

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  $\Lambda$ -шкале

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

- относительной скорости репродукции предшественников запаздывающих нейтронов

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

- и относительной интенсивности источника

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

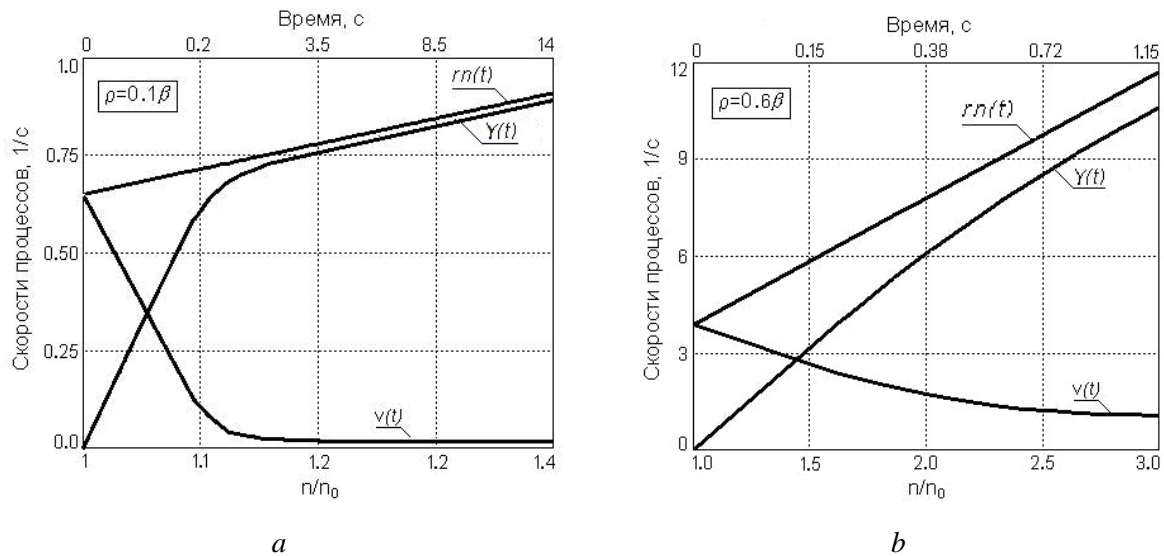
(В приведённых соотношениях использованы стандартные обозначения:  $\rho$  – абсолютная реактивность,  $\Lambda$  – время генерации мгновенных нейтронов,  $\beta_j, \lambda_j$  - доли групп и постоянные распада ПЗН.)

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

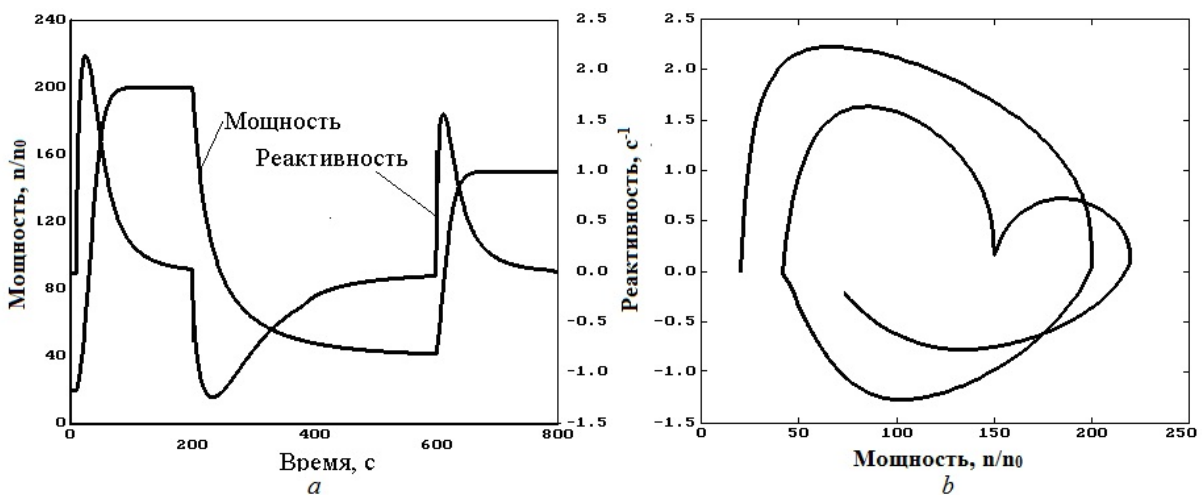
В эксплуатационных режимах ядерного реактора быстро устанавливается равновесие между процессами на мгновенных нейтронах (характеризуемых реактивностью  $r(t)$ ) и

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:  
 а –  $\rho = 0.1\beta$ ; б –  $\rho = 0.6\beta$

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).



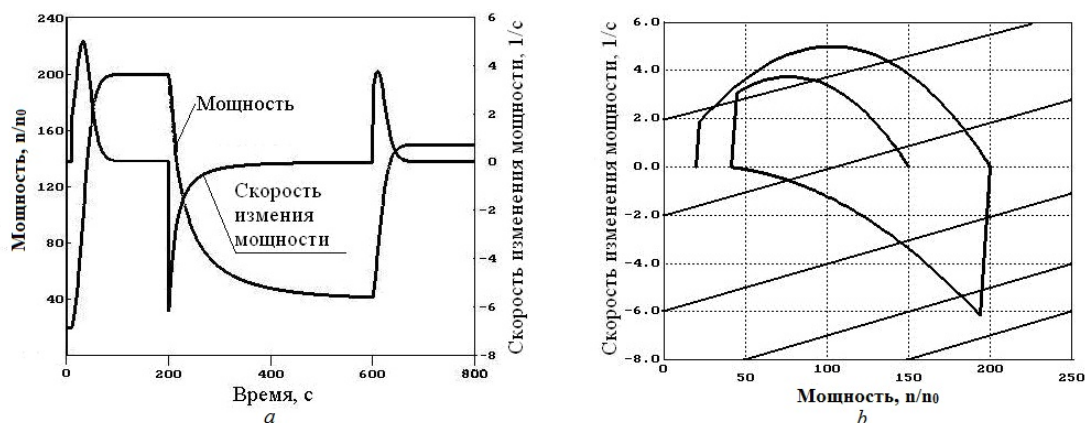
**Рис. 2.** Отображение мощности и реактивности:

а – развёртка во времени, б – 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  $x(n)=a+b*n$ , 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  $\alpha$  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.