метрик. Другой проблемой, связанной с применением существующих протоколов маршрутизации, является несбалансированное использование сетевых ресурсов. Как правило, балансировка между маршрутами с различной стоимостью требует от администраторов сети дополнительных настроек и зачастую ими не используется.

Существуют различные подходы к решению задач многокритериальной оптимизации с учетом требований качества обслуживания. Применяются как комбинаторные [1, 4], так и потоковые [1, 3] для решения в области *QoS*-маршрутизации. Представление прикладной задачи как комбинаторной задачи и решение ее путем направленного перебора является одним из распространенных подходов в процессе анализа и синтеза сетей телекоммуникаций. При первом подходе основу существующих сетей протоколов маршрутизации составляют различные алгоритмы кратчайшего пути в графе. Используются такие алгоритмы как, алгоритм Дейкстры и Беллмана-Форда, которые обеспечивают нахождения дерева кратчайших в выбранной метрике путей от узла источника ко всем остальным узлам, и вычислительная сложность которых приемлема для реализации в реальном масштабе времени [3]. С появлением концепции *NGN* и смещения акцентов при оценке алгоритмов управления трафиком на их возможности по поддержке функций *QoS* графоккомбинаторные модели и методы были существенно пересмотрены. Концепция *QoS*-маршрутизации требует определения такого пути (путей), между заданной парой узлов-адресатов, вдоль которого будут выполняться требования

одновременно по нескольким *QoS*-показателям (метрикам) [1, 4, 5]. В рамках подобной маршрутизации требования к *QoS*-показателям вдоль пути выступают в качестве ограничений на этапе его поиска, задача которого в общем случае может быть сформулирована: как задача поиска пути с ограничениями (*Multi-Constrained Path*) или как задача поиска оптимального пути с ограничениями (*Multi-Constrained Optimal Path*). [1]

Заключение

Проведенный анализ показывает, что задача оптимальной маршрутизации информационных потоков является комплексной. Комплексность проблем заключается в необходимости учета различных критериев и требований при выборе того или иного маршрута.

Сформулированная задача усложняется также и тем, что необходимо принимать во внимание целый спектр различных технологий, используемых в современных сетях телекоммуникаций с учетом их стоимости.

Таким образом, одной из основных перспективных задач можно выделить разработку методов и алгоритмов динамической многокритериальной маршрутизации при минимальной стоимости обеспечения выбранных маршрутов.

Список литературы

1. Евсеева О. Ю., Гаркуша С. В. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания // Проблемы телекоммуникаций. - 2012 - №3(8). С.24-46.
2. Пайпер Бен Администрирование сетей Cisco: освоение за месяц / – М.: ДМК Пресс, 2018.
3. Листопад Н. И., Михневич С. Ю., Хайдер А. А. QoS-маршрутизация информационных потоков в сетях телекоммуникаций // Проблемы физики, математики и техники. - 2016 - №2(27). С.90-96.
4. Листопад Н. И., Воротницкий Ю. И., Бортновский В. В., Хайдер А. А. Многокритериальная маршрутизация информационных потоков // Проблемы физики, математики и техники. - 2017 - №2(31). С.84-90.
5. Листопад Н. И., Воротницкий Ю. И., Хайдер А. А. Маршрутизация в мультисервисных сетях телекоммуникаций на основе модифицированного алгоритма Дейкстры // Вестник БГУ. Сер.1, Физика. Математика. Информатика. - 2015 - №1. С.70-76.

УДК 004.932

АЛГОРИТМЫ УМЕНЬШЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ТОЧЕК, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТРЕНДОВ ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В СВУ АСУ ТП АЭС

ГАРКАВЧЕНКО Д.А., ЗАХАРИН И.В., КУЛИКОВ А.М.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. В работе рассматриваются различные методы понижающей дискретизации исторических данных автоматизированных систем управления для их визуального представления в виде линейных диаграмм. Предложенный алгоритм на основе картографической техники значительно сокращает количество точек данных, но сохраняет важные визуальные характеристики трендов.

Ключевые слова: понижающая дискретизация, аппроксимация, визуальный анализ, тренды, архив, SCADA, АСУ ТП, АЭС.

ALGORITHMS FOR THE REDUCTION OF THE NUMBER OF POINTS REQUIRED TO REPRESENT HISTORICAL DATA TRENDS IN UPPER LEVEL SYSTEM OF I&C NPP

DMITRIY.A. GARKAVCHENKO, ALEXANDER.M.KULIKOV, IVAN.V. ZAHARIN

*National Research Nuclear University MEPHI
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The article discusses several methods for downsampling historical data of automated control system, to enable visualization by line charts. The algorithm based on cartographical technic significantly reduces the number of points, but retains important visual characteristics of trends.

Keywords: downsampling, approximation, visual analysis, trends, archive, SCADA, I&C, NPP.

Представление значений технологических параметров во времени в виде линейных диаграмм, называемых трендами, является неотъемлемой функцией систем верхнего уровня АСУ ТП на базе любой SCADA-системы, так как способствует лучшему пониманию динамики параметров технологического процесса.

Обычно выделяют 2 вида трендов: тренды реального времени – для отслеживания динамики технологического процесса, и исторические – для оценки, анализа технологического процесса на большом интервале.

Как правило, построение линейной диаграммы на компьютере – простая задача. Однако, если визуализируемые данные содержат большое количество точек, значительно превышающее количество пикселей для изображения, то возникают проблемы: итоговый тренд получается сжатым (на одной вертикальной линии отображается множество значений), что затрудняет визуальный анализ. Также требуется большее время на перерисовку тренда при изменении его визуальных параметров (типа линии, масштаба, добавления маркеров). И если исходные данные хранятся централизованно, то требуется большее время для передачи и накладывается большая нагрузка на сеть передачи данных.

Данная проблема актуальна и для СВУ АСУ ТП АЭС на базе ПО ПОРТАЛ, разрабатываемого АО «РАСУ». В архиве СВУ для многих технологических параметров хранится огромное количество значений, так как зоны нечувствительности и апертуры архивирования настроены так, чтобы, в первую очередь, не пропустить изменение параметра при оперативном контроле и управлении. Но при визуальном анализе процесса на длительном интервале многие из этих изменений не нужны, а только усложняют процесс получения, отображения и анализа данных. Поэтому ранее при достижении установленного предела по количеству точек на тренде для уменьшения их количества применялось «тренды с фиксированием шагом», полученные в результате стробирования. При таком подходе просто выбираются значения параметра через равные промежутки времени. Это является уместным только для относительно «гладких» линий, которые не имеют отклонений. Но локальные экстремумы, а также значительные колебания значений параметров являются очень важными для анализа технологического процесса, поэтому необходим другой метод, уменьшающий количество точек, но сохраняющий визуальные характеристики тренда.

Задача состоит в том, чтобы показать только хранящиеся в архиве СВУ значения параметров с их реальными метками времени, исключив некоторое количество точек, наименее

важных для визуального анализа. То есть алгоритм должен возвращать подмножество точек, существующих в исходных данных. Поэтому в данной работе не рассматриваются общеизвестные методы регрессионного анализа, которые по сути создают новые точки данных на основе исходных.

Первый рассмотренный алгоритм основан на идее статистического представления данных. Исходные данные разбиваются на примерно равные по количеству точек наборы. Далее для каждого набора выбирается либо точка с самым часто повторяющимся значением ординаты в наборе (мода), либо точка с медианным значением ординаты, либо точка глобального экстремума, если он достигается на интервале. Основным недостатком такого подхода – практически всегда исключаются локальные пики и впадины в каждом наборе, так как учитывается не значение ординаты, а частота ее появления в наборе. При этом часто практически все значения в наборе уникальны, поэтому если в наборе попадает хотя бы две точки с одинаковой ординатой, то выбирается одна из них.

Во втором алгоритме для выбора точек используется понятие стандартной ошибки оценки. Обычно этот показатель используется, чтобы оценить насколько сильно точки исходных данных отклоняются от прямой регрессии [2]. В данном случае прямая регрессии не строится, а заменяется всевозможными отрезками между реальными точками. В начале фиксируются первая и последняя точки исходных данных, остальные точки разбиваются на примерно равные по количеству точек наборы. Для каждого набора вычисляются прямые, соединяющие каждую точку этого набора со всеми точками следующего набора, затем для каждой такой прямой вычисляется стандартная ошибка оценки относительно точек, мимо которых она проходит. После этого нужно выбрать из каждого набора одну точку так, чтобы сумма стандартных ошибок оценки для отрезков прямых между всеми выбранными точками была минимальной. Данную задачу, можно решить разными способами, например, представить ее в виде ориентированного ациклического графа, в котором вершины – это точки исходных данных, ребра – отрезки прямых, а вес ребер – значение стандартной ошибки оценки. Тогда остается решить задачу о кратчайшем пути, которая имеет множество стандартных решений, например, алгоритм Дейкстры [3]. После нахождения кратчайшего пути вершины этого пути возвращаются в качестве искомого подмножества точек исходных данных. Несмотря на то, что в результате работы алгоритма получается статистически наиболее близкая линия к исходной, ее нельзя назвать хорошим визуальным представлением данных, потому что многие локальные пики сглаживаются, так как обычно получается, что сумма стандартных ошибок оценки оказывается меньше, если исключить значительные выбросы. Также полученный алгоритм является довольно медленным, но есть и другие способы решения задачи динамической оптимизации, которые, вероятно, могут оказаться быстрее и предпочтительнее, так как для графического представления не обязательно нахождение абсолютной минимальной суммы, возможно, будет достаточно небольшой суммы.

Основной проблемой первых двух алгоритмов является сглаживание локальных пиков, поэтому третий алгоритм основан на идее максимизации длины итоговой линии тренда. Действительно, чем больше локальных пиков охватит итоговая линия, тем больше окажется ее длина. Для этого, как и во втором алгоритме, фиксируются первая и последние точки, остальные точки разбиваются на наборы, вычисляются все отрезки прямых, соединяющие точки одного набора с точками следующего, после этого строится ориентированный ациклический граф, но в данном случае весом ребер являются длины отрезков. Тогда остается решить задачу поиска самого длинного пути. Такая задача решается за линейное время на ориентированных ациклических графах, например, если заменить на противоположный знак весов всех ребер и найти кратчайший путь. Визуально результаты работы алгоритма получаются значительно лучше предыдущих, большинство локальных пиков и впадин попадают в итоговую выборку, но сам алгоритм получается слишком сложным и неэффективным, поэтому в таком виде не может быть применен в системах верхнего уровня АСУ ТП, так как может оказывать негативное влияние на выполнение других функций СВУ.

Во всех описанных выше алгоритмах используется разбиение исходных данных на наборы с примерно одинаковым количеством точек, что является тривиальным только при равномерном распределении точек по оси абсцисс. Но в архиве СВУ АСУ ТП АЭС данные могут располагаться крайне неравномерно, если рассматривать длительный интервал времени, так как запись значений в архив, осуществляется по изменению с учетом апертуры, а не

циклически, и в разных режимах работы энергоблока параметры технологического процесса могут меняться с разной скоростью и в разных диапазонах. Поэтому вместо попыток упрощения и оптимизации описанных выше алгоритмов был применен другой подход.

Были рассмотрены алгоритмы из области картографической генерализации, где выполняется научно обоснованный отбор и обобщение географических объектов для их отображения на карте. Задача упрощения отображения, например, береговой линии на карте во многом похожа, на задачу понижающей дискретизации исторического тренда, только точки тренда расположены строго по возрастанию абсциссы в отличие от точек на карте. Одним из наиболее известных алгоритмов из этой области являются алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера [4].

Оригинальный алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера получает на вход множество исходных точек и заданное значение ϵ , которое определяет максимальное расстояние между исходной и итоговой линиями. Первая и последняя точки фиксируются, после этого среди оставшихся точек находится наиболее удаленная точка от отрезка, соединяющего первую и последнюю точки. Если расстояние от найденной точки до отрезка, меньше заданного ϵ , то алгоритм завершается, и все невыбранные ранее точки отбрасываются. Если это расстояние больше, то алгоритм рекурсивно вызывает себя для подмножеств точек от начальной до текущей и от текущей до конечной точки до тех пор, пока все точки не будут выбраны или отброшены. По окончании всех рекурсивных вызовов итоговая линия строится только из тех точек, что были выбраны. В результате итоговая линия охватывает большинство локальных экстремумов, при этом реализация алгоритма достаточно простая и эффективная, и она не требует предварительного разбиения исходных данных на наборы с примерно одинаковым количеством точек.

Алгоритм был доработан для практического применения для трендов технологических параметров. Во-первых, для упрощения вычислений вместо расстояния от точки до прямой используется отклонение по вертикали. Во-вторых, нельзя использовать абсолютное значение ϵ , так как значения разных технологических параметров изменяются в разных диапазонах, поэтому используется относительное значение ϵ от диапазона изменений. В-третьих, в различных режимах работы энергоблока один и тот же технологический параметр может изменяться в разных диапазонах, и для лучшего наблюдения таких параметров на трендах используется логарифмическая шкала. Поэтому, чтобы реализовать возможность понижающей дискретизации в логарифмическом масштабе, исходные данные предварительно разбиваются на наборы, так чтобы в пределах одного набора были точки, отличающиеся по ординате незначительно (не более чем в 100 раз – определено эмпирически) и алгоритм применяется к каждому из наборов отдельно. Также при предварительном разбиении исходных данных учитываются признак качества (достоверности) данных. В-четвертых, в отличие от предыдущих алгоритмов оригинальный алгоритм Рамера-Дугласа-Пекера возвращает заранее неизвестное количество точек, поэтому если итоговое количество точек оказывается больше установленного предела, то алгоритм выполняется заново с увеличенным значением максимального расстояния ϵ , количество таких итераций ограничено. Благодаря простоте и эффективности алгоритма, его повторение остается незаметным для конечного пользователя системы. Понижающая дискретизация применяется только при достижении установленного предела по количеству точек на тренде и подтверждается пользователем.

Таким образом, на основе алгоритма Рамера-Дугласа-Пекера разработан и реализован в ПО ПОРТАЛ алгоритм понижающей дискретизации, сохраняющий общий вид тренда с его локальными экстремумами при значительном сокращении числа точек. Данный алгоритм проверен для различных наборов данных и уже применяется в системах верхнего уровня АСУ ТП АЭС.

Список литературы

1. Зверков В.В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС / В.В. Зверков. – М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2013. – 558 с.
2. Драйпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 210 с.
3. Алексеев В.Е. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений: учебник / В.Е. Алексеев, В.А. Таланов. – М.: БИНОМ, 2012. – 319 с.
4. Douglas D., Peucker T. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature». The Canadian Cartographer, 1973, 10(2), 112–122

УДК 621.382

**УЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА**
ЛОВШЕНКО И.Ю., СТЕМПИЦКИЙ В.Р.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Представлены результаты моделирования воздействия потока протонов на электрические характеристики приборной структуры полевых транзисторов на основе GaAs. Определены зависимости максимального тока стока I_C и напряжения отсечки от величины флюенса и энергии протонов, а также температуры окружающей среды.

Ключевые слова: полевой транзистор, GaAs, флюенс протонов, эффекты смещений, не ионизационные потери энергии, моделирование.

**THE INFLUENCE OF PROTONS IN THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS
OF ARSENIDE-GALLIUM FIELD EFFECT TRANSISTOR**
I.YU. LOVSHENKO, V.R. STEMPIISKY

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The results of simulation the influence of the proton flux on the electrical characteristics of the device structure of field-effect transistors based on GaAs are presented. The dependences of the maximum drain current I_C and cut-off voltage on the fluence value and proton energy, as well as on the ambient temperature are shown.

Keywords: MESFET, GaAs, Fluence Proton, Displacement Effects, Nonionizing Energy Loss, Simulation

Введение

Элементная база современных объектов космической и ядерной техники подвергается воздействию ионизирующих излучений, основными из которых является гамма-излучение (γ), нейтронное (n), электронное (e), протонное (p). Альфа-частицы (α), осколки деления F_p и другие частицы, возникающие в ядерном реакторе или в зоне ядерного взрыва, также могут влиять на деградацию эксплуатационных характеристик. Однако их влияние не столь значительно (например, нейтрино, мезоны и др.) [1].

При воздействии потока частиц на приборные структуры микроэлектроники возможны два основных механизма: ионизация и повреждения, вызванные в результате упругого рассеяния первичных частиц, а также фрагментов, образующихся в ядерных реакциях (неупругое рассеяние) падающих протонов или нейтронов на ядрах мишени (эффекты смещений). Ионизация в данной работе не рассматривается. Нейтроны, протоны, альфа-частицы, тяжелые ионы и фотоны очень высоких энергий вызывают эффекты смещений: изменяется расположение атомов в кристаллической решетке и увеличивается количество центров рекомбинации (дефектов), уменьшая концентрацию свободных носителей заряда и ухудшая эксплуатационные характеристики приборных структур. Наиболее чувствительными к эффектам смещений параметрами объемного материала являются время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда, подвижность и концентрация носителей заряда [2]. Величина проявления эффектов смещений зависит от типа излучения частиц, общей дозы, потока и энергии излучения, температуры окружающей среды, рабочего напряжения, фактического состояния устройства в момент облучения и т.д. Эти проблемы затрудняют тестирование, увеличивают сложность использования теоретических расчетов для прогнозирования радиационного воздействия, повышают время проектирования приборных структур и требуют значительного количества тестовых образцов. В современных системах автоматизированного проектирования в микроэлектронике Silvaco [3] и Synopsys [4] реализованы модули учета эффектов смещений.

Таким образом, в работе представлены результаты оценки процессов деградации электрических характеристик приборных структур полевых транзисторов на основе GaAs под влиянием потока протонов посредством компьютерного моделирования.

Структура

Типовая приборная структура n -канального полевого транзистора на основе GaAs (n -GaAs MESFET) представлена на рис. 1. В качестве подложки выступает арсенид галлия, легированный бериллием до концентрации 10^{13} см^{-3} , с кристаллографической ориентацией (100). Области канала, стока и истока сформированы с использованием ионной имплантации кремния через маску. Максимальная концентрация примеси в областях стока и истока составляет $1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Глубина залегания сток-истоковых областей равна 0,342 мкм, области канала – 0,3 мкм. В качестве материала затвора используется титан. Контакты к областям стока и истока выполнены алюминием. Таким образом, при моделировании технологического маршрута формирования приборной структуры n -GaAs MESFET выделено 9 операций: задания исходных данных (область моделирования, расчетная сетка, параметры подложки) и последовательных операций имплантации бериллия (энергия $E = 100 \text{ кэВ}$, доза $D = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) и кремния (энергия $E = 100 \text{ кэВ}$, доза $D = 10^{12} \text{ см}^{-2}$), диффузии (длительность $t = 10$ минут, температура $T = 850 \text{ С}$), формирования титанового затвора (толщина 0,3 мкм) и областей спейсеров (оксид кремния, максимальная толщина 0,4 мкм), имплантация кремния (энергия $E = 50 \text{ кэВ}$, доза $D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$) и диффузия (длительность $t = 10$ минут, температура $T = 850 \text{ С}$) для формирования сток-истоковых областей, формирование алюминиевых омических контактов (толщина 0,2 мкм).

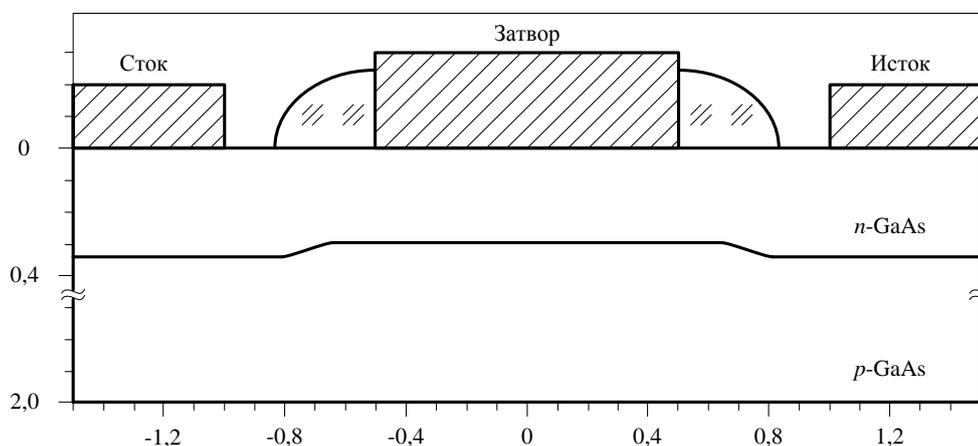


Рис. 1. Приборная структура арсенид-галлиевого полевого транзистора

Напряжение отсечки и максимальный ток стока для полученной структуры при температуре окружающей среды $T = 303 \text{ К}$ равны $V_{\text{отс}} = -0,4 \text{ В}$ и $I_{\text{Сmax}} = 1,02 \text{ мкА}$ (при напряжениях на стоке $V_{\text{С}} = 1 \text{ В}$ и затворе $V_{\text{з}} = 0 \text{ В}$) соответственно.

Результаты

Для прогнозирования деградации параметров, вызванного проникающим излучением, часто достаточно рассмотреть только первый этап процесса образования дефектов. Образование объемных дефектов в структуре полупроводникового прибора пропорционально неионизирующей потере энергии (англ. *Non-ionizing Energy Loss, NIEL*) – общей кинетической энергии, передаваемой атомам решетки. При моделировании и расчетах кроме параметра NIEL, также используют термин кинетическая энергия, высвобождаемая в материи (англ. *Kinetic Energy Released in Material, KERMA*). Отношения между KERMA и NIEL можно записать как

$$KERMA = NIEL \cdot F \cdot m, \quad (1)$$

где $NIEL$ – потеря неионизирующей энергии; F – интегральный поток излучения (флюенс).

Параметр $NIEL$ может быть использован при экстраполяции деградации параметров устройства, измеренной для частицы с данной энергией, на другие энергии («масштабирование $NIEL$ »).

В специализированных программных комплексах приборно-технологического моделирования в микроэлектронике для описания воздействия потока частиц на

характеристики материала применяют модель радиационного флюенса (*Radiation Fluence Model*), которая позволяет прогнозировать скорость генерации дефектов. В соответствии с моделью общая плотность дефектных состояний NT из-за флюенса излучения с определенной энергией и типами излучения определяется как

$$NT = \alpha_D \cdot \rho \cdot NIEL \cdot F, \quad (2)$$

где α_D – коэффициент повреждения; ρ – плотность материала.

Неионизирующие потери энергии для GaAs определены с использованием проекта SR-NIEL [5] для значений пороговой энергии смещения $E_{d1} = 9,5$ эВ [6], $E_{d2} = 10$ эВ [7], $E_{d3} = 21$ эВ [8] и $E_{d4} = 25$ эВ [9]. Для полученных величин определены средние значения, которые описываются аппроксимирующей зависимостью (рис. 2). Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными, представленными в работе [10].

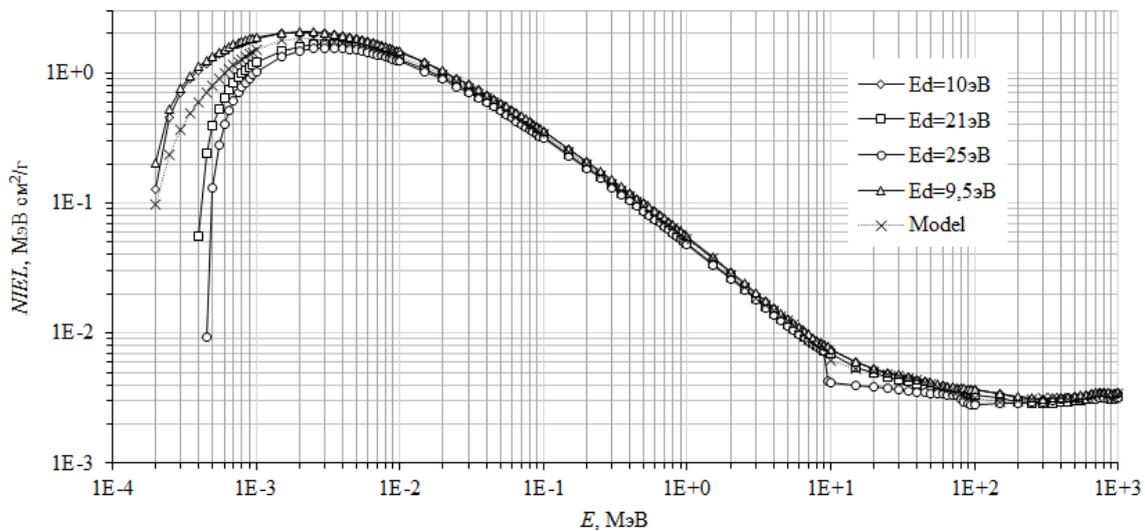


Рис. 2. Зависимость неионизирующие потери энергии от энергии протонов

Проведено моделирование воздействия потока протонов на эксплуатационные характеристики приборной структуры n -канального арсенид-галлиевого полевого транзистора. Результаты влияния потока протонов с энергией $E_E = 2$ кэВ при температуре $T = 303$ К представлены на рис. 3.

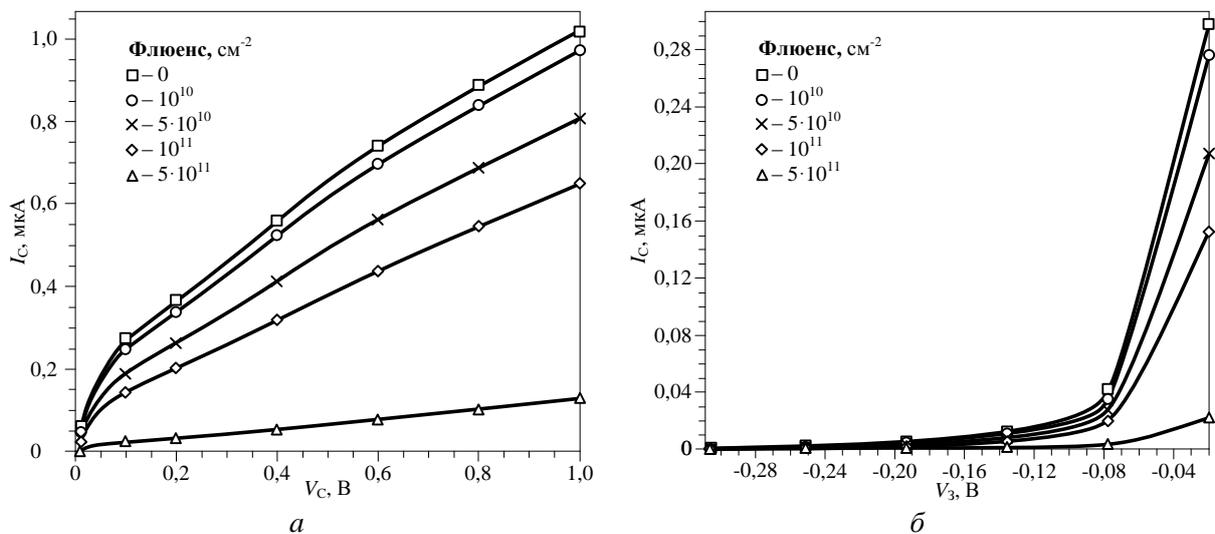


Рис. 3. ВАХ при изменении флюенса протонов с энергией $E_p = 20$ кэВ: a – сток-затворная; b – сток-стоковая

На рис. 4 представлены графики зависимости максимального тока стока и напряжения отсечки от величины флюенса протонов F_p с энергией $E_p = 2$ кэВ. Параметры выражены в относительных единицах (за 100% приняты значения без воздействия проникающего излучения).

Показано, что флюенс протонов оказывает разное влияние на величины максимального тока стока и напряжения отсечки кроме узкой полосы значений от $5 \cdot 10^{10}$ см⁻² до 10^{11} см⁻². Так при $F_p = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻² разница между отклонением параметров составляет 1%, а при $F_p = 1,2 \cdot 10^{11}$ см⁻² – 4,2%. Зависимость отклонения напряжения отсечки подчиняется линейному закону (достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$), а зависимость максимального тока стока носит более сложный характер.

На рис. 5 представлены графики зависимости максимального тока стока и напряжения отсечки от величины энергии протонов E_p для флюенса $F_p = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻².

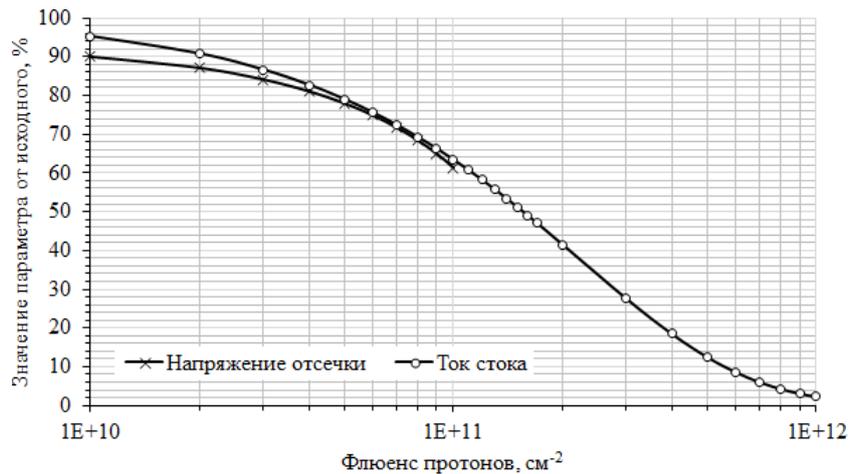


Рис. 4. Зависимость параметров арсенид-галлиевого полевого транзистора от величины флюенса протонов F_p (энергия $E_p = 2$ кэВ, температура $T = 303$ К)

По результатам моделирования установлено, что энергия протонов оказывает наибольшее влияние на электрические характеристики арсенид-галлиевого полевого транзистора в области от сотен эВ до 100 кэВ, что коррелирует с данными, представленными на рис. 2., за исключением диапазона энергий от 4 кэВ до 10 кэВ (т.е. при значениях E_p на 6 кэВ выше ожидаемых), при которых наблюдается сильная деградация электрических свойств приборной структуры вплоть до отказа транзистора. При значениях энергии E_p больше 1 МэВ величина отклонения параметров не превышает 1% для максимального тока стока и 1,5% для напряжения отсечки.

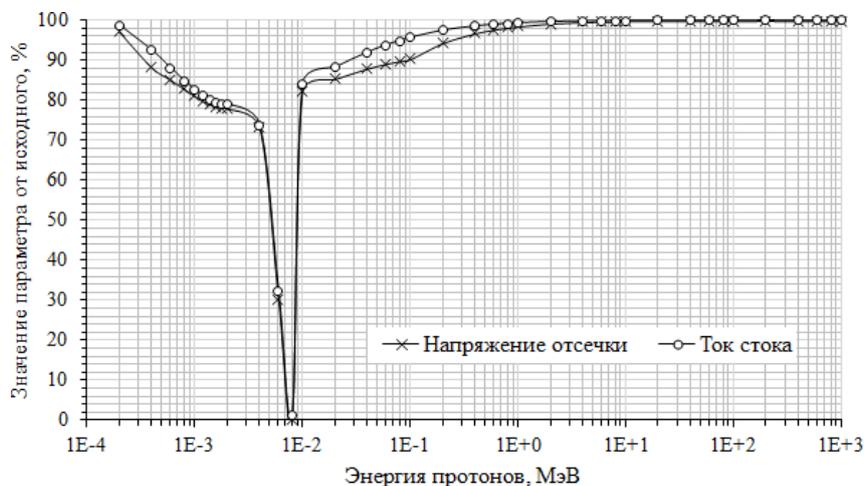


Рис. 5. Зависимость параметров арсенид-галлиевого полевого транзистора от энергии протонов E_p (флюенс $F_p = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻², температура $T = 303$ К)

На рис. 6 представлены графики зависимости максимального тока стока от температуры при воздействии потока протонов разных флюенсов с энергией $E_p = 2$ кэВ для стандартных моделей переноса носителей заряда.

Установлено, что в диапазоне температур T от 133 К до 143 К поток протонов оказывает наибольшее влияние для всех рассматриваемых флюенсов с $E_p = 2$ кэВ. Увеличение флюенса приводит к сдвигу такой температуры в область более высоких значений: для флюенса $F_p = 10^{10}$ см⁻² температура $T = 136$ К ($I_{Cmax} = 2,2$ нА, что составляет 17,65% от значения без воздействия потока протонов), для флюенса $F_p = 2,5 \cdot 10^{10}$ см⁻² – $T = 136$ К ($I_{Cmax} = 1,56$ нА, 36,5%), для флюенса $F_p = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻² – $T = 139$ К ($I_{Cmax} = 1,54$ нА, 54,06%).

При значениях температуры выше 273 К крутизна зависимости уменьшается. Увеличение флюенса приводит к более резкому изменению. Так для флюенсов F_p равных 10^{10} см⁻² и $2,5 \cdot 10^{10}$ см⁻² увеличение температуры на каждые 10 К приводит к уменьшению отклонения максимального тока стока в среднем на $3,8 \cdot 10^{-30}\%$ и $9,0 \cdot 10^{-30}\%$ соответственно. Для флюенса $F_p = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻² крутизна равняется $1,32 \cdot 10^{-30}\%$, т.е. «насыщение» происходит при более высоких температурах.

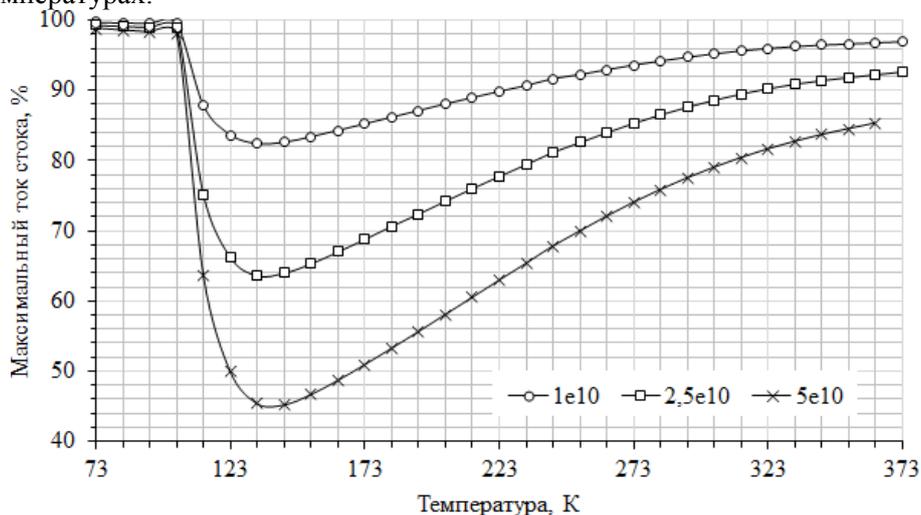


Рис. 6. Зависимость максимального тока стока арсенид-галлиевого полевого транзистора от температуры T (флюенс $F_p = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻², энергия протонов $E_p = 2$ кэВ)

Заключение

Разработана модель зависимости NIEL от энергии протонов, учитывающая различные значения пороговой энергии образования дефекта для GaAs, встречающиеся в литературе, и согласующаяся с последними теоретическими и экспериментальными данными. Из анализа результатов моделирования воздействия потока протонов на приборную структуру n -канального арсенид-галлиевого полевого транзистора можно сделать следующие выводы: флюенс протонов оказывает разное влияние на величины максимального тока стока и напряжения отсечки кроме узкой полосы значений от $5 \cdot 10^{10}$ см⁻² до 10^{11} см⁻²; энергия протонов оказывает наибольшее влияние в области от сотен эВ до 100 кэВ (вплоть до отказа транзистора); в диапазоне температур T от 133 К до 143 К поток протонов оказывает наибольшее влияние для всех рассматриваемых флюенсов с $E_p = 2$ кэВ (увеличение флюенса приводит к сдвигу температуры $T_{кр}$ в область более высоких значений).

Благодарность

Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.04).

Список литературы

- Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. – М. : Сов. Радио, 1980. – 224 с.

2. Allam E.E., Inguibert C., Meulenberg A., Jorio A., Zorkani I. Gamma non-ionizing energy loss: Comparison with the damage factor in silicon devices. *Journal of Applied Physics, American Institute of Physics*. 2018;123 (095703):1-5.
3. Сайт компании Silvaco [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.silvaco.com>.
4. Сайт компании Synopsys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.synopsys.com>.
5. Сайт проект SR-NIEL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sr-niel.org/index.php>.
6. Mansouri E. *Studies on Radiation-induced Defects in InP/InAsP Nanowire-based Quantum Disc-in-wire Photodetectors*. Halmstad : Halmstad University; 2018. – P. 48.
7. Pons D., Mooney P.M., Bourgoin J.C. Energy Dependence of Deep Level Introduction in Electron Irradiated GaAs. *J. Appl. Phys.* 1980;51:2038-2042.
8. Allam E.E. [et al.] Gamma and Electron NIEL Dependence of Irradiated GaAs. NSREC. 2016: P. 7.
9. Claeys C., Simoen E. *Radiation effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices*. Berlin : Springer. 2002. P. 404.
10. Chen N. J. [et al.] Computational simulation of threshold displacement energies of GaAs. *Journal of Materials Research: Vol. 32, Issue 8:1555–1562*.

УДК 621.039

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ОТРАСЛИ

ВЕЛЬКИН В.И., ЩЕКЛЕИН С.Е., ИВАНОВ В. Ю., КЛИМОВА В.А., ТАШЛЫКОВ О.Л.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина
(Екатеринбург, Российская Федерация)*

Аннотация. Требование надежной и безопасной эксплуатации атомных объектов подразумевает в первую очередь качественную подготовку персонала. В статье описаны задачи тренажерной подготовки студентов, представлен перечень тренажеров-симуляторов, используемых в Университете, для основных ядерных энергетических реакторов России. Описаны направления тренажерной подготовки в ВУЗе и существующая практика в рамках дисциплины «Стендовая тренажерная подготовка». Определены пути повышения качества подготовки и роль электронных образовательных ресурсов в решении проблемы обеспечения атомной энергетики квалифицированными специалистами. Показан вклад кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» в подготовку специалистов для атомной энергетики, состояние учебно-материальной базы.

Ключевые слова: атомные станции, ядерные энергетические реакторы, тренажерная подготовка в ВУЗе, подготовка кадров для атомной энергетики, надежность и безопасность АЭС.

TRAINING OF URFU STUDENTS ON SIMULATORS OF NUCLEAR POWER REACTORS

VELKIN V. I., SHCHEKLEIN S. E., IVANOV V. Y., KLIMOVA V. A., TASHLYKOV O. L.

*Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(Yekaterinburg, Russian Federation)*

Annotation. The requirement of reliable and safe operation of nuclear facilities implies, first of all, high-quality training of personnel. The article describes the tasks of simulator training of students, presents a list of simulators used at the University for the main nuclear power reactors in Russia. The directions of simulator training at the university and the existing practice in the framework of the discipline "Bench training" are described. The ways of improving the quality of training and the role of electronic educational resources in solving the problem of providing nuclear power with qualified specialists are determined. The contribution of the Department "Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources" to the training of specialists for nuclear power, the state of the educational and material base is shown.

Keywords: nuclear power plants, nuclear power reactors, simulator training at the university, training of personnel for nuclear power, reliability and safety of nuclear power plants.

Введение

Применение полномасштабных тренажеров для подготовки и поддержки квалификации операторов блочных пунктов управления (БПУ) является обязательным элементом системы подготовки персонала российских АЭС [1].

В Уральском федеральном университете для этих целей разработан и внедрен учебный курс «Стендовая тренажерная подготовка», который читается на 3-м и 4-м курсах специалитета и составляет 4 з.е. [2].

В период пандемии 2020 г. существенно возросла роль самостоятельного обучения. Имея доступ к электронным ресурсам, включающим не только лекционный материал, но и мультимедийное сопровождение лекций, студенты могли в установленные часы занятий изучать теорию, связанную с материальной базой оборудования АЭС. Практические занятия на тренажерах были организованы по специальному приказу руководства университета в помещениях действующих тренажеров кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии».

Тренажеры по АЭС в УрФУ

Тренажерная база УрФУ формировалась в период развития атомной энергетики СССР и развивалась вплоть до 2015 г.

Сегодня тренажеры в университете позволяют задавать различные режимы и условия работы реакторной установки, а также всего оборудования АЭС, соответствующей данному типу реактора.

В настоящее время в УрФУ в учебном процессе используются 5 тренажеров, представленных в табл. 1.

Таблица 1 - Перечень тренажеров по АЭС на базе УрФУ

Тренажер	Тип реактора на АЭС, моделируемый данным тренажером
ТОМАС-1	ВВЭР-1000
ТОМАС-2	РБМК-1000
КОРСАР	Водяные реакторы
ЖОКЕР	БН-600
БН-800	БН-800

Курс тренажерной подготовки реализуется в соответствии с Дорожной картой, выдаваемой каждой подгруппе из 2-3х студентов, изображенной на рис. 1.

Ведущий преподаватель д.т.н. Велькин В.И.
КАФЕДРА "АТОМНЫЕ СТАНЦИИ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ"
СТЕНДОВАЯ И ТРЕНАЖЕРНАЯ ПОДГОТОВКА В АУДИТОРИЯХ ТРЕНАЖЕРОВ-СИМУЛЯТОРОВ Т-214
 Дорожная карта 4
АЛГОРИТМ
 оформления отчета по тренажерной подготовке по дисциплине

№	Раздел отчета	Кол-во страниц	Подгруппа											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	Титул, Содержание	2												
2	Краткий анализ использования тренажеров для АЭС в России и за рубежом.	до 10	Бя-лак	Бе-лояр	Би-либ	Вол-годон	Кали-ниская	Коль-ская	Ле-нинг	Нов-Воро	Кур-ская	Смо-ленс		
3	Перечень тренажеров по АЭС в УрФУ (зал аналитических тренажеров-симуляторов и расчетных кодов)	1-2	Разработка и издание учебного пособия											
4	ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
5	Выполнение практического задания на тренажере «ТОМАС-1»	6-8	+					+						
6	Выполнение практического задания на тренажере «ТОМАС-2»	6-8		+					+					
7	Выполнение практического задания на тренажере «КОРСАР»	3-4			+					+				
8	Выполнение практического задания на тренажере «ЖОКЕР»	3-4				+					+			
9	Выполнение практического задания на тренажере «БН-800»	до 10					+						+	
10	Выводы, Заключение	1-2												
11	Библиография	2-3												
	ИТОГО	35-50												

Рис. 1. Дорожная карта тренажерной подготовки в УрФУ

Как видно из Дорожной карты, в начале дисциплины каждая подгруппа знакомится и описывает существующие на АЭС России профессиональные тренажерные комплексы, соответствующие типу реактора.

В рамках сжатого материала статьи не представляется возможным описать алгоритмы, задачи и функции всех тренажеров. Поэтому кратко представим только один из них – «ТОМАС-1, предназначенный для изучения процессов и взаимосвязей на реакторной установке ВВЭР-1000 [4].

Тренажер оперативного моделирования аварийных ситуаций «ТОМАС- 1» разработки ОАО ВНИИАЭС – это аналитический симулятор, позволяющий моделировать нормальные, переходные и аварийные режимы работы АЭС с ВВЭР-1000. В качестве прототипа выбран 4-й блок Балаковской АЭС.

Первоначально ТОМАС-1 использовался для обучения персонала АЭС в качестве наглядного пособия для демонстрации нормальных и аварийных режимов работы блока.

Состав аналитического тренажера (симулятора) «ТОМАС-1»

1. Математическая модель энергоблока, которая описывает нейтронно-физические, гидродинамические и логические процессы в оборудовании и системах управления АЭС.

2. Графическая система моделирования, управления и визуализации, которая позволяет осуществлять управление моделью и представлять результаты ее работы.

Перечень моделируемых систем симулятора «ТОМАС-1»

Ниже приводятся системы АЭС и соответствующие программные обозначения, моделируемые с помощью аналитического тренажера «ТОМАС-1»:

- активная зона – CR;
- система электроснабжения собственных нужд – ED;
- второй контур – MS;
- система герметичных помещений – OV;
- системы безопасности и основные регуляторы блока – RC;
- система аварийного охлаждения активной зоны – SI;
- первый контур – TH.

Нейтронно-физическая модель активной зоны симулятора «ТОМАС-1»

Нейтронно-физическая модель активной зоны, разработанная на основе программы HEXAN, обеспечивает детальное описание нейтронно-физических процессов в активной зоне в режимах пуска, нормальной эксплуатации, при изменениях мощности и остановке блока, а также при авариях, сопровождающихся быстрым вводом реактивности, потерей теплоносителя, а также без срабатывания аварийной защиты реактора.

Трехмерная расчетная модель адекватно описывает следующие нейтронно-физические процессы активной зоны:

- эффекты реактивности по температуре топлива, плотности и температуре теплоносителя;
- эффективность органов СУЗ и системы борного регулирования;
- отравление ксеноном и самарием, разотравление.

Модель первого контура симулятора «ТОМАС-1»

Теплогидравлическая модель первого контура реакторной установки и его вспомогательных систем, разработана на основе кода RETACT с исходным набором данных, соответствующих блоку-прототипу.

RETACT – это программа, разработанная для моделирования теплогидравлических процессов в реакторной установке и парогенераторах. Программа позволяет в реальном масштабе времени моделировать процессы как в режиме нормальной эксплуатации, так и в авариях, связанных с отказами разных систем и оборудования АЭС (включая максимальную проектную аварию).

Изображение окна «Схема первого контура» в аналитическом симуляторе «ТОМАС-1» представлено на рис. 2.

Модель второго контура симулятора «ТОМАС-1»

Моделирование турбинной части разработана с помощью кода CMS (Compressible Mixture Solver) для теплогидравлической сети с двухфазной сжимаемой средой

Теплогидравлическая сеть включает следующие элементы:

- четыре парогенератора (моделируются в виде граничных условий);
- проточная часть турбины с семью отборами (моделируемые как узлы);
- сепаратор и первая ступень парогенераторов;
- вторая ступень пароперегревателя (моделируется как теплообменник типа «точка в точке»);
- Коллектор собственных нужд (моделируется в виде узла сети)
- основные конденсаторы турбины (моделируются как один эквивалентный объём);
- четыре подогревателя низкого давления ПНД (моделируются как теплообменник поверхностного типа);
- два подогревателя высокого давления ПВД;

- один эквивалентный;
- два турбопитательных насоса.

Изображение окна «Схема второго контура» в аналитическом симуляторе «ТОМАС-1» представлено на рис. 2.

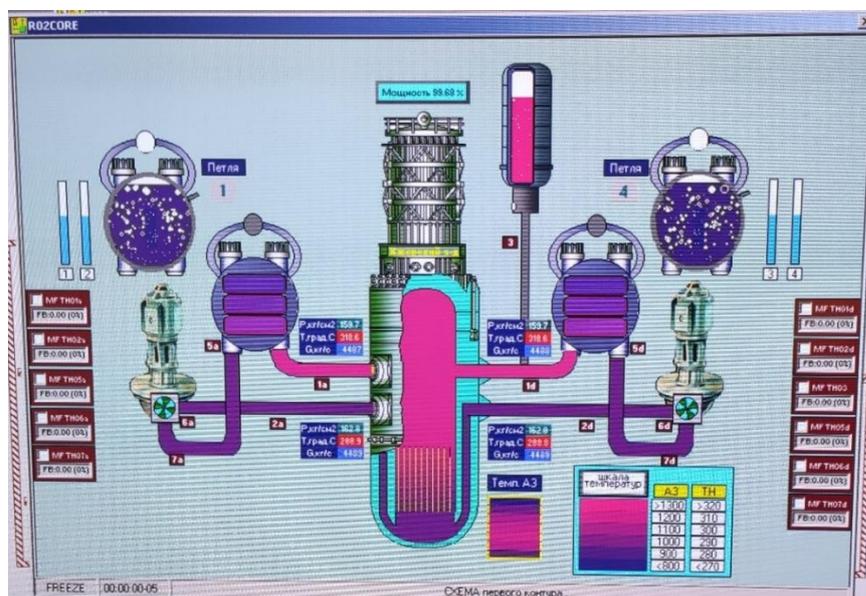


Рис. 2. Вкладка «Схема первого контура» в тренажере «ТОМАС-1»

Модель системы герметичных помещений симулятора «ТОМАС-1»

Система герметичных помещений включает в себя герметичные помещения, локализирующую арматуру, бассейн выдержки отработанного топлива. Изменения теплофизических параметров парогазоводяной смеси в объемах герметичной оболочки моделируются с помощью кодогенератора CMS (Compressible Mixture Solver). Теплогидравлическая сеть системы герметичных помещений включает в себя:

1. Четыре объема, соединённых между собой воздухопроводами с расположенными на них вентиляторами, запорной арматурой, теплообменниками.
2. Трубопроводы для связи объемов по воде.
3. Теплообменники внутри объемов для моделирования выделения тепла от оборудования.
4. Граничные условия для моделирования связи объемов с окружающей атмосферой.
5. Входные потоки в объёмы для моделирования потоков воды и пара в герметичной оболочке, возникающих при разрывах первого и второго контуров.

Системы безопасности и основные регуляторы блока

Симулятором моделируются следующие системы защиты:

Аварийная защита реактора действует при появлении сигнала «АЗ». Аварийная защита осуществляется падением всех групп ОР до крайнего нижнего положения за 4 секунды.

Действия предупредительной защиты первого рода осуществляется при появлении сигнала «ПЗ-1». Защита осуществляется последовательным движением вниз всех групп ОР в определённой последовательности, начиная с регулирующей группы, со скоростью 2 см/с до снятия сигнала «ПЗ-1».

Изображение окна «Панель аварийных сигналов и первопричин АЗ» в аналитическом симуляторе «ТОМАС-1» представлено на рис. 3.

Проблемы тренажерной подготовки

Основным недостатком имеющихся тренажеров-симуляторов является их моральное устаревание. Поэтому в полный рост встает задача обновления тренажерной базы с учетом развития атомной энергетики и новых внедряемых реакторных установок (ВВЭР-100, БН-1200, «Брест-300-ОД»).

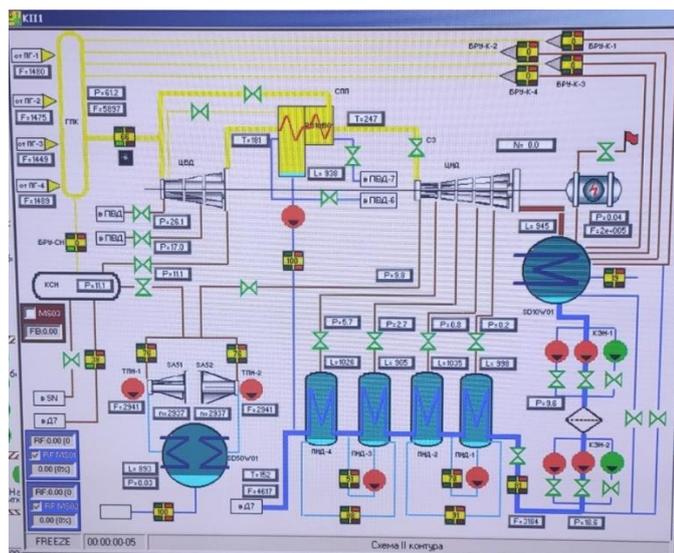


Рис. 3. Вкладка «Схема второго контура» в аналитическом тренажере «ТОМАС-1»

В этом направлении Уральский федеральный университет уже имеет заделы и конкретные договоренности с концерном «Росэнергоатом».

Заключение

1. Использование программно-тренажерных средств при обучении студентов кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» продемонстрировало интерес студентов к практическому освоению дисциплины.

2. Подготовка на тренажерах в рамках вузовской программы формирует базовые навыки работы будущих операторов БЩУ в управлении, анализе информации, представлении хронологии событий на ядерной энергетической установке.

3. Обучение на тренажерах имеет особую значимость для опережающей подготовки эксплуатационного персонала АЭС всех типов.

4. Ввиду ввода в строй новых и перспективных блоков АЭС (ВВЭР-1200, БН-1200) в настоящее время стоит первоочередная задача обновления тренажерной базы и дальнейшего совершенствования тренажерного процесса.

Список литературы

1. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Карпенко А.И., Бельтюков А.И., Тучков А.М. Опыт подготовки специалистов для инновационной ядерной энергетики / XIV Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров»: тезисы докладов. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ. – 2015. – С. 5457.
2. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Велькин В.И., Шастин А.Г., Дементьев В.Н., Маркелов Н.И., Сорокин Ю.И. Опыт сотрудничества концерна «Росэнергоатом» и Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – №3. – С.121129.
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Новые технологии подготовки специалистов для инновационного энергоблока АЭС с реактором БН800 / Новые образовательные технологии и ПОДГОТОВКА КАДРОВ в вузе: сб. материалов VII Международной научно-методической конференции, 8 – 10 февраля 2010 г. В 2х частях. Часть 2. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУУПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2010. С.401-406.
4. Ташлыков О.Л., Носов Д.А. Использование симуляторов «ТОМАС1», «ТОМАС2» для моделирования переходных режимов, вызванных нарушениями в ремонте оборудования АЭС / XI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2009»: тезисы докладов, Обнинск, 29 сентября – 2 октября 2009 г. в 2 – т. Т. 2. – Обнинск: НОУ «ЦИПК». – 2009. – С. 67-68.

УДК 621.039

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

КОВАЛЁНОК Д.Г.

(Москва, Российская Федерация)

Аннотация. Тенденции развития современного общества, развитие компьютерных технологий, глобализация и информатизация затрагивают все сферы общественного устройства, в том числе и образование. Смысл, назначение и миссия современного образования – не просто получение базовых знаний и необходимых навыков и умений, – это выработка культурного кода, самостоятельного подхода к усвоению новых знаний, культурных ценностей, новых форм и видов деятельности. Виртуальная и дополненная реальность относятся к перечню ключевых информационных технологий цифровой экономики. К ним относят в том числе технологии виртуальной и дополненной реальности, то есть они могут являться как инструментом обучения, так и объектом исследования.

Ключевые слова: Тренажеры, виртуальная реальность, дополненная реальность, трехмерное моделирование.

APPLICATION OF VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS

KOVALENOK D.G.

(Moscow, Russian Federation)

Abstract. Trends in the development of modern society, the development of computer technologies, globalization and informatization of the sphere of social structure, including education. The meaning, purpose and mission of modern education is simply the acquisition of basic knowledge and skills and habits and skills, it is the development of a cultural code, an independent approach to the assimilation of new knowledge, cultural values, new forms and types of activities. Virtual and augmented reality terrorist attack on key information technologies of the digital economy. These include technology and augmented reality.

Keywords: Simulators, virtual reality, augmented reality, three-dimensional modeling

Введение

Виртуальная реальность (virtual reality, VR) – совокупность программно-аппаратных средств, которые позволяют воспроизводить искусственный мир и транслируют его в сознание пользователя посредством воздействия на органы чувств (зрение, слух, тактильные ощущения, положение в пространстве и т.д.). Виртуальная реальность также предоставляет инструменты взаимодействия с объектами, которые в ней находятся (интерактивность), в отличие от кинематографа, где конечный пользователь является пассивным наблюдателем.

Дополненная реальность (augmented reality, AR) является результатом добавления в реальный мир мнимых объектов для отображения дополнительной информации и повышения восприятия информации. Дополненная реальность преобразует реальный мир, а виртуальная реальность воспроизводит искусственный. На стыке виртуального и реального мира возникает смешанная реальность.

Использование виртуальной и дополненной реальности имеет смысл, когда альтернативные методы являются трудновыполнимыми, неэффективными или затратными. Кроме того, существует еще несколько аргументов в пользу использования VR/AR-технологий в образовании.

Применение технологий виртуальной и дополненной реальности

По мнению Р. Карникау и Ф. Макэлроу, самыми лучшими способами усвоения материала являются обучение других людей или применение полученных знаний в практической деятельности. Как правило, в учебных заведениях для применения теоретических знаний используются лабораторные работы, производственные практики и другие формы учебной деятельности. Но, к сожалению, на практике обучающиеся сталкиваются с определенными трудностями, связанными с техническими, материальными ограничениями, которые не предполагают полноценного эксперимента. Например, ограниченный бюджет не

позволяет иметь дорогостоящее оборудование и поддерживать его в приемлемом состоянии, достаточном для проведения эксперимента.

Технология виртуальной реальности позволяет создавать как реальные, так и вымышленные миры с учетом всех свойств и особенностей поведения объектов, что открывает широкие возможности её применения в различных сферах человеческой деятельности.

Трехмерная графика дает возможность наглядно смоделировать сложные процессы с необходимой детализацией, от движения космических тел до ядерных реакций.

Виртуальная реальность также позволяет легко организовать процесс обучения в игровой манере и отлично подходит для организации экскурсий по историческим достопримечательностям и эпохам, моделирования бизнес-кейсов. Интерактивность и эффект полного погружения дает возможность проведения занятий в режиме виртуальной и дополненной реальности, что совместимо с дистанционным обучением.

Но, как и любая развивающаяся технология, VR/AR имеют свои недостатки, о которых также необходимо упомянуть. Побочными эффектами при длительных сеансах VR являются головные боли и головокружения, которые возникают из-за сенсорного несоответствия. Например, пользователь поворачивает голову, но из-за технических ограничений изображение транслируется с задержкой.

Например, кафедра технологии машиностроения использует для практических занятий по промышленному проектированию комнату виртуальной реальности. За студентом закрепляется определенный участок цеха, на котором нужно разместить оборудование согласно правилам и нормам техники безопасности. Каждый студент вносит вклад в общую модель цеха, которая оценивается отдельно. Таким образом, совместными усилиями студентов можно спроектировать целое предприятие. Лаборатория дает возможность взаимодействовать нескольким специалистам из различных сфер знаний в одном виртуальном окружении. В частности, для визуализации расчетов сложной газодинамической среды студентами ОНФ была разработана соответствующая модель газоперекачивающей станции, которая подробно описывала поведение потоков воздуха с учетом искажения геометрии выходной трубы.

В первом эксперименте исследовалась гипотеза о том, что использование технологии дополненной реальности на занятии повышает эффективность изучения AR, по сравнению с лекцией об этой технологии. Второй эксперимент проверял гипотезу об эффективности изучения некоторых разделов курса информатики с использованием AR. В результате эксперимента автор исследования делает вывод, что общий уровень знаний в экспериментальной группе учащихся повысился в среднем на 23,1% по сравнению с контрольной группой.

Применение технологий виртуальной и дополненной реальности создает новые и более эффективные способы обучения, однако технические недостатки устройств и высокая стоимость конечных решений ограничивают её широкое применение в образовательном процессе. Приоритетной задачей является повышение эргономичности VR-оборудования и стремление к комфортному использованию устройства без существенного ущерба для здоровья.

Применение трехмерных моделей и виртуальной реальности в ядерной энергетике

Самым масштабным проектом в ядерной энергетике является виртуальный энергоблок АЭС, помогающий решать технические задачи при проектировании станций с реакторами типа ВВЭР и БН-1200.

Виртуальный энергоблок состоит из суперЭВМ, программного обеспечения и пульта управления. Еще на этапе проектирования пульт позволяет моделировать все потенциальные ситуации, происходящие в блочном пункте управления будущей АЭС, что дает возможность проверки динамических процессов в основных технологических, электротехнических системах и системах автоматики, а также работы оператора с видеокадрами, отображаемыми на дисплеях его автоматизированного рабочего места. Пользователь может перемещаться по макету, менять масштаб, увидеть площадку четвертой очереди Нововоронежской АЭС и прилегающую территорию, заглянуть внутрь сооружений, рассмотреть мелкие детали оборудования. Кроме того, голографический макет позволяет анимировать объекты и задавать любое поведение для них. Планируется использовать макет в подготовке и поддержании квалификации персонала

АЭС. Технология виртуальной реальности используется в компьютерных тренажерах ремонтных процессов в учебно-тренировочном центре Ленинградской АЭС для подготовки персонала по ремонту и обслуживанию сложного технологического оборудования. В работе описывается технология моделирования и визуализации трехмерных виртуальных пультов с использованием элементов виртуальной реальности. Пульты создаются с помощью системы 3D Studio Max. Моделируется воздействие оператора на элементы управления, движение этих элементов в результате воздействия, а также создание и расчет функциональной схемы пульта управления.

Область применения трехмерных моделей и виртуальной реальности в ядерной энергетике за последние десять лет активно развивается. Использование возможностей трехмерного моделирования для проверки проектных решений новых и существующих БПУ АЭС является актуальной задачей.

Например, программы 3D Studio Max и ArhiCAD предъявляют высокие требования к производительности компьютера и видеокarte, в отличие от Blender 3D и Unity 3D. На рис. 1 приведен пример модели БПУ АЭС, созданной в Blender 3D. Полученная модель не является статичной картинкой, в ней реализован вид «от первого лица» в положении сидя и стоя, по помещению можно свободно передвигаться в любом направлении как в компьютерной игре.



Рис.1. Пример вида БПУ при проектировании освещения

Система обучения на основе виртуальной среды для предотвращения происшествий и уменьшения аварий при выводе из эксплуатации ядерных установок

Снятие с эксплуатации ядерных установок должно осуществляться путем обеспечения безопасности работников, поскольку эти действия по снятию с эксплуатации происходят в условиях высокой радиоактивности и тяжелых условий труда.

Унаследованные методы измерения и оценки дозы облучения имели ограничения по изменению и моделированию дозы облучения работников до практических действий, поскольку они должны выполняться без изменения рабочих маршрутов в соответствии с заранее определенными сценариями.

Предлагается метод оценки дозы облучения работников в условиях виртуального вывода из эксплуатации. Для моделирования сценариев вывода из эксплуатации среды вывода из эксплуатации были разработаны в виртуальной реальности. Для моделирования и оценки дозы облучения рабочих была также разработана модель человека в виртуальной среде. Эти виртуальные среды вывода из эксплуатации позволили моделировать и оценивать в реальном времени дозу облучения рабочих.

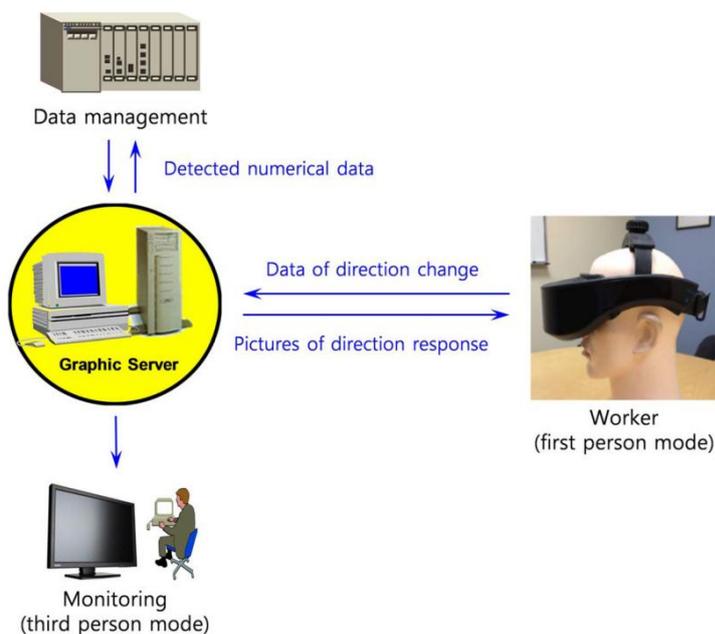


Рис. 2. Концептуальный дизайн системы обучения

Когда рабочий надевает на голову дисплей (далее «HMD»), запускается графический сервер виртуальной обучающей системы. Этот графический сервер получает данные о смене направления рабочего. Он также обменивается блоками управления данными с обнаруженными числовыми данными. Графический сервер предоставляет HMD изображения реакции направления, а устройство мониторинга - изображения местоположения и поведения рабочего.

Для моделирования нескольких сценариев вывода из эксплуатации были созданы среды тестирования в виртуальной реальности. Среда разработки были основаны на цифровом макете вывода из эксплуатации. Кроме того, многие сценарии были разработаны в трехмерных виртуальных средах для оценки посредством динамического моделирования. Виртуальные среды вывода из эксплуатации были разработаны с помощью Unity3D и состояли из трех этапов проектирования: трехмерное отображение, разработка сценария и картирование радиации. На рис. 3 показано, что реактор отображается в виде трехмерных данных.

Визуализация уровня экспозиционной дозы

Для визуализации уровней экспозиционной дозы модели человека они были классифицированы с использованием цветов и разработаны в виде кубов в инструменте Unity3D, как показано на рис. 4. Размер каждого куба составлял 50 см. Эта классификация кубиков может быть изменена в зависимости от радиологической ситуации.

Измерение экспозиционной дозы на модели человека ситуации столкновения в виртуальных средах возникают, когда модель человека перекрывается с контроллером персонажа в инструменте Unity3D и коллайдером блока в кубе. Когда рабочий перемещается в виртуальную среду вывода из эксплуатации, человеческая модель появляется на рабочем месте с учетом распределения дозы. В это время модель человека сталкивается с несколькими кубами в виртуальной среде; принимается последний куб, и доза облучения может быть получена из значений последнего куба. Когда происходит столкновение на зеленой линии, как показано на рис. 5, вызывается функция OnTriggerEnter в Unity3D и экспонирование доза в кубе переносится в модель человека. Оценка столкновения вычисляется по каждому кадру, и значение экспозиционной дозы передается в модель человека каждую секунду.

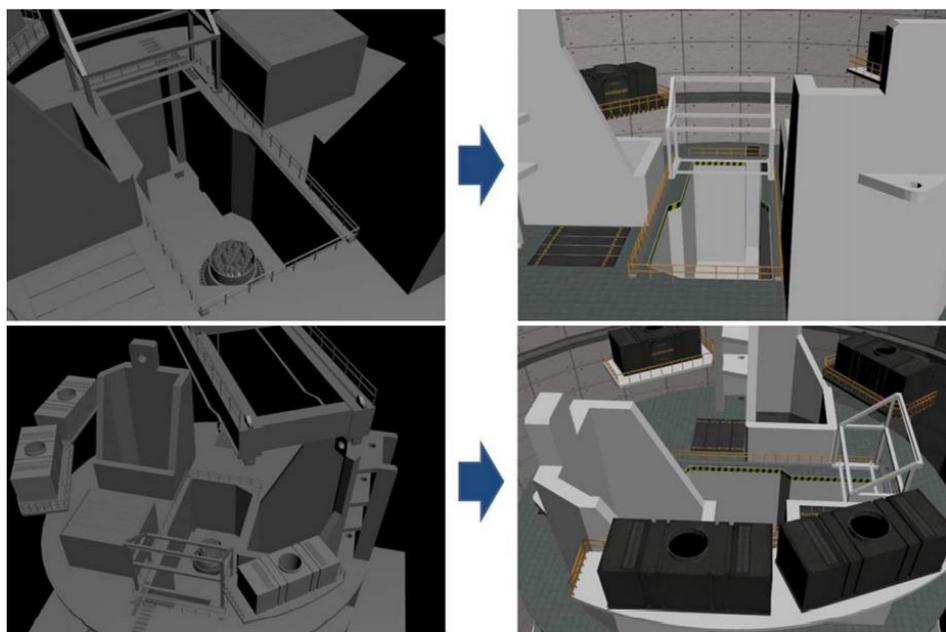


Рис. 3. Трехмерное отображение компонентов реактора

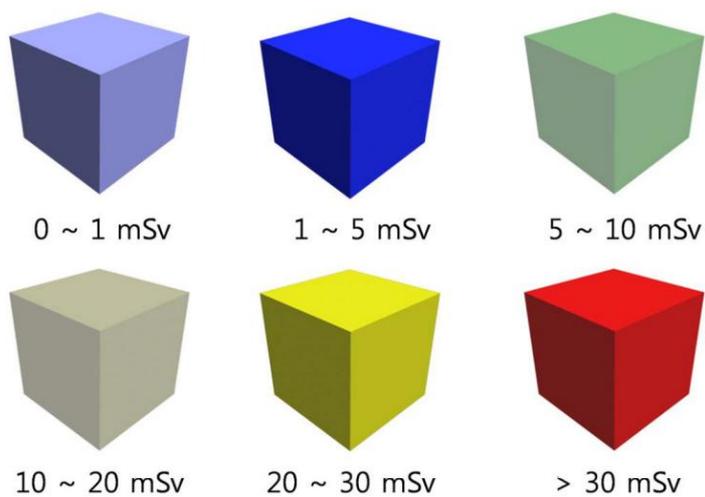


Рис. 4. Классификация кубов в инструменте Unity3D

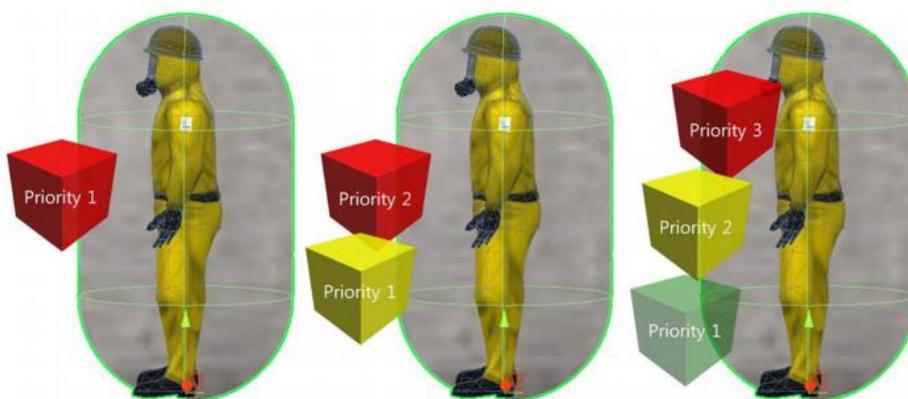


Рис. 5. Измерение экспозиционной дозы в модели человека

Результат

Инструментарий трехмерного моделирования позволяет не только создать реалистичную модель оператора, но и задать значения антропометрических характеристик, прорисовать скелет и точки подвижности суставов, отобразить зоны досягаемости и видимости с учетом положения головы и тела оператора. Например, модель оператора можно создать в программе MakeHuman, анимировать в Unity 3D, а затем импортировать в модель БПУ в среде Blender 3D для соматографического анализа.

Заключение

Опыт применения виртуальных моделей в ядерной энергетике показывает актуальность использования возможностей трехмерного моделирования для проверки проектных решений новых и существующих БПУ АЭС. Продукты трехмерного моделирования позволяют создать модель БПУ АЭС для учета антропометрических характеристик, разработки и расположения новых средств отображения информации и органов управления, проектирования освещенности рабочих мест и зон. Эта работа была направлена на моделирование сценариев вывода из эксплуатации с целью измерения и оценки дозы облучения работников. Для оценки дозы облучения работников во время вывода из эксплуатации ядерных установок до проведения работ по выводу из эксплуатации был разработан метод имитационной оценки в виртуальной радиологической среде. Приведен пример создания трехмерной модели БПУ АЭС с возможностью перемещения и вида «от первого лица». Таким образом, использование трехмерного моделирования позволяет решить ряд задач эргономического обеспечения проектирования БПУ АЭС.

Список литературы

1. Иванова А.Д. Особенности методических и психолого-педагогических аспектов в преподавании «Педагогики и психологии высшей школы» для магистров технических специальностей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=23480> (дата обращения: 28.11.2018).
2. Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» // СЗ РФ. 2017. № 20. Ст. 2901.
3. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утв. распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р) // Сайт Правительства России. 2017 [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения: 28.11.2018).
4. Бойченко И.В., Лежанкин А.В. Дополненная реальность: состояние, проблемы и пути решения // Управление, вычислительная техника и информатика: Доклады ТУСУРа. 2010. № 1 (21). ч. 1. С. 161–165.
5. Ватулин Я.С., Полякова Л.Ф., Афанасенко А.С., Коровина М.С. Виртуальная реальность в технологиях дистанционного обучения // Известия ПГУПС. 2010. № 4. С. 301–309.
6. Соболев В.Ю., Киселева О.В. Интерактивные методы обучения как основа формирования компетенций // Высшее образование сегодня. 2014. № 9. С. 70–74.

УДК 621.039-78

**ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ СИСТЕМАМ
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ НА БАЗЕ
ПТК ТПТС-НТ**

КОРОЛЕВ С.А., ТАШЧЫ Ю.И., ТОЛОКОНСКИЙ А.О.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. Представлен практико-ориентированный метод подготовки специалистов для АЭС с использованием программно-технических комплексов ТПТС в НИЯУ МИФИ. Рассмотрен комплекс лабораторных работ для реализации специализированных алгоритмов для управления вентиляционными установками с применением специализированной аппаратуры, блокировок, сигнализации и диагностики технических средств на ядерных объектах.

Ключевые слова: АСУ ТП, ТПТС-НТ, АЭС, системы управления, программно-технический комплекс, управление вентиляционными установками.

**PRACTICE-ORIENTED APPROACH IN TRAINING OF CONTROL SYSTEMS AND
CONTROL OF EXECUTIVE MECHANISMS ON THE BASIS OF PTK TPTS-NT**

SERGEY.A. KOROLEV YULIYA.I. TASCI, ANDREY.O. TOLOKONSKIY

*NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY "MEPHI"
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The article presents a practice-oriented method of training specialists for nuclear power plants using software and technical complexes of TPTS at MEPHI. The complex of laboratory works for the implementation of specialized algorithms for controlling ventilation installations with the use of specialized equipment, locks, alarms and diagnostics of technical means at nuclear facilities is considered.

Keywords: Automated control systems, TPTS-NT, nuclear power plants, control systems, software and hardware complex, control of ventilation installations.

Введение

Важной составляющей современной АЭС является система кондиционирования воздуха и вентиляции. Необходимость предупреждения загрязнения воздуха в производственных помещениях связана с использованием открытых ионизационных источников в помещениях станции. При нормальной эксплуатации единственное место, откуда может произойти утечка радиоактивных веществ, это вентиляционная труба, через которую все отфильтрованные газообразные выбросы выходят в атмосферу. Для обеспечения безопасности и предупреждения сверхнормативного загрязнения воздуха разработан комплекс защитных мер.

На АЭС присутствуют следующие виды вентиляционных установок: общеобменная, вытяжная местная, ремонтная и технологическая. Вентиляционные установки АЭС различные и состоят из большого числа агрегатов, которые необходимо управлять с помощью специализированных систем. Техническими условиями определяется взаимное сочетание систем, а также предусматривается их последовательное либо параллельное расположение, в зависимости от организации работ.

Сегодня в лабораториях НИЯУ МИФИ присутствует новый программно-технический комплекс (ПТК) ТПТС-НТ, производства ВНИИАЭС им. Духова. На базе данного комплекса разработаны лабораторные работы в НИЯУ МИФИ для реализации практико-ориентированной подготовки специалистов. Лабораторные работы включают в себя изучение принципов работы систем вентиляции в зонах контролируемого и свободного режима на АЭС. Целью выполнения лабораторных работ является формирование у студентов целостного и корректного понимания принципа работы, конструкции и управления устройств вентиляции, охлаждения и кондиционирования воздуха на станциях, а также методов управления системами, спроектированными при помощи ПТК ТПТС-НТ.

Разработка алгоритма автоматизации включает большую степень самостоятельной работы студента с использованием базовых функций программы GET-R1, являющейся системой технологического программирования ПТК ТПТС-НТ. Алгоритм управления

базируется на функциональных схемах, заданных условиях работы той или иной вентиляционной установки.

В программно-техническом комплексе предусмотрен модуль индивидуального управления ТПТС55.1673, который осуществляет контроль состояния, режимов работы исполнительных механизмов (электродвигателем/электровыключателем, запорной арматурой, клапаном).

Алгоритм управления основан при помощи двух составляющих: первая представляет собой базовую часть алгоритма, часть которого не может изменяться, но может настраиваться и адаптироваться к конкретному исполнительному механизму. Другая составляющая алгоритма управления исполнительным механизмом является свободно проектируемой, загружается в процессор для реализации алгоритма управления и носит характер вариативной части стандартного алгоритма.

Свободно программируемые алгоритмы управления установками обеспечивают необходимую логику блокировок, защит, автоматических команд, передачу сигналов состояния оборудования и неисправностей самих исполнительных механизмов по шине ввода/вывода в алгоритмы, находящиеся в других модулях ПТК.

Контроль и управление электродвигателем реализуется в модуле связи с процессом ТПТС55.1673 с помощью стандартного функционального блока BG.YESG.M, входящим в состав базового программного обеспечения модуля. Функциональный блок параметризуется в связи с заданными параметрами.

Работоспособность алгоритма проверяется либо с помощью мультиметра-калибратора, имитатора задвижки, имитатора двигателя, переключек, подключенных напрямую к приборной стойке ТПТС-НТ, формируя физические сигналы и управляющие команды, либо через среду моделирования, встроенную в программу GET-R1. Далее снимаются графики разгонных характеристик на диагностической станции. Так обучающийся приобретает навыки испытаний систем управления и по отдельности каждого элемента, навыки оценки результатов испытаний.

При формировании лабораторных работ учитывались действующие требования, общие правила технической эксплуатации вентиляционного оборудования, техники безопасности и др. Одной из задач работ является анализ функциональных схем вентиляционных установок.

Таким образом, студенты овладевают основными видами профессиональной деятельности, закрепляют, углубляют, расширяют и систематизируют теоретические знания, полученные при изучении специальных дисциплин в вузе, и готовы применить эти знания как на объектах ядерной энергетики, так и схожих предприятиях.

Список литературы

1. Нарич А. Д. Программно-технические комплексы на базе программно-технических средств ТПТС-НТ для АСУТП / А. Д. Нарич, Д.С. Тимохин, Е.Ю. Маликова – М. : ВНИИА, 2014. – 333 с.
2. Модуль регулятор ТПТС55.1681 : техническое описание – М. : ВНИИА, 2013. – 51 с.
3. Зверков, В. Автоматизированная система управления технологическими процессами АЭС / В. Зверков. – Москва : Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2013. – 558 с.

УДК 621.311.22 : 621.311.25

ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ БЕЛАРУСИ

КАРНИЦКИЙ Н.Б., КАЧАН С.А., БУРОВ А.Л.

*Белорусский национальный технический университет**(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Рассматриваются основные аспекты подготовки инженерных кадров для энергетики Республики Беларусь, в том числе для строящейся Белорусской атомной электростанции, на кафедре «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета. Освещаются особенности организации теоретической подготовки и производственной практики студентов; учебно-методическая и лабораторная база кафедры. Показана роль информационных и компьютерных технологий в подготовке кадров.

Ключевые слова: обучение, теоретическая подготовка, производственная практика, энергетика, тепловые и атомные электрические станции,

TRAINING OF ENGINEERING PERSONNEL FOR THE BELARUSIAN ENERGY INDUSTRY

Mikalai.B. Karnitski, Swiatlana.A. Kachan, Andrei.L. Burov

*Belarusian National Technical University**(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The main aspects of training engineering personnel for the energy sector of the Republic of Belarus, including the Belarusian Nuclear Power Plant, taking place at the Department of Thermal Power Plants of the Belarusian National Technical University are considered. The features of the organization of student's theoretical and practical training as well as educational-methodical and laboratory facilities of the Department are shown. The role of information and computer technologies in personnel training is highlighted.

Keywords: teaching, theoretical training, internship, power engineering, thermal and nuclear power plants

Подразделение энергетического факультета Белорусского национального технического университета (БНТУ) – кафедра «Тепловые электрические станции» (ТЭС) – предоставляет широкие возможности получения современных знаний в области традиционной тепловой и ядерной энергетики, обеспечивает высокое качество теоретических занятий и практической подготовки и, соответственно, высокий уровень подготовки специалистов для белорусской энергетики. Основу ее в настоящее время составляют тепловые электрические станции, а важным, стратегическим направлением развития является сооружение и ввод в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции.

В настоящее время на кафедре ТЭС энергетического факультета БНТУ обучение студентов производится по трем специальностям 1–43 01 04 «Тепловые электрические станции», 1–53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами» и 1–43 01 08. Отметим, что специальность 1–43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций» открыта в 2008 году в рамках реализации Государственной программы подготовки кадров для ядерной энергетики Республики Беларусь в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 12 ноября 2007 года № 565 «О некоторых мерах по строительству атомной станции». В 2020 году на кафедре открыта новая специальность 1–43 01 08 «Проектирование и эксплуатация атомных электрических станций», что дает более широкие возможности для трудоустройства выпускников.

Основные задачи Госпрограммы – организация системы комплексной подготовки специалистов, обеспечивающей получение знаний и навыков, необходимых для строительства и безопасной эксплуатации АЭС, а также гарантия ядерной и радиационной безопасности, безопасности персонала станции, населения и окружающей среды. Вопросы обучения в настоящее время регулируются Государственной программой 14 «Образование и молодежная политика», утвержденной Постановлением Совета Министров от 29 января 2021 года № 57.

Особенностью подготовки инженеров для энергетики, в особенности для работы на объектах атомной энергетики, является сочетание глубоких теоретических знаний и приобретенных практических навыков.

Обучение специалистов на кафедре ТЭС ведется в соответствии с действующими нормативными документами. Студенты получают теоретическую подготовку по фундаментальным дисциплинам и приобретают полное представление о технологической схеме производства электроэнергии на ТЭС и АЭС, знания по расчету и проектированию основного и вспомогательного оборудования электростанций, компьютерному проектированию и расчетам котлов и парогенераторов, паровых и газовых турбин, теплообменных аппаратов, водоподготовительных установок, систем автоматизированного управления и автоматического регулирования, управлению режимами работы оборудования с учетом экономических и экологических факторов. Студенты специальности 1–43 01 08 также осваивают базовые знания по ядерной и нейтронной физике, конструкции и работе ядерных энергетических реакторов, радиационной безопасности и обращению с радиоактивными отходами АЭС.

С целью повышения уровня подготовки инженеров для чтения лекций по специальным дисциплинам приглашаются опытные специалисты отечественных и иностранных вузов и предприятий. Среди них специалисты крупных российских вузов – Института атомной энергетики (г. Обнинск), Ульяновского государственного университета (г. Ульяновск), Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ), а также Государственного научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, Белорусского государственного университета (БГУ), Международного государственного экологического университета (МГЭУ) им. А.Д. Сахарова и др.

Учебно-методическая база кафедры ТЭС постоянно пополняется современной учебной, учебно-методической, справочной и научной литературой. Только для изучения дисциплин специальности 1–43 01 08 преподавателями кафедры подготовлены и выпущены в издательствах «Вышэйшая школа» Республики Беларусь, «Техническая литература» БНТУ, издательстве Белорусского государственного технологического университета более 10 учебников и учебных пособий.

Кафедра имеет хорошо оснащенную лабораторную базу. Благодаря финансированию, предусмотренному Госпрограммой, ее дополнили современные лабораторные стенды и установки, в частности стенды по балансировке вращающихся механизмов, исследованию гидравлических характеристик насосного оборудования, центробежных и осевых вентиляторов, вентиляторной градирни, а также по изучению термодинамических процессов и процессов теплопередачи; воздушные турбины оснащены современной системой вибрационного контроля. Студенты осваивают современные средства теплотехнических измерений, которые используются на действующих электростанциях, приборы для проведения химического анализа и подготовки теплоносителя и др.

На персональных компьютерах лаборатории «Математическое моделирование теплотехнических процессов» установлена компьютерная обучающая система (КОС) по основам Политики, Руководства и Технологии АЭС (проект МАГАТЭ); внедрены аналитические тренажеры турбинного и реакторного отделений АЭС с ВВЭР-1000 (также проект МАГАТЭ). Возможности тренажера обеспечивают приобретение общих навыков управления турбогенератором АЭС с реактором ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации, при ее нарушениях и в аварийных режимах. Целью тренажерной подготовки является формирование опыта работы с реальным оборудованием, а также понимания процессов, происходящих на АЭС. Тренажеры позволяют студентам усвоить взаимную работу различных систем нормальной эксплуатации АЭС, а также понять на практике работу систем автоматического регулирования, ранее изученных в рамках курсов «Автоматизированные системы управления на АЭС» и «Типовые элементы систем автоматизированного управления».

Для закрепления теоретических знаний студенты проходят практику на тепловых электростанциях и других предприятиях энергетической отрасли Беларуси.

На старших курсах производственная и преддипломная практики студентов специальности 1–43 01 08 проводится за рубежом: на действующих АЭС, в их учебно-тренировочных центрах (УТЦ) и подразделениях (УТП), а также в профильных учебных вузах, научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтах. Основные базы практики – это филиалы АО «Концерн Росэнергоатом» (Россия): Нововоронежская АЭС (г. Нововоронеж);

Ростовская АЭС, (г. Волгодонск-28), Смоленская АЭС (г. Десногорск); Калининская АЭС (г. Удомля), НГТУ им. Р.Е. Алексеева и др.

В 2012 году студенты проходили производственную практику по программе Германской службы академических обменов (ДААД) в Германии, где ознакомились с вопросами устройства, работы и эксплуатации современных объектов энергетики, большинство из которых не имеет аналогов в Беларуси. В 2012 – 2014 годах производственная практика проходила в Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности (г. Севастополь, Украина – Россия), в 2016 году – в Институте управления ядерными знаниями (г. Вена, Австрия), в 2017 – 2019 годах – на АЭС «Моховце» (г. Левице, Словакия) и на АЭС «Козлодуй» (г. Козлодуй, Болгария).

Ежегодно студенты кафедры принимают активное участие в школе-семинаре «Ядерная энергетика и нераспространение: ответ на вызовы современности», которая ежегодно проходит в Национальном исследовательском ядерном университете (НИЯУ) «МИФИ» (г. Москва), успешно выступают на республиканских и международных конкурсах.

С присоединением Республики Беларусь к клубу стран, имеющих атомные электростанции, международное сотрудничество в ядерной отрасли приобрело важнейшее значение для нашей страны. БНТУ является одним из основателей региональной сети «Образование и подготовка специалистов в области ядерных технологий (STAR-NET)», учрежденной в сентябре 2015 года (г. Вена, Австрия). Задача STAR-NET состоит в том, чтобы содействовать сотрудничеству в области образования и профессиональной подготовки, а также работе с общественностью в сфере ядерных технологий. В рамках региональной сети STAR-NET для студентов университетов Беларуси, России, Украины и других стран были организованы дистанционные курсы, освещающие актуальные вопросы международного взаимодействия в области ядерных технологий. Из г. Вена в режиме видеоконференций транслировались лекции ведущих сотрудников и наиболее востребованных экспертов МАГАТЭ. Лекции проходили на русском и английском языках в интерактивном режиме с возможностью задавать вопросы.

Сотрудничество в рамках сети STAR-NET не ограничивается лишь вышеперечисленным. Так, для студентов кафедры была организована производственная практика, а для преподавателей университета – стажировка на базе МАГАТЭ (г. Вена, Австрия). Была создана обучающая платформа LMS STAR-NET, с использованием которой университеты-члены сети делятся своими учебно-методическими наработками в области ядерной энергетики, а также размещают свои учебные курсы по профильным учебным дисциплинам для студентов. Также в настоящее время проводится серия онлайн-семинаров в целях укрепления контактов и проведения совместных межуниверситетских научно-исследовательских работ.

Количество выпускников кафедры ТЭС БНТУ, распределенных за период 2013 – 2020 годов в РУП «Белорусская атомная электростанция», показано в таблице.

Таблица. Выпускники кафедры ТЭС, распределенные за период 2013 – 2020 годов в РУП «Белорусская атомная электростанция»

Специальность	Количество распределенных молодых специалистов	Квалификация
1–43 01 04 «Тепловые электрические станции»	14	Инженер-энергетик
1–53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами»	6	Инженер по автоматизации
1–43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций»	96	Инженер-энергетик

Студенты, обучающиеся на кафедре «Тепловые электрические станции» БНТУ, готовятся к профессиональной деятельности не только в сфере эксплуатации ТЭС и АЭС, но также в сфере образования и науки. Полученные выпускниками знания позволяют им участвовать в научных исследованиях в области проектирования и эксплуатации

паротурбинных установок ТЭС и АЭС, модернизации оборудования, оптимизации технологических схем и природоохранных мероприятий, взаимодействия ТЭС и АЭС с окружающей средой. Так, некоторые из молодых специалистов были распределены на кафедру ТЭС, где ассистируют преподавателям и самостоятельно проводят учебные занятия. Выпускники кафедры проходят обучение на II ступени высшего образования на кафедре ТЭС, а также в России – в НИЯУ «МИФИ» и в НГТУ им. Р.Е. Алексева. Подготовка кадров высшей квалификации осуществляется в аспирантурах (кафедра ТЭС БНТУ, НГТУ им. Р.Е. Алексева).

Заключение

Подготовка специалистов для традиционной тепловой и зарождающейся атомной энергетики Республики на кафедре ТЭС энергетического факультета БНТУ ведется в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к профессиональному образованию в энергетической области. Уровень образовательного процесса обеспечивает высокое качество теоретических и практических занятий, открывает широкие возможности для дальнейшего профессионального роста выпускников. Полученные знания и опыт инженеры смогут успешно использовать в работе в энергосистеме Беларуси, в том числе на первой Белорусской АЭС.

УДК 621.039.78

**ОБУЧАЮЩИЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ПРОВЕДЕНИЯ
РАДИАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ МЕСТНОСТИ**

КОМАР Д.И., КОНОВАЛОВ Е.А., КОЖЕМЯКИН В.А., ПРИБЫЛЕВ С.В.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В статье представлены преимущества использования программно-аппаратного комплекса «*SimRad*» при обучении порядку реагирования на ядерные и радиационные аварийные ситуации. Комплекс позволяет имитировать точечные источники гамма-излучения и радиоактивное загрязнение местности. Описаны функции комплекса и его основные возможности.

Ключевые слова: источники ионизирующего излучения, программно-аппаратный комплекс, поле мощности дозы, Монте-Карло моделирование.

**TRAINING SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR CARRYING OUT AREA
RADIATION SURVEY**DAMIAN I. KOMAR, EVGENIY A. KONOVALOV, VALERY A. KOZHEMYAKIN,
SERGEY V. PRIBYLEV*Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEX»,
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. The article presents the advantages of using the «*SimRad*» software and hardware complex for teaching how to respond to nuclear and radiation emergencies. Complex allows to simulate point sources of gamma radiation and radioactive contamination of the area. Its functions and main features are described.

Keywords: Ionizing radiation sources, software and hardware complex, dose rate field, Monte-Carlo simulation.

В Республике Беларусь функционирует более 1000 радиационно-опасных объектов. В настоящее время завершается строительство первой атомной электростанции. Широкое использование различных источников ионизирующих излучений (далее – ИИИ) обуславливает вероятность возникновения аварийных ситуаций, связанных с выходом радиоактивных веществ за защитные барьеры и радиоактивным загрязнением окружающей среды. Важнейшим фактором обеспечения радиационной безопасности при авариях и инцидентах на радиационно-опасных объектах является готовность аварийно-спасательных формирований к осуществлению мероприятий по ликвидации их последствий.

Одним из элементов подготовки сил реагирования на ядерные и радиационные аварийные ситуации является их обучение проведению аварийно-спасательных и других неотложных работ на радиоактивно загрязненной территории и в условиях наличия ИИИ, вышедших из-под контроля. При этом первоочередными мероприятиями являются проведение радиационной разведки, зонирование территории, установление контроля над аварийной установкой или источником и выработка соответствующих решений на принятие всесторонних мер по ликвидации последствий подобных аварий. Отработка необходимых умений и навыков в условиях радиоактивно-загрязненной местности и с реальными ИИИ часто труднореализуема на практике и требует специальных мер по обеспечению радиационной безопасности.

В целях повышения эффективности обучающего процесса в настоящее время находят широкое применение программно-обучающие комплексы. Для совершенствования системы подготовки работников аварийных служб, участвующих в реагировании на чрезвычайные ситуации с наличием ИИИ, УП «АТОМТЕХ» разработан и предлагается к использованию программно-аппаратный комплекс «*SimRad*», позволяющий имитировать точечные источники гамма-излучения, радиоактивное загрязнение местности и оценивать параметры формируемого радиационного поля. Внедрение в обучающий процесс организаций МЧС Беларуси данного комплекса позволило проводить учебные занятия по обучению разведке и оценке радиационной обстановки с помощью приборов радиационного контроля без использования ИИИ, тем самым исключив риск облучения тренируемых, а также исключив ряд организационных проблем.

Возможности и функции программы:

- задание параметров учебной площадки на картах сервисов *OpenStreetMap*, *Google*, Яндекс;
- расположение источников гамма-излучения;
- моделирование точечных источников гамма-излучения с радионуклидом ^{137}Cs ;
- моделирование поверхностного загрязнения территории радионуклидом ^{137}Cs ;
- генерирование поля мощности дозы гамма-излучения в зоне учебной площадки;
- отслеживание положения тренируемых и дозиметрических параметров;
- отслеживание положения знаков ограждения, устанавливаемых тренируемыми.

Время расчета зависит от количества источников и размеров учебной площадки. Корректность расчета результирующего распределения интенсивности излучения от точечных и площадных источников была проверена посредством Монте-Карло моделирования. Программное средство разрабатывалось с использованием эмпирической информации о поверхностных загрязнениях местности радионуклидами.

Программа «*SimRad*» позволяет контролировать тренируемых, отображать список участников тренинга и местоположение каждого участника с индикацией значения мощности дозы в точке его нахождения. Программа также визуализирует координаты знаков ограждения, установленных каждым тренируемым (рис. 3).

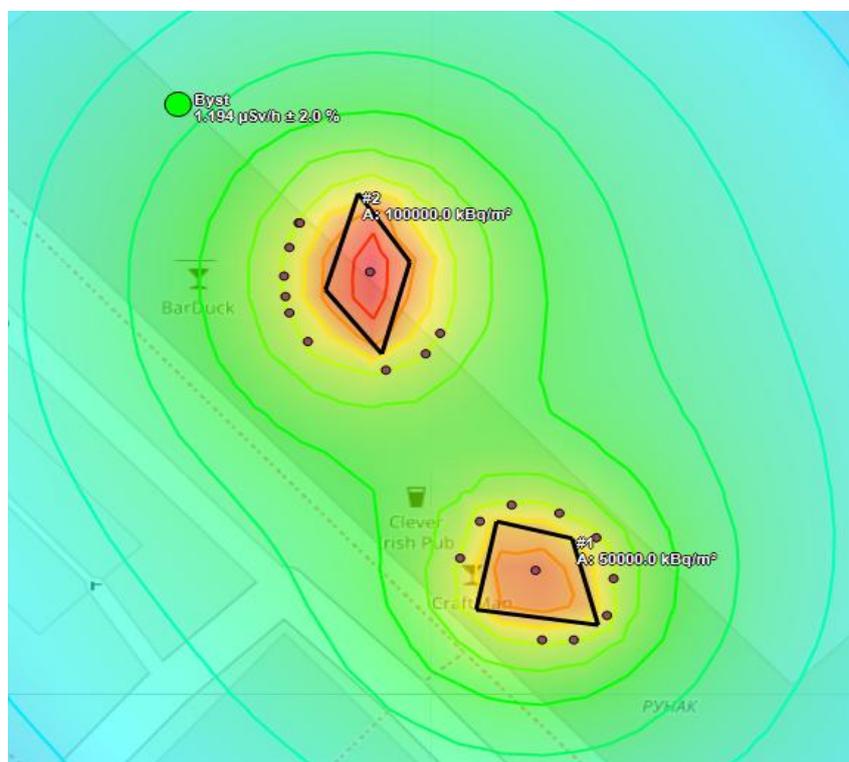


Рис. 3. Контроль расстановки знаков ограждения участниками тренировки

Программа «*SimRadMobile*» устанавливается на КПК тренируемого и предназначена для имитации работы прибора радиационного контроля из состава дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М. Программа позволяет работать в двух режимах: поисковый режим и режим измерения мощности дозы. Каждый блок детектирования характеризуется индивидуальной чувствительностью и диапазоном измерения мощности дозы по аналогии с реальным прибором.

Пользователь программы «*SimRadMobile*» получает следующую информацию:

- мгновенную скорость счета импульсов гамма-излучения;
- среднюю скорость счета импульсов гамма-излучения и погрешность;
- мощность дозы гамма-излучения и статистическую погрешность измерения;
- накопленную дозу.

Пользователь имеет возможность устанавливать и удалять виртуальные ограждения.

Координаты местоположения участника определяются с помощью встроенного в КПК GPS-модуля. При движении участника в автоматическом режиме составляется карта загрязнения местности (рис .4).



Рис. 4. Работа КПК с ПО «SimRadMobile» во время проведения обучающей тренировки

Для обеспечения работы комплекса предъявляются следующие требования к учебной площадке и оснащению специальных служб:

- площадь учебной площадки – не более 4 км²;
- размер одной из сторон учебной площадки – не более 2 км;
- количество знаков ограждения на одного тренируемого – до 100 шт;
- защищенный, карманный всепогодный компьютер с блоком детектирования гамма-излучения для тренируемого с установленной программой «SimRadMobile» для симуляции работы поискового дозиметра;
- компьютер для тренера с установленной программой «SimRad» для формирования задания и контроля хода учений;
- связь 3G/LTE для передачи данных между тренером и тренируемыми.

Проверка корректности генерации программой поля мощности дозы гамма-излучения от заданных источников проводилась посредством Монте-Карло моделирования с помощью кода MCNP. Была разработана Монте-Карло модель поверхности почвы для площадки 50×50 метров, на которой размещались источники гамма-излучения ¹³⁷Cs. Результаты сличения значений мощности дозы, рассчитанных с использованием программы «SimRad» со значениями, полученными методом моделирования Монте-Карло, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение значений мощности дозы, полученных «SimRad» и рассчитанных методом Монте-Карло

Точечный источник (1·10 ⁸ Бк)			Поверхностная активность (1·10 ⁶ Бк/м ²) Площадь загрязнения 50×50 м					
Расстояние от источника, м	Мощность дозы, мкЗв/ч		Отклонение, %	Координаты, м		Мощность дозы, мкЗв/ч		Отклонение, %
	SimRad	М.-К.		х	у	SimRad	М.-К.	
0,1	8,99	10,3	-12,7	10	10	1,695	1,903	-10,9
0,2	8,78	10,01	-12,3	20	10	1,787	1,958	-8,7
0,5	7,36	8,38	-12,2	60	10	0,234	0,223	4,9
1	4,6	5,29	-13,0	80	10	0,077	0,068	12,4
1,5	2,83	3,28	-13,7	60	40	0,238	0,220	8,2
2	1,84	2,12	-13,2	80	40	0,077	0,068	13,4
3	0,919	1,05	-12,5	10	55	0,386	0,372	3,8
5	0,353	0,391	-9,7	100	100	0,016	0,014	14,3
10	0,0905	0,0953	-5,0	70	70	0,061	0,052	16,7
20	0,0226	0,0226	0,0	10	50	1,105	1,056	4,6
50	0,0035	0,0032	9,4	10	45	1,590	1,736	-8,4

В массиве данных, приведенных в табл. 1, прослеживается хорошая сходимость результатов, полученных с помощью Монте-Карло моделирования и рассчитанных с использованием программы «SimRad».

Данный программно-аппаратный комплекс может эффективно использоваться при тренировках личного состава специализированных служб, участвующих в реагировании на ядерные и радиационные аварии и инциденты.

Список литературы

1. Комар, Д. И. Программа для симуляции радиационного загрязнения местности «SIMRAD» / Д. И. Комар, Е. В. Быстров, Е. А. Коновалов, С. В. Прибылев // Проблемы и перспективы развития территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, на современном этапе: материалы Международной научно-практической конференции, г. Хойники, 26-27 июля 2018 г. / ГПНИУ «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник»; под общ. ред. М.В. Кудрина. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – С. 210–212.
2. Комар, Д. И. Программно-аппаратное средство моделирования радиоактивного загрязнения территорий для обучения личного состава подразделений радиационной разведки / Д. И. Комар, Е. В. Быстров, Е. А. Коновалов, С. В. Прибылев // 8-я Междунар. науч. конф. по военно-техн. проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 16–17 мая 2019 г.: сб. науч. статей. В 5 ч. Ч. 1 / Государственный военно-промышленный комитет Республики Беларусь. – Минск, 2019. – С. 72–75.

УДК 539.16.08+004.42

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА**

КАЧАН С.М.^{1,2}, МИНГАЛЕЕВ С.Ф.³.

¹*Белорусский национальный технический университет
(Минск, Республика Беларусь)*

²*Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)*

³*VPI Development Center
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Разработана и апробирована лабораторная установка, позволяющая студентам проводить прямые эксперименты для изучения основных характеристик газоразрядных детекторов (зависимость счетной характеристики от напряжения, мертвое и разрешающее время, эффективность регистрации бета-частиц и гамма-квантов, и т.п.). Кроме того, установка позволяет эффективно (в ручном и автоматическом режимах) проверять выполнение основных статистических и физических закономерностей при регистрации ядерных излучений.

Ключевые слова: счетчик Гейгера-Мюллера, счетная характеристика, мертвое время, эффективность детектора, Arduino.

**LABORATORY SETUP BASED ON THE ARDUINO PLATFORM FOR STUDYING THE
CHARACTERISTICS OF THE GEIGER-MÜLLER COUNTER**

SVETLANA.M. KACHAN^{1,2}, SERGEI.F. MINGALEEV³

¹*Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

²*Belarusian State University
(Minsk, Republic of Belarus)*

³*VPI Development Center
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. We developed a laboratory setup that allows students to perform direct experiments for studying the main characteristics of Geiger-Muller counters (such as plateau length, deadtime and resolving time, registration efficiency for beta-particles and gamma-quants, and the like). Besides, this setup enables efficient verification (both, in manual and automatic modes) of the basic statistical and physical patterns in the registration of nuclear radiation.

Keywords: Geiger-Müller counter, plateau curve, dead time, efficiency, Arduino.

Введение

Подготовка специалистов для атомной отрасли требует формирования четких и глубоких представлений о методах регистрации ионизирующего излучения, их особенностях, достоинствах и недостатках, а также о характеристиках детекторов различного типа. Ассортимент предлагаемой как отечественными, так и зарубежными предприятиями измерительной техники в сфере ядерного и радиационного контроля постоянно расширяется. Однако предлагаемая приборная база ориентирована на удобство операторов при промышленном использовании и выдает информацию, прошедшую многоступенчатую обработку. В подавляющем большинстве реализаций такая техника отсекает возможность доступа к прямо измеряемым детектором величинам и не предполагает возможности настройки пользователем базовых параметров установки, что делает ее непригодной для ряда задач, возникающих в процессе обучения будущих специалистов.

В данной работе мы представляем разработку в виде учебной лабораторной установки, в которой в качестве детектора ионизирующего излучения используется счетчик Гейгера-Мюллера. Возникающий в момент регистрации импульс тока поступает через усилитель одновременно на вход осциллографа для отображения его временной развертки, и на вход микроконтроллера для автоматизированной обработки сигнала. Прямой доступ к управлению режимами работы счетчика, реализованный с помощью платформы Arduino, позволяет обучаемому не только извлечь из эксперимента основные характеристики данного газоразрядного детектора (счетная характеристика, мертвое время, эффективность регистрации бета-частиц и гамма-квантов), но и проверить выполнение основных статистических и физических закономерностей при регистрации ядерных излучений.

Описание лабораторной установки

Блок-схема лабораторной установки изображена на рис. 1, а его внешний вид представлен на рис. 2. Прибор содержит в качестве детектора цилиндрический счетчик Гейгера-Мюллера J305, способный регистрировать гамма-излучение и жесткое бета-излучение. толщина стеклянных стенок трубки Гейгера составляет $(50 \pm 10) \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$. Длина трубки $l = 88 \text{ мм}$, диаметр трубки $d = 10 \text{ мм}$. Катод выполнен напылением оксида олова на внутренние стенки трубки. Необходимое для работы счетчика высокое напряжение U (от 230 до 600 В) создается от источника постоянного напряжения 5 В с помощью модуля RadiationD-v1.1 (CAJОЕ). В этом же модуле происходит преобразование импульса тока, полученного на счетчике, в импульс низкого напряжения амплитудой около 4.4 В. Далее этот импульс напряжения подается на вход микроконтроллера модуля Arduino Pro Micro. Микроконтроллер организует регистрацию импульсов на заданном времени измерения и отображение полученных данных совместно с параметрами настроек прибора на жидкокристаллическом дисплее. Высокое рабочее напряжение U на счетчике регулируется вращением ручки потенциометра. Время измерения t задается вращением энкодера. Значения напряжения и времени измерения отображаются на ЖК экране.

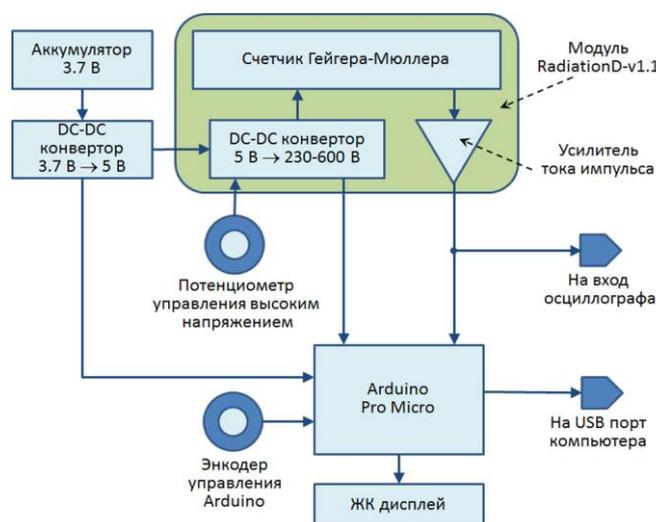


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки



Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки

Лабораторная установка позволяет передавать обработанные данные на компьютер по USB интерфейсу, а также отображать развертку сигнала со счетчика Гейгера на экране осциллографа.

Лабораторные задачи установки

Первоочередной задачей, которую можно решить именно с помощью данной лабораторной установки, является изучение характеристик счетчика Гейгера-Мюллера.

Снятие счетной характеристики предполагает измерение зависимости скорости счета n от источника с постоянной интенсивностью от напряжения U , подаваемого на трубку.

На рис. 3 показана типичная счетная характеристика, измеренная с помощью предлагаемой лабораторной установки. Она демонстрирует первоначально быстрый рост числа импульсов при превышении критического напряжения (около 350 В), что обусловлено зависимостью числа импульсов от числа образованных пар ионов, полученных в результате первичной ионизации и последующего газового усиления. Эта часть счетной характеристики попадает в так называемую область «ограниченной пропорциональности». Дальнейшее увеличение напряжения переводит счетчик в режим Гейгера, где отсутствует пропорциональность между первичной ионизацией, вызванной ионизирующей частицей, и амплитудой импульса – независимо от энергии частицы величина импульса остается постоянной (в нашем случае 4.4 В на выходе с усилителя тока импульсов). В режиме Гейгера счетная характеристика имеет вид плато с небольшим уклоном. Ширину плато для используемого счетчика J305 можно оценить в 125 В. Последующее увеличение напряжения на счетчике (в данном случае свыше 475 В) приводит к появлению непрерывного разряда и быстрому росту скорости счета.

Построение счетной характеристики дает возможность обоснованного выбора рабочего напряжения детектора – рабочее напряжение на трубке выбирается на середине плато, что дает значение 400-425 В. Таким образом, дальнейшее изучение характеристик детектора проводится при заданном рабочем напряжении 400 В.

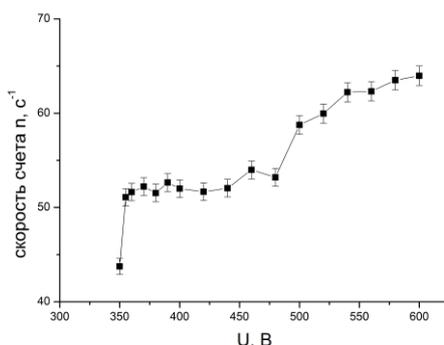


Рис. 3. Счетная характеристика счетчика Гейгера-Мюллера

Определение временных характеристик счетчика (мертвое время, разрешающее время и время восстановления). Мертвое время τ задает временной интервал, в течение которого показания детектора искажаются за счет наложений, т.е. попадание в детектор второй частицы вслед за первой, инициировавшей процесс регистрации, остается для счетчика незамеченным. Определение мертвого времени счетчика – это задача, которую с помощью нашей установки можно решать как методом прямых измерений (по форме регистрируемого импульса), так и косвенным методом, описанным в [1] (основанным на измерении скорости счета от эталонных источников малой и большой активности).

Вопрос оценки мертвого времени счетчика Гейгера-Мюллера и установления его зависимости от параметров трубки, электронной схемы, рабочего напряжения и др. до сих пор вызывает живые дискуссии [2].

Наблюдаемые с помощью лабораторной установки и осциллографа формы импульсов (см. рис. 4) позволяют установить, что мертвое время, в течение которого попадание второй частицы никак не отражается на процессе регистрации первой (форма импульса в течение этого

времени неизменна), для счетчика J305 составляет $\tau \sim 150$ мкс. Разрешающее время, соответствующее минимальному временному интервалу между импульсами, которые могут быть зарегистрированы отдельно, составляет $\tau_p \sim 210$ мкс. Разность между этими временами определяет время восстановления системы ~ 60 мкс. Как видно из рис. 4в и 4г, попадание второй частицы в счетчик в интервале времени восстановления приводит к уширению и частичному разделению импульса.

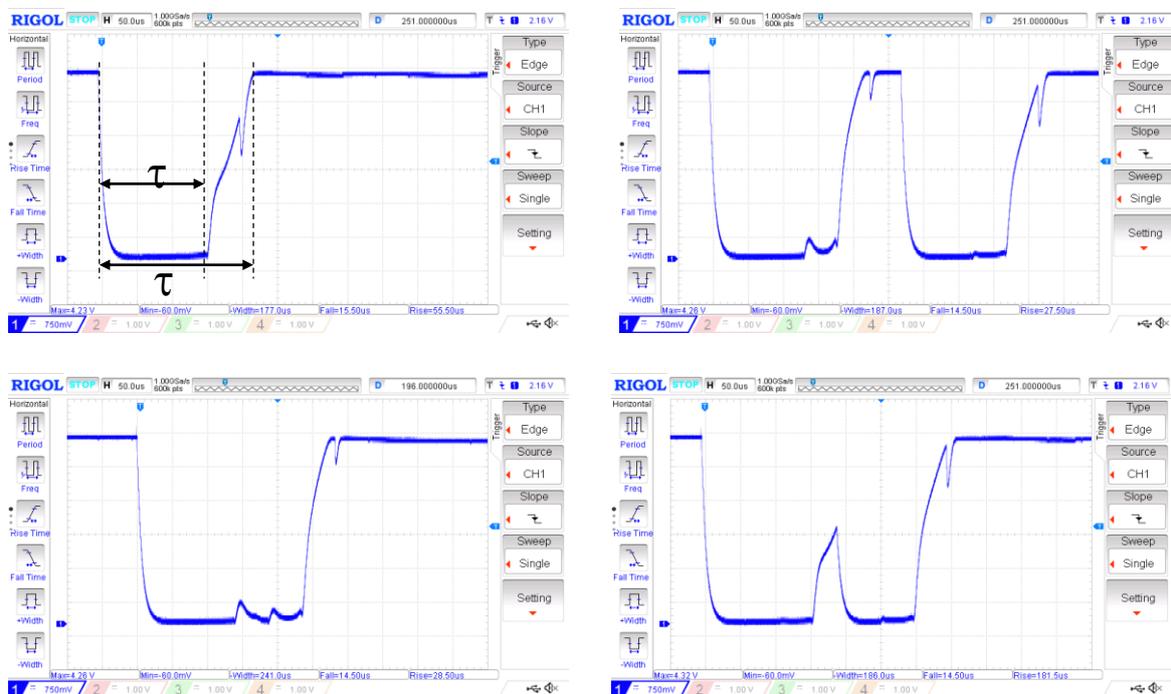


Рис. 4. Временная развертка импульсов напряжения на счетчике Гейгера-Мюллера при регистрации частиц (рабочее напряжение счетчика 400 В, скорость развертки сигнала на осциллографе 50 мкс/дел, масштаб по вертикали 750 мВ/дел):

а – отдельный импульс; б – два последовательных отдельных импульса; в, г – двойные импульсы, зарегистрированные в результате наложения сигналов от двух последовательно попавших в детектор частиц в интервале разрешающего времени детектора

Необходимо отметить, что наблюдаемая форма одиночного импульса (см. рис. 4а) отличается от классической формы с экспоненциальным нарастанием. В нашем случае заметны искажения в конце импульса, обусловленные, по всей видимости, недостатками схемы высоковольтного питания (маломощной и недостаточно устойчивой во время прохождения импульса).

Определение эффективности регистрации счетчика. Эффективность регистрации счетчика ε вводится как отношение числа зарегистрированных импульсов к числу падающих на счетчик частиц за время измерения. Она сильно зависит как от параметров самого счетчика, так и от вида ионизирующих частиц.

Цилиндрический счетчик J305 способен регистрировать бета-излучение, энергия которого достаточна для проникновения через стенки трубки (длина пробега электронов больше толщины стенок). Чтобы определить ε для электронов требуется эталонный бета-источник (активность которого известна) с достаточно большой граничной энергией E_β без сопутствующего гамма-излучения (например, Sr-90).

Также J305 регистрирует гамма-кванты за счет их взаимодействия с материалами трубки, что приводит к возникновению вторичных электронов, попадающих внутрь трубки. Чтобы определить ε для гамма-квантов требуется эталонный бета-источник с малой граничной энергией E_β и сопутствующим гамма-излучением с достаточно высокой энергией (например,

Со-60). Тогда, если закрыть излучающую поверхность такого источника алюминиевым фильтром толщиной ~ 3 мм, поток бета-излучения будет полностью поглощен, а поток гамма-квантов практически не ослабится в металле с низкой плотностью.

Разместив источник напротив счетчика на расстоянии r , превышающем его длину l , и проведя измерения счета за время экспозиции t с источником ($N_{u+\phi}$), а потом без него (N_{ϕ}), можно рассчитать эффективность регистрации по формуле:

$$\varepsilon = \frac{N_{рег}}{N_{над}} \cdot 100\% = \frac{N_{u+\phi} - N_{\phi}}{A \cdot t \cdot \eta \cdot \Omega} \cdot 100\% ,$$

где A – активность источника на текущий момент; η - вероятность испускания частицы на один распад; Ω - относительный телесный угол приема детектора. В первом приближении можно принять $\Omega = \frac{S}{r^2} \cdot \frac{1}{4\pi}$, где $S = d \cdot l$ - площадь центрального сечения детектора с диаметром стеклянной трубки d и ее длиной l .

Оценка указанным методом эффективности регистрации счетчиком J305 бета- и гамма-излучения дала значения 47% и 0.6%, соответственно, что совпадает с ожиданиями.

Заключение

Представленная нами лабораторная установка позволяет проводить целый комплекс новых лабораторных работ по изучению основных характеристик счетчиков Гейгера-Мюллера и уже хорошо зарекомендовала себя на практике. Однако, опыт её использования выявил и недостатки в схемотехнике, которые мы планируем исправить в следующей версии установки. Во-первых, схема DC-DC преобразователя 5В в регулируемое высокое напряжение (230В – 600В), используемого в модуле RadiationD-v1.1, оказалась слишком маломощной, что приводит к нестабильности напряжения, подаваемого на счетчик Гейгера-Мюллера при регистрации мощных потоков α -излучения (использование которых необходимо для сокращения времени проведения лабораторных работ и для регистрации мёртвого времени косвенным методом). Во-вторых, скорость АЦП в микроконтроллере ATmega32U4, используемого в Arduino Pro Micro, недостаточна для автоматизации регистрации и анализа формы импульсов без использования внешнего осциллографа – ожидается, что переход на микроконтроллер из серии STM32 позволит решить эту проблему и расширить спектр возможных приложений данной установки.

Список литературы

1. Практикум по ядерной физике. Под ред. Сергеева В.О. Санкт-Петербургский государственный университет. - СПб., 2006. - 184 с.
2. Almutairi B., Alam S., Goodwin, C.S., Usman S., Akyurek T.. Simultaneous experimental evaluation of pulse shape and deadtime phenomenon of GM detector. Scientific Reports. 2021; 11 (1) 3320.

УДК 621.039-78

ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ СЕЛЕКЦИЯ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

Соколов В.Б.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. С ростом сложности систем управления высокотехнологичных объектов, способных при определенных условиях оказывать негативное влияние на окружающую среду, повышаются психологические требования к выпускникам высшей школы.

Ключевые слова: Психологическая селекция.

PSYCHOLOGICAL SELECTION IN HIGH SCHOOL

Uladzimir.B. Sakalou

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

Abstract. With the increasing complexity of the management systems of high-tech objects capable of providing negative impact on the environment, psychological requirements for higher education graduates increase.

Keywords: Psychological selection.

Чем больше появляется новых и сложных технологий в последнее время, тем чаще встает вопрос о необходимости применения психологической селекции к выпускникам высшей школы, так как с каждым днем возрастает ответственность, возлагаемая на них. Особенно это относится к тем, кому приходится иметь дело со сложным технологическим оборудованием, способным при определенных условиях оказать негативное, а то и катастрофическое влияние на окружающую среду (к примеру, ядерный реактор).

Всем известна легенда о том, как однажды удалось избежать третьей мировой войны исключительно по той причине, что офицер, который должен был нажать на «военную» кнопку, не смог этого сделать – он впал в самый настоящий ступор и просидел перед пультом управления до тех пор, пока его не вывели из помещения с помощью врачей.

Легенда или чистая правда – сложно сказать, но описанная ситуация вполне могла быть, так как далеко не каждый человек способен вынести подобный груз ответственности в экстремальной ситуации.

Очевидно, что человек, которому возможно придется принимать крайне ответственное решение в ситуации, далекой от спокойного созерцания, должен обладать и определенной решительностью, и задатками лидера – в аварийной ситуации нет времени искать начальство и запрашивать санкцию на проведение тех или иных контраварийных мероприятий. Именно поэтому и требуется тщательная психологическая селекция студентов, обучающихся на соответствующих специальностях (например, специальность «Электронные и информационно-управляющие системы физических установок», БГУИР).

Мы живем в век информации, и правильно говорят, что тот, кто владеет информацией, тот владеет миром. Вопрос власти – это вопрос количества информации. Кроме того, информационное поле увеличивается с каждым днем. Именно поэтому информационная безопасность приобретает все большее значение, а подготовка кадров в этой области скоро может оказаться первостепенной задачей для любого государства. Более того, многие государства уже давно готовятся к этому моменту, ведь еще с середины 80-х годов прошлого столетия были предсказаны информационные войны.

Но несмотря на предсказания информационных войн, в настоящее время общество становится более открытым, что в свою очередь создает крайне благоприятные условия для несанкционированного доступа к информации, особенно – к конфиденциальной. К тому же, повсеместная компьютеризация, внедряемая во все основные хозяйственные сферы, начиная от медицины и заканчивая производством, ведет к появлению дополнительных каналов информационной утечки. Именно поэтому в обеспечении информационной безопасности нуждаются практически все, и для того, чтобы сохранить конфиденциальность информации на всех уровнях, начиная от небольшой коммерческой фирмы и заканчивая государственными интересами, необходимо все больше и больше хорошо подготовленных специалистов в области

информационной защиты.

Необходимо понять, что решение проблемы информационной защиты и безопасности вовсе не является одномоментным делом. Это проблема, решение которой носит постоянный характер, проблема, требующая создания целой системы на государственном уровне. Однако в настоящее время высшая школа оказывается практически один на один с проблемами, связанными с подготовкой специалистов в области защиты информации, и вынуждена решать эти проблемы самостоятельно.

Естественно, оптимально было бы производить психологический отбор еще на начальной стадии обучения, но это не представляется возможным: студент младших курсов еще не бабочка, а всего лишь куколка, и из него еще только ожидается появление или капустницы, или махаона. Но зато имеется возможность культивировать у студентов нужные черты характера, которые так же необходимы представителям определенных профессий, как и специальные знания – иногда даже сложно сказать, что важнее, ведь недостающие знания можно быстро восполнить, а вот недостающие черты характера – вряд ли.

Настоятельно рекомендуется работа профессиональных психологов со студентами «экстремальных» специальностей. Психологи должны не только помогать будущим специалистам культивировать нужные черты характера, но и выявлять категорически непригодных с психологической точки зрения для данной специальности студентов. К примеру, люди, склонные к наркомании и/или алкоголизму не могут обладать в полной мере необходимым чувством ответственности. Более того, в экстремальной ситуации они могут задержаться с принятием необходимого решения, или напротив – принять небольшую проблему за экстремальную ситуацию и поторопиться с контраварийными мерами. Это люди, на которых нельзя положиться в полной мере там, где оборудование может нанести невосполнимый вред окружающей среде.

Имеется и ряд других черт, которые могут воспрепятствовать работе с опасным и сложным технологическим оборудованием. К примеру, завышенная самооценка, гипертрофированное самолюбие, гипертрофированная нерешительность, несамостоятельность, себялюбие и так далее.

Прежде, чем утверждать, что для инженера самое главное – набор определенных знаний, рекомендуется вспомнить интересное описание мировой катастрофы, сделанное Стивеном Кингом в антиутопии «Противостояние»: ужасающие последствия имели место исключительно по той причине, что у одного из охранников закрытого военного комплекса был гипертрофированный страх смерти, и в тот момент, когда нужно было заблокировать все выходы из здания, чтобы предотвратить утечку отравляющих веществ, он сбежал, оставив свой пост – и разнес смертельный вирус по всему миру.

Да, художественный вымысел! Да, стандартный ход антиутопии-триллера! Но в наше время многие выпускники высшей школы имеют дело с оборудованием, которое способно так же отравить если не весь мир, то по крайней мере достаточную его часть. И задача психологов – предотвратить такое развитие событий, сделать его невозможным изначально, путем тщательной подготовки специалистов не только с профессиональной, но и – обязательно! – с психологической точки зрения.

Молодые люди с повышенным чувством ответственности, с задатками лидера, решительные, самостоятельные, обладающие чувством самоуважения и уважающие других, постоянно стремящиеся к новым знаниям – вот желаемые черты характера, которые должны выявить и культивировать психологи у кандидатов на диплом высшей школы.

Рассмотрим же те самые проблемы, которые в настоящее время стоят перед высшей школой, занимающейся подготовкой специалистов в области информационной безопасности и управления сложным технологическим оборудованием.

В первую очередь к таким проблемам можно отнести недостаточный профессионализм преподавательского состава. Причем, в основном это связано с отсутствием возможности переподготовки преподавательского состава высшей школы в стремительно изменяющихся условиях. Расширение информационного поля, появление новых способов защиты информации, появление новых информационных потоков, которые необходимо защищать, - все это предполагает изменение учебного процесса. Однако, для таких изменений нет ни материально-технической, ни даже мотивационной базы, и переподготовка специалистов-

преподавателей не осуществляется. В результате преподаватели неуклонно отстают от изменяющихся условий, и соответственно падает уровень преподавания и подготовки специалистом.

К этой проблеме тесно примыкает другая, касающаяся студентов: у них нет мотивации для инновационной деятельности, ну а назвать достаточной мотивацией будущую зарплату или престижную работу сложно – то ли будет, то ли нет. Хуже то, что выпускники высшей школы, ориентированные на получение престижной работы и высокой зарплаты, получив требуемое, застывают в профессиональной неподвижности. Лишь немногие из них сохраняют желание дальнейшего движения в своей области, ориентируются на творческую деятельность и профессиональную самореализацию. Для подавляющего же большинства профессиональной самореализацией является все та же зарплата.

Также необходимо обратить внимание на оснащенность лабораторий для занятий: по большей части ознакомление студентов с современными техническими средствами является исключительно теоретическим.

Однако, основной проблемой оказывается вовсе не техническая оснащенность и даже не профессионализм преподавательского состава высшей школы. Одной из важнейших проблем оказывается недостаточность психологической подготовки выпускников высшей школы.

К сожалению, высшая школа в настоящее время ориентирована лишь на то, чтобы дать студентам необходимый минимум технических знаний в изучаемой области. Однако, при этом не учитывается, что специалист в данной области должен обладать определенным набором психологических черт характера, которые позволят ему успешно выполнять свою работу. В противном случае специалист становится бомбой замедленного действия, которая в любой момент может уничтожить ценную информацию и дорогостоящее технологическое оборудование. И чем выше профессионально-технический уровень такого специалиста, тем более он может оказаться опасен для информации и оборудования, безопасность которых он призван обеспечивать.

Отметим, что преподаватели высших школ России, занятые в подготовке кадров в области информационной безопасности и безопасной эксплуатации технологического оборудования, крайне обеспокоены отсутствием учебников, которые были бы актуальны в данный момент времени – по их мнению, далеко не все учебные пособия, задействованные в настоящее время в учебном процессе, отражают текущее положение вещей. При этом рекомендуется предпринять действия на государственном уровне: с помощью государственного финансирования сформировать творческие коллективы, которые и будут заниматься разработкой таких учебников и включением их в учебный процесс [1].

В то же время преподаватели высших школ США, занимающиеся подготовкой кадров в области безопасности, не слишком заботятся об учебниках, считая их необходимым, но недостаточным условием для качественной подготовки специалистов такого профиля. В качестве необходимого условия для качественной подготовки специалистов в области защиты информации в США называют психологическую подготовку. Более того, специалист, имеющий доступ к информации и осуществляющий ее защиту, решающий проблемы информационной безопасности, должен обладать определенным психологическим профилем и набором нравственных качеств, без которых он не получит возможности заниматься информационной безопасностью даже в том случае, если его техническая подготовка будет практически идеальной [2].

В США тщательно разработана система психологической подготовки кадров. Эта подготовка включает в себя как пропаганду семейных ценностей, так и пропаганду американского образа жизни. У специалистов, имеющих доступ к информации, буквально культивируется безоговорочный патриотизм, как необходимая черта характера, представляющаяся потенциальным работодателям даже более важной и существенной, чем техническая подготовка.

К сожалению, приходится отметить, что у нас ситуация чуть ли не обратная: после смены государственного строя патриотизм был приравнен чуть не к субкультуре и как таковой вышел из моды, что затрудняет не только подготовку специалистов в области защиты информации, но и подготовку кадров во многих других областях хозяйственной деятельности,

особенно в тех, где речь идет об интересах государства, а не только о частных интересах, реализация которых может быть быстрой, а результат виден практически сразу.

Кроме того, в настоящее время критерием успешности человека является его доход. Однако, для специалиста оптимально стремление не столько к повышению дохода, сколько к творческой и профессиональной самореализации, стремление быть лучшим в выбранной сфере деятельности. При этом финансы должны оказываться не на первом месте. В противном случае специалиста будет слишком легко просто перекупить, предложив ему больший доход, нежели тот, что он имеет, либо купить у него информацию, которую он призван охранять – именно этим и занимаются специалисты по промышленному и политическому шпионажу, и, к сожалению, нередко достигают успеха в своей деятельности.

Одной из основных проблем в воспитательном воздействии на студентов является то, что они попадают в высшую школу с уже полностью сформированным мировоззрением. И фактически приходится бороться с этим, а подобные действия изначально сложны – ведь приходится иметь дело с мировоззрением, сформированном с самого раннего детства, на основе некритически воспринимаемой информации, то есть, практически с аксиомами, которые молодые люди считают абсолютно верными и не подлежащими пересмотру. Из этого не следует, что нужно прекратить воспитательный процесс, оправдываясь сформировавшимися взглядами, системой поведения и мировоззрением студентов. Но представляется, что было бы весьма желательным проводить профилактические мероприятия, которые позволили бы влиять на формирование личности до того, как эта самая личность станет студентом высшей школы. То есть, определенное воздействие должно производиться на молодых людей еще до начала их обучения в высшей школе, во время обучения в средней школе, буквально начиная с первых классов [3].

Прекрасный пример такого влияния – пионерская и комсомольская организации, которые существовали во времена развитого социализма. Имелась определенная преемственность поколений: октябрята, пионеры, комсомольцы и, наконец, члены партии или беспартийные, но имеющие определенное мировоззрение, сформированное годами пребывания в детских и юношеских общественных организациях. Представляется, что БРСМ, как организация, уже сформированная, имеющая определенные цели и задачи, включающие в себя, кстати, и воспитательные, могла бы выступить преемником в определенном смысле бывших ранее организаций и взять на себя воспитательные функции, которые так необходимы в данный момент. Те самые воспитательные функции, которые сделали бы не слишком модной порнографию, алкоголь, наркотики и так далее, зато ввели бы в моду и семейные ценности, и патриотизм. Также представляется, что к воспитанию молодежи в необходимом духе можно привлечь различные религиозные конфессии, так как основные конфессии, к которым принадлежит большинство населения государства, в своей основе имеют те самые нравственные ценности, которые необходимы (уважение к семейным ценностям, патриотизм, чувство ответственности, верность долгу, дисциплинированность, уважение к авторитетам и так далее).

Следует отметить, что специалисты, занимающиеся информационной безопасностью и вопросами безопасной эксплуатации технологического оборудования, должны обладать следующими качествами:

- патриотизм;
- уважение к семейным ценностям и традициям (желательно даже, чтобы специалист происходил из семьи, что называется, с традициями);
- повышенное чувство ответственности;
- верность долгу;
- дисциплинированность;
- уверенность в себе;
- упорство в целедостижении;
- способность к принятию самостоятельных решений;
- способность работать в команде;
- способность к творческому мышлению;
- стремление к творческой деятельности и самореализации;
- стремление к профессиональной самореализации;

- способность к реальной самооценке.

Подобный набор нравственных качеств тщательно культивируется во многих странах мира, особенно, когда речь заходит о подготовке специалистов в таких проблемных и важных областях, как информационная защита или атомная энергетика. Именно эти качества необходимо культивировать и у наших специалистов, прибегая к помощи психологов, общественных организаций и так далее. Полезными могут оказаться экскурсии по стране, выдержанные в патриотическом духе, рекомендация молодым людям патриотических книг начиная еще со школы и тому подобное. Такую задачу практически невозможно решить силами одной высшей школы, ее решение должно затрагивать многие сферы жизни будущих специалистов, причем еще до того момента, когда они таковыми станут, и даже до того, как станут студентами высшей школы. Соответственно, решение задачи такого масштаба является прерогативой государства, а высшая школа обязана всеми силами помогать движению в требуемом направлении.

В настоящее время высшая школа может обеспечить психологическое сопровождение студентов специальностей, относящихся к сфере безопасности, а также с помощью кураторов групп осуществлять определенное воздействие, призванное культивировать такие качества, как патриотизм и уважение к семейным ценностям (к примеру, с помощью экскурсий и тому подобного). Кроме того, взаимодействие высшей школы и потенциальных работодателей может помочь в культивировании таких качеств, как стремление к творческой деятельности и профессиональной самореализации. Таким образом, высшая школа вовсе не оказывается полностью беспомощной перед имеющимися проблемами, но ей необходима помощь на государственном уровне, чтобы качество подготовки специалистов было на должном – высоком! – уровне.

Список литературы

1. Авсентьев О.С., Прийма В.Н., Малышев А.А., Дураковский А.П. Системные аспекты проблематики подготовки специалистов в области информационной безопасности. // Информационная безопасность. – 2009. – №4. – С. 621-622.
2. Згадзай О.Э. Вопросы подготовки специалистов в области информационной безопасности. // Вестник Казанского юридического института МВД России. – 2013. – №3(13). – С. 93-97.
3. Белов Е.Б. Современное состояние системы подготовки специалистов в области информационной безопасности. // Материалы XVII Национального форума информационной безопасности «Инфо-форум 2015» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://2015.infoforum.moscow/conference/>.

Научное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АЭС И ТЭС**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

(Минск, 27–28 апреля 2021 года)

В авторской редакции
Ответственный за выпуск С.М. Сацук
Компьютерная верстка: Н.В. Грибова, С.С. Стома, П.О. Глецевич
Дизайн обложки: *В.М. Задоя*

Подписано в печать XXXX Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/123 от 24.03.2014,
№ 2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровка, 6

Научное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ АЭС И ТЭС**

**МАТЕРИАЛЫ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

(Республика Беларусь, г. Минск, 27-28 апреля 2021 года)

**INSTRUMENTATION AND CONTROL
SYSTEMS FOR NPP AND TPP**

**PROCEEDINGS OF
II INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE**

(Republic of Belarus, Minsk, April 27-28, 2021)

В авторской редакции
Ответственный за выпуск *С. М. Сацук*
Компьютерная верстка: *Н. В. Грибова, С. С. Стома, П. О. Глецевич*

Подписано в печать 17.05.2021. Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 34,64. Уч.-изд. л. 33,1. Тираж 95. Заказ 62.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,
№ 2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск