

УДК 519.673+534-16+004.42+621.31

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ МЕХАНИЗМОВ И ТУРБОАГРЕГАТОВ

П.Ю. БРАНЦЕВИЧ, С.Ф. КОСТЮК, Е.Н. БАЗЫЛЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 22 октября 2015*

Рассмотрена аппаратно-программная организация компьютерных многоканальных систем вибрационного контроля. Применение таких систем обеспечивает проведение в режиме реального времени мониторинга вибрационного состояния технических объектов, решение задач сигнализации и защиты по индивидуальным критериям в автоматическом режиме. Предложены способы обработки вибрационных характеристик пуска-выбега и длинных реализаций вибрационных сигналов при решении задач оценки состояния технических объектов.

*Ключевые слова:* вибрация, контроль, мониторинг, измерительно-вычислительный комплекс, обработка.

### Введение

С целью повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции и прибыльности производства предприятия стремятся снизить производственные затраты. Одной из существенных статей себестоимости продукции являются расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание машинного оборудования, задействованного в производственном цикле. В связи с этим актуальным является постоянное совершенствование стратегий эксплуатации и технического обслуживания оборудования, основанное на современных технологиях контроля и анализа его технического состояния и обобщения практического опыта эксплуатации. Такие стратегии как «Техобслуживание, направленное на повышение надежности» и «Техобслуживание, направленное на повышение суммарного показателя эффективности работы оборудования» можно фактически рассматривать не как стратегии техобслуживания, а как эксплуатационные стратегии, в которых техническое обслуживание является составной частью производственного цикла. Данные стратегии позволяют количественно определить суммарный коэффициент готовности производственных средств в пределах заданного временного интервала. Используя современные системы мониторинга машинного оборудования, специалисты предприятия имеют возможность заранее составить график профилактических работ, а также повысить коэффициент готовности оборудования всего предприятия и снизить материальные и временные затраты на техобслуживание.

Состояние производственного объекта характеризуется многими параметрами, имеющими различную физическую природу. Но для механизмов и агрегатов, в основу механического функционирования которых положено вращательное движение, одними из важнейших параметров являются уровень и спектральный состав вибрации, причем при длительном безостановочном функционировании технического объекта требуется непрерывное наблюдение или слежение за его вибрационным состоянием [1–5]. Одной из важнейших задач систем вибрационного контроля, мониторинга и защиты механизмов с вращательным движением является определение амплитудных и фазовых параметров вибрации в реальном времени при многоканальном режиме работы. Получаемые в результате решения этой задачи данные позволяют производить комплексную оценку вибрационного состояния (в том числе и

уравновешенности) гибкого валопровода, а также являются основополагающими при выполнении балансировочных работ. Помимо этого амплитудно-фазовые параметры вибрации подшипниковых опор и их изменения во времени являются ключевыми при построении систем оценки технического состояния и диагностики механизмов с вращательным движением [2, 3].

### **Компьютерный вибрационный мониторинг**

В зависимости от важности выполняемых оборудованием функций, его стоимости и величины возможного ущерба при внезапной аварии, реализуют периодический или непрерывный стационарный мониторинг параметров вибрации. При эксплуатации сложных и дорогостоящих агрегатов (турбогенераторы, газоперекачивающие установки и т.п.) стандартами определены правила проведения непрерывного контроля их вибрационного состояния и мониторинга [6–8]. Для решения этих задач применяют многоканальные системы, которые определяют, отображают и регистрирующие на каком-то носителе информации значения параметров вибрации через небольшие (не более нескольких секунд) промежутки времени, а также выполняют допусковый контроль, функции сигнализации и даже защитного отключения [5]. Во многих системах для представления полученных данных используются компьютеры, которые, однако, не задействуются непосредственно при вычислении параметров вибрации.

Концепция использования компьютера в качестве основного вычислительного блока параметров вибрации реализована в измерительно-вычислительном комплексе (ИВК) серии «Лукомль», разработанном и производимом научно-исследовательской лабораторией систем вибродиагностики БГУИР [9, 10]. Комплексы данного типа применяются в качестве штатной системы вибрационного контроля, мониторинга и защиты турбоагрегатов на электростанциях Беларуси. Структурно ИВК представляет собой компьютер с типизированным модулем АЦП, подключаемым к его стандартному интерфейсу (ISA, PCI, USB), блоком аналоговой обработки сигналов, на который подаются сигналы с первичных виброизмерительных каналов, и блоком управления сигнализацией и защитным отключением. По сути, это перепрограммируемый компьютерный измерительный прибор, решающий специальные задачи. Его основными функциями являются:

- определение в режиме реального времени интенсивности вибрации в стандартизованных или задаваемых частотных диапазонах, частоты вращения вала, значений амплитудных и фазовых параметров, по крайней мере, до десяти спектральных составляющих вибрации, кратных частоте вращения (порядковый анализ), пик-фактора исходного сигнала;
- сравнение реально полученных значений с контрольными (величина которых может изменяться от точки к точке и с течением времени) и выработка по определенным алгоритмам сигналов сигнализации, выдаваемых на отображающие и исполнительные устройства.
- реализация оригинальных алгоритмов защиты технических объектов по вибрационным параметрам, которые учитывают факторы низкочастотной вибрации, высокочастотной вибрации, первой оборотной составляющей вибрации, изменение вектора оборотной составляющей [11].

Так как основное назначение комплекса – работа в штатном режиме по обеспечению вибрационного контроля сложных технических объектов, то к нему предъявляются высокие требования по надежности функционирования, достоверности результатов, простоты и удобства работы пользователя. С целью удовлетворения этим требованиям тщательно проработаны процедуры запуска программы, управления файлами и алгоритмы функционирования. Особое внимание уделено математическим методам обработки исходных, формируемых первичными виброизмерительными преобразователями (ВИП), сигналов, представляемых в единицах виброускорения. С целью повышения достоверности вычислений при переходе к единицам виброускорения и виброперемещения интегрирование производится во временной и в частотной областях отдельными программными модулями. В режиме реального времени реализовано удаление из первичных вибросигналов низкочастотных дрейфов, которые могут возникать при резком изменении температуры в местах установки ВИП или по другим причинам [12].

Вычисляемые в ходе вибрационного мониторинга параметры записываются в суточные файлы на жестком диске, причем для каждой контролируемой подшипниковой опоры создается свой файл. Периодичность формирования записей по каждой точке контроля – 2–3 с. Эти

файлы могут передаваться в производственную автоматизированных систем управления технологическими процессами и подвергаться вторичной обработке в системах оценки технического состояния и диагностики. За время эксплуатации комплексов «Лукомль» был зафиксирован ряд случаев существенного повышения вибрации на контролируемых объектах, потребовавших их оперативной остановки [11, 13].

### Обработка вибрационных характеристик пуска и выбега

Компьютерные системы за счет возможности реализации и оперативной модификации разнообразных алгоритмов обработки позволяют обеспечить выполнение самых разнообразных функций, связанных с обработкой вибрационных данных. Особый интерес представляют вибрационные характеристики, получаемые при пусках и выбегах турбоагрегатов. На рис. 1 приведен пример изменения среднего квадратического значения (СКЗ) виброскорости подшипниковых опор при останове турбоагрегата, в ходе вибрационного мониторинга с помощью ИВК «Лукомль».

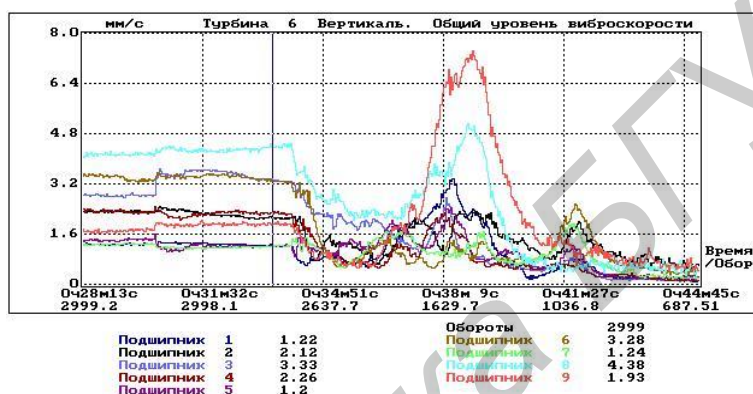


Рис. 1. Изменение СКЗ виброскорости подшипниковых опор турбоагрегата при выбеге

Однако время выбега для каждого случая имеет свое конкретное значение, что значительно затрудняет сравнительный анализ во временной области. Поэтому осуществляют преобразование вибрационных характеристик пуска-выбега в такой вид (рис. 2), когда ось абсцисс представляет линейное изменение частоты вращения ротора, а ось ординат – амплитуду или размах колебаний оборотной составляющей вибрации [14, 15].

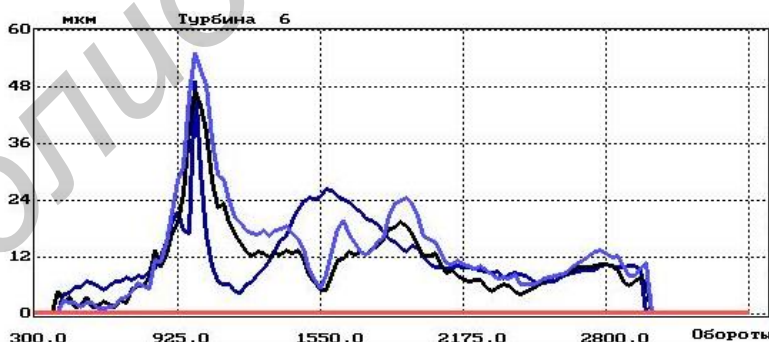


Рис. 2. Вибрационные характеристики выбега для подшипниковой опоры генератора

Вид вибрационных характеристик выбега достаточно разнообразен, причем существенные отличия наблюдаются даже для одноименных подшипников разных турбоагрегатов одного и того же типа. Однако для переходных вибрационных характеристик имеются и некоторые закономерности, например наличие максимумов (глобального и локальных), которые по форме напоминают параболу, а также плавность изменения характеристик, по крайней мере в какой-то частотной зоне. Специалистов в области вибрации интересует изменение переходных вибрационных характеристик, полученных для одного и того же подшипника в разное время, так как их причиной может быть, например, смещение в частотной области значений собственных частот, или изменение величины дисбаланса ротора, или какие-то еще причины.

Сравнительный анализ можно проводить визуально, однако это трудоемко и требует высокой инженерной квалификации. Поэтому предложены алгоритмы и разработано программное средство для автоматизации этой процедуры на основе параметров вибрационных характеристик пуска-выбега, отражающих свойства их форм и значения амплитуд [16].

### Анализ длинных реализаций вибрационных сигналов

Системы непрерывного стационарного мониторинга позволяют зафиксировать факт возникновения аномальной ситуации на контролируемом объекте и оперативно отреагировать на него стандартным образом. Но для выяснения причин неполадки и предложения рекомендаций по ее устранению или последующему недопущению требуется более тщательный анализ. Для этого желательно получать непрерывный вибрационный сигнал на протяжении развития неисправности на достаточно длительном временном интервале (минуты, часы и даже сутки).

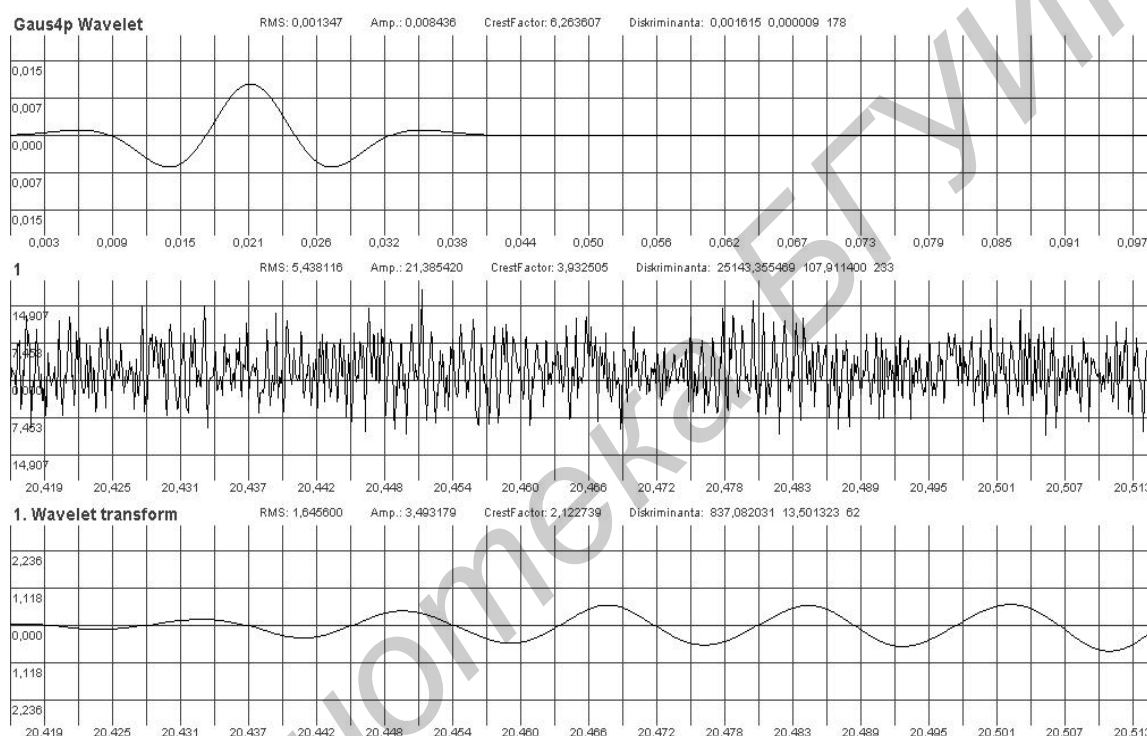


Рис. 3. Форма вейвлета, исходный вибрационный сигнал и сигнал, выделенный в результате вейвлет-преобразования, при зарождении дефекта, связанного с появлением низкочастотной составляющей вибрации

Регистрацию таких вибрационных сигналов можно осуществить используя измерительно-вычислительный комплекс «Тембр» на базе мобильного компьютера, модуля АЦП с USB интерфейсом, виброизмерительных каналов с первичными пьезоэлектрическими преобразователями и проблемно-ориентированного программного обеспечения [17–19].

При решении задач вибродиагностики применяются разнообразные способы исследования вибрационных сигналов: спектральный, порядковый и вейвлет анализ; выделение и исследование огибающей; оценка ПК-фактора, эксцесса, асимптоты,  $s$ -дискриминанты; выделение и исследование периодической и шумоподобной составляющих [20–23]. В качестве примеров на рис. 3, 4 приведены результаты вейвлет и спектрального анализа вибрационного сигнала, зафиксированного при резком нарастании СКЗ виброскорости в полосе 10–1000 Гц в единицах виброскорости. Спектральный анализ позволяет выявить новые гармонические составляющие, а вейвлет-преобразование – обнаружить появление вибросигнала в определенной частотной зоне и оценить скорость нарастания вибрации [23, 24]. Интересные результаты можно получить и при выделении групп периодических составляющих и проведении усреднения во временной области при определении причин повышения вибрации и их взаимосвязей [25, 26].

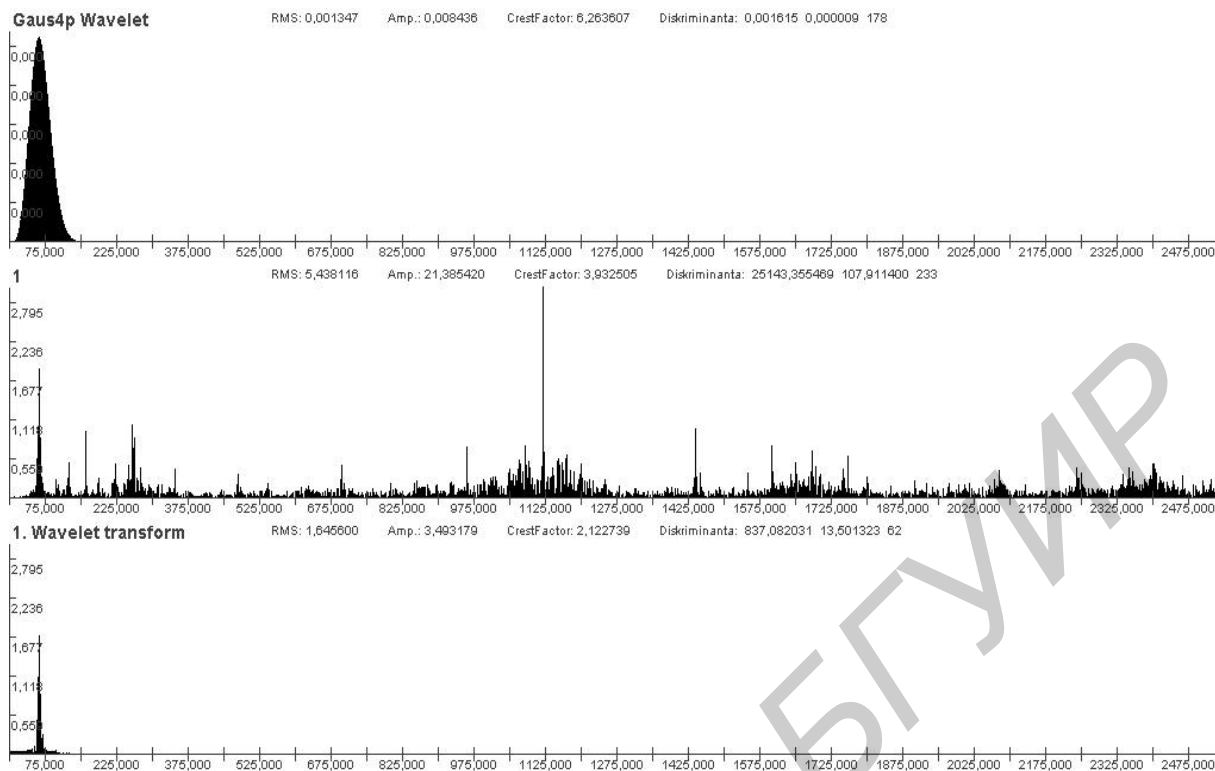


Рис. 4. Частотная характеристика вейвлета, амплитудные спектры вибрационного сигнала и сигнала, выделенного в результате вейвлет-преобразования, при зарождении дефекта, связанного с появлением низкочастотной составляющей вибрации

### Заключение

Многолетний опыт эксплуатации ИВК «Лукомль» показал их хорошую точность при определении параметров вибрации, высокую надежность в работе и адаптируемость к решению новых задач. Однако в настоящее время появляются и решаются новые задачи в области создания систем оценки технического состояния, поддержки принятия решений и диагностики по вибрационным параметрам. Так, расширение пропускной способности каналов передачи данных и развитие компьютерных интернет-технологий позволяют создавать подобные системы на основе распределенного сбора больших объемов виброметрических данных и программных средств как традиционного, так и браузерного исполнения, доступ к которым производится через интернет-ресурс [27]. Разработан прототип подобной системы. Для регистрации длительных реализаций вибрационных сигналов применяется комплекс «Тембр-М» [28, 29]. Обработка длинных реализаций вибрационных сигналов осуществляется программным средством, написанном на языке Java, которое может выполняться в браузерах, что позволяет использовать для обработки мобильные платформы и выполнять достаточно сложные цифровые преобразования и анализ данных в любом месте, где имеется мобильная связь.

## COMPUTER VIBRATION MONITORING OF MACHINERY AND TURBINE UNITS

P.J. BRANCEVICH, S.F. KASTSIUK, Y.N. BAZYLEU

### Abstract

The hardware-software organization of computer multichannel systems of vibration control is considered. Use of such systems provides execution in real time monitoring of technical objects vibration condition, the solution of problems of the alarm system and protection on individual criteria in the automatic mode. Processing ways of start-up and stop vibration characteristics and vibration signals long realization for problems solution of technical objects condition assessment are offered.

## Список литературы

1. *Ширман А.Р.* Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996.
2. *Bently D.E., Hatch C.N., Grissom B.* Grissom Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Canada, 2002.
3. *Гольдин А.С.* Вибрация роторных машин. М., 1999.
4. *Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю.* Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб, 2000.
5. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика. М., 2005.
6. ISO 10816. Mechanical vibration. Evolution of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1–5.
7. ГОСТ ИСО 10816–1–97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.
8. ГОСТ 25364–97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений.
9. *Бранцевич П.Ю.* // Энергетика и ТЭК. 2008. № 12 (69). С. 19–21.
10. *Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф.* Устройство для измерения параметров вибрации и защиты механизмов с вращательным движением / Патент на полезную модель РБ № 8654.
11. *Brancevich P., Miao X., Li Y.* // 20th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, Thailand, 7–11 July 2013. P. 612–619.
12. *Бранцевич П.Ю.* // Матер. 6-й Междунар. научн. конф. «Актуальные проблемы информатики». Ч. 2. Минск, 1998. С. 336–343.
13. *Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф.* // Сб. научн. тр. «Достижения физики неразрушающего контроля». Минск, 2013. С. 67–74.
14. *Бранцевич П.Ю.* // Сб. докл. «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций». Москва, 2005. С. 115–121.
15. *Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Базылев Е.Н.* // Матер. третьей Междунар. науч.-практ. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». Минск, 28–29 апр. 2015 г. С. 145–147.
16. *Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н.* // Докл. БГУИР. 2015. № 2. С. 153–157.
17. *Бранцевич П.Ю., Жук М.М., Костюк С.Ф. и др.* // Сб. тез. докл. 4 Междунар. научн.-практ. конф. «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». Т.1. Минск, 2007. С. 183–186.
18. *Бранцевич П.Ю., Бобрук Е.В.* // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2012. № 1 (31). С. 5–8.
19. *Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Носко Д.В. и др.* Устройство для обработки вибрационных сигналов при динамических испытаниях конструкций и диагностике механизмов с вращательным движением / Патент на полезную модель РБ № 4050.
20. *Brancevich P., Li Y.* // 21st International Congress on Sound and Vibration. Beijing, China, 13–17 July 2014. P. 4122–4129.
21. *Бранцевич П.Ю.* // Topical areas of fundamental and applied research: Proceedings of the Conference. North Charleston, 2013. Vol. 1. P. 111–116.
22. *Бранцевич П.Ю.* // Сб. науч. тр. «Актуальные вопросы машиноведения». 2013. Вып. 2. С. 277–283.
23. *Бранцевич П.Ю.* // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. 2014. Вып. 3. С. 220–228.
24. *Бранцевич П.Ю., Гузов В.А.* // Сб. докл. «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций». Москва, 22–26 октября 2007. С. 58–66.
25. *Бранцевич П.Ю., Базаревский В.Э., Костюк С.Ф.* // Сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике «Механика 2011». Минск, 26–28 октября 2011 г. Т. II. С. 27–31.
26. *Базаревский В.Э.* // Докл. БГУИР. 2013. № 1 (71). С. 51–57.
27. *Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Базылев Е.Н. и др.* // Матер. 7-й Междунар. научн.-техн. конф. «Приборостроение-2014». Минск, 19–21 ноября 2014. С. 39–40.
28. *Бранцевич П. Ю.* // Сб. статей IV междунар. заочной научн.-техн. конф. «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2014)». Тольятти, 2014. С. 55–67.
29. *Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Базылев Е.Н. и др.* // Матер. Международн. научн. конгресса по информатике «Информационные системы и технологии». Минск. 4–7 ноября 2013 г. С. 286–290.