

ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ РЕАКТИМЕТРА

А.Г. Юферов

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1*



Целью работы является вывод и анализ метрологической модели реактиметра в форме дисперсионного уравнения, связывающего дисперсии входного и выходного сигналов реактиметра при наложении случайных шумов на входе. Предлагается стандартизовать форму уравнения реактиметра, представив основной вычислительный блок реактиметра уравнением свертки. Тем самым метрологические характеристики реактиметра полностью определяются аппаратной функцией этого блока, имеющей смысл переходной характеристики, описывающей процессы на запаздывающих нейтронах после ступенчатого скачка мощности. Показано, что амплитудно-частотная характеристика линейного блока реактиметра позволяет рассматривать аддитивный шум на входе как белый. Для таких условий в работе получены выражения дисперсии реактивности при экспоненциальном и дискретном представлении переходной характеристики запаздывающих нейтронов. Вычислены коэффициенты усиления дисперсии для ряда известных систем констант запаздывающих нейтронов. Реализация дисперсионного уравнения в составе реактиметра дает возможность отображать неопределенность оценки реактивности в реальном времени. Указан ряд задач и направлений дальнейших исследований и разработок.

Ключевые слова: реактиметр, метрология, дисперсионное уравнение, контроль и управление ЯЭУ.

ВВЕДЕНИЕ

Метрологическое сопровождение измерений реактивности является важным аспектом обеспечения ядерной безопасности при эксплуатации ЯЭУ. Существует ряд отечественных и международных стандартов, формулирующих требования к измерительным каналам и датчикам нейтронного потока [1 – 5]. Разработаны стандартизованные методики расчета метрологических характеристик измерительных каналов и соответствующие отраслевые руководящие документы [6 – 11].

Анализ погрешностей оценки реактивности проводился с различных точек зрения в ряде работ. (Библиографическая база данных, охватывающая отечественные и зарубежные публикации по данной тематике за период с 1954 г. по настоящее время, описана в работе [12] и размещена в интернете). Для согласования с требованиями современной метрологии целесообразно проводить такой анализ на основе стандартных метрологических моделей, используемых для нормирования метрологических характеристик [13].

Одной из основных метрологических моделей является линейное уравнение свертки для описания звеньев измерительного канала. На основании этого уравнения

© А.Г. Юферов, 2016

строится теория динамических измерений [14, 15], типичным примером которых является измерение реактивности. Уравнение реактиметра в форме интеграла свертки предложено в работе [16]. Такой интеграл всегда неявно присутствует при записи и дискретизации обращенного уравнения кинетики, но его непосредственное рассмотрение позволяет привлечь для оценки погрешности реактивности известные соотношения, связывающие дисперсии входного и выходного сигналов измерительного преобразователя. Аппаратно-программная реализация дисперсионного уравнения в составе реактиметра дает возможность отображать неопределенность оценки реактивности в реальном времени. В данной работе дисперсионное уравнение выводится для аналоговой и дискретной моделей реактиметра при наличии аддитивных шумов входного сигнала.

СТАНДАРТИЗАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕАКТИМЕТРА

Традиционная форма уравнения реактиметра имеет достаточно сложную структуру и включает в себя большое число параметров, что затрудняет ее метрологический анализ. Например, в работе [17] использовалась следующая запись уравнения реактиметра (здесь и далее все обозначения стандартные):

$$\rho(t_j) = 1 + \frac{1}{v(t_j)} \left(\frac{l}{k\beta} \frac{v(t_j) - v(t_{j-1})}{\Delta t} - \sum_{i=1}^6 C_{ij}^* - S^* \right),$$

$$C_{ij}^* = C_{i,j-1}^* \exp(-\lambda_i \Delta t) + \frac{\beta_i \lambda_i}{\beta} \int_{t_{j-1}}^{t_j} v(\tau) \exp(-\lambda_i(t_j - \tau)) d\tau, \quad C_{i0}^* = v(t_0) \beta_i / \beta.$$

При этом «для упрощения вычислений» коэффициент размножения $k = 1/(1-\rho)$ был принят равным единице, что, очевидно, противоречит смыслу измерения реактивности ρ , приводит к искажению ее оценки и соответствующих метрологических показателей.

С целью упрощения структуры уравнения реактиметра в работе [16] предложено использовать интегральное уравнение кинетики ядерного реактора, записанное для скорости изменения мощности:

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

где $n(t)$ – текущая мощность; $v(t)$ – скорость изменения мощности; $Q(t)$ – интенсивность независимого источника. Реактивность в Λ -шкале $r = \rho/\Lambda$ интерпретируется очевидным образом как вероятность репродукции мгновенных нейтронов, равная разности вероятности генерации и вероятности выживания нейтронов: $r = 1/\Lambda - 1/l$, где Λ – время генерации, l – время жизни мгновенных нейтронов. Это определение полностью соответствует традиционному пониманию реактивности как меры отклонения ядерного реактора от критического состояния, отличаясь только нормировкой:

$$\rho = (k - 1)/k = 1 - \Lambda/l = \Lambda r.$$

Такая нормировка приводит размерность реактивности к обратным единицам времени, позволяя трактовать реактивность в Λ -шкале как относительную скорость процессов на мгновенных нейтронах $r(t) \equiv v_{\text{мн}}(t)/n(t)$ и обеспечивая ее непосредственную сопоставимость с обратным периодом $\alpha(t) = v(t)/n(t)$, имеющим смысл относительной скорости изменения мощности реактора за счет всех процессов.

Уравнение (1) унифицирует прямую и обратную задачи кинетики ядерного реактора, сводя и оценку мощности (прямая задача), и оценку реактивности (обратная

задача) к вычислению интеграла запаздывающих нейтронов (ИЗН)

$$I_{\text{ЗН}}(t) = \int_0^t h(t - \tau)v(\tau)d\tau,$$

выражающего текущую скорость прибыли (убыли) запаздывающих нейтронов. Теоретическая форма ядра ИЗН выражается через константы запаздывающих нейтронов:

$$h(t) = \sum \delta_i \exp(-\lambda_i t), \quad \delta_i = \beta_i/\Lambda. \quad (2)$$

Эта функция есть переходная характеристика, описывающая процесс генерации запаздывающих нейтронов после ступенчатого скачка мощности, и может рассматриваться как аппаратная функция линейного звена реактиметра – блока ИЗН. В общем случае экспоненциальная форма (2) не является обязательной. И в расчетах, и в аппаратной реализации пригодна любая подходящая аппроксимация, например, ряд дискретных отсчетов, полученных из теоретического выражения (2) или в процессе идентификации переходной характеристики [16, 18]. В последнем случае снимается нетривиальная проблема восстановления параметров теоретического экспоненциального представления (2), т.е. констант запаздывающих нейтронов.

Для целей метрологического анализа структуру уравнения (1) можно упростить далее, представив его в форме уравнения свертки как модель линейного функционального преобразователя с входным воздействием $v(t)$ и откликом $f(t) = r(t)n(t) + Q(t)$:

$$f(t) = \int_0^t [\delta(t - \tau) + h(t - \tau)]v(\tau)d\tau. \quad (3)$$

Уравнения (1) и (3) содержат единственный «параметр», определяющий метрологические свойства реактиметра, – ядро интеграла запаздывающих нейтронов и обеспечивают простой расчет всех метрологических характеристик, предусматриваемых современными стандартами.

В форме (1) или (3) основным узлом реактиметра (который традиционно рассматривался как нелинейный функциональный преобразователь) оказывается блок линейной свертки для вычисления интеграла запаздывающих нейтронов. Кроме того, уравнения (1) и (3) дают ряд других преимуществ в плане адекватности численного моделирования, аппаратной реализации и постановки реактивных экспериментов, автоматически гарантируя важное требование метрологического обеспечения эксплуатации ЯЭУ – сопоставимость «измеренной и рассчитанной» реактивности [11], в частности,

- при моделировании реактивных эффектов обеспечивается согласованность расчетных и экспериментальных результатов на основе унификации прямой и обратной задач кинетики ядерного реактора; измерения, и расчеты сводятся к вычислению интеграла запаздывающих нейтронов (аналогичная вычислительная схема применима и при учете нескольких делящихся нуклидов, и в распределенных моделях динамики ЯР).

- физически не наблюдаемые процессы на запаздывающих нейтронах (т.е. изменения концентраций предшественников запаздывающих нейтронов) исключаются из рассмотрения, что снимает задачу их метрологического анализа;

- для интегральных уравнений кинетики ядерного реактора не существует проблемы жесткости, требующей специальных методов при численной реализации соответствующих дифференциальных уравнений;

- реактивность в момент выхода из стационарного режима не зависит от каких-либо параметров и определяется только измеряемыми величинами: $r(0) = v(0)/n(0)$;

– исключается необходимость линеаризации уравнения кинетики, что обычно постулируется как обязательная операция при анализе задач с переменной реактивностью; исчезает и соответствующий источник погрешности;

– появляется возможность оперативной адаптации реактиметра к текущим условиям конкретного реактора путем идентификации переходной характеристики запаздывающих нейтронов в эксплуатационных режимах реактора [16, 18].

В терминологии ГОСТ 8.009-84 аппаратная функция $h(t)$ является «полной динамической характеристикой средства измерения». Однако метрологические стандарты рассматривают динамические измерения только с точки зрения инерционности измерительных средств, которые в идеальном случае должны иметь в качестве аппаратной функции дельта-функцию, чтобы без искажения давать на выходе мгновенное значение входной измеряемой величины с некоторым статическим коэффициентом преобразования. На основе сравнения реальной и идеальной аппаратных функций и строятся расчеты погрешности динамического измерения, рассматриваемого как процедура определения истинного значения измеряемой (входной) величины по известному выходному сигналу и известной переходной характеристике [13]. Однако применительно к уравнению реактиметра необходимо специальное рассмотрение, поскольку результат измерения (текущее значение реактивности) есть функционал предшествующей истории изменения мощности реактора (память переходной характеристики $h(t)$ составляет порядка 300 секунд), и стандартный алгоритм оценки динамической погрешности [13] как разности входной и выходной величин не пригоден. В данном случае динамическую погрешность следует описывать дисперсионным уравнением, связывающим дисперсию реактивности с дисперсией аддитивного шума на входе в реактиметр или, другими словами, задающим баланс дисперсий слагаемых уравнения реактиметра (3), например, в следующей форме, не учитывающей корреляцию переменных, фигурирующих в уравнении (3):

$$r^2 D_n + n^2 D_r + D_n D_r + D_Q = D_v + D_{\text{изн}}. \quad (4)$$

Левая часть уравнения (4) есть теоретическое выражение дисперсии выходного сигнала в форме $f(t) = r(t)n(t) + Q(t)$, правая часть – дисперсия этого сигнала согласно структуре линейного блока реактиметра, т.е. интеграла в уравнении (3).

Уравнение (4) позволяет выразить дисперсию любой фигурирующей здесь переменной как результата косвенного измерения по формуле, получаемой для этой переменной из уравнения (3), если принять соглашение о сохранении положительности слагаемых уравнения (4) при переносе их из одной части уравнения в другую. В частности, при стандартных упрощениях $Q(t) = 0$, $v/n \approx 0$, $D_n D_r \approx 0$ уравнение (4) дает следующее выражение дисперсии реактивности:

$$D_r \approx (D_{\text{изн}} + r^2 D_n) / n^2 = D_{\text{изн}} / n^2 + D_n (I_{\text{изн}}^2 / n^4). \quad (5)$$

Далее в этом выражении необходимо конкретизировать алгоритм оценки дисперсии $D_{\text{изн}}$ выходного сигнала блока ИЗН.

ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛОГОВОЙ МОДЕЛИ РЕАКТИМЕТРА

К линейному функциональному преобразователю, моделируемому уравнением (3), применимы стандартные процедуры корреляционного анализа [19]. В данном случае корреляционная функция выходного сигнала имеет вид

$$R_f(t, t_1) = \int_0^t \int_0^{t_1} [\delta(\eta) + h(\eta)] [\delta(\lambda) + h(\lambda)] R_v(t - \eta, t_1 - \lambda) d\eta d\lambda,$$

где R_v – корреляционная функция централизованного входного сигнала. Соответственно, дисперсия выходного сигнала

$$D_f(t) = R_f(t, t) = \int_0^t \int_0^t h(\eta)h(\lambda)R_v(t - \eta, t - \lambda)d\lambda d\eta + 2 \int_0^t h(\lambda)R_v(t, t - \lambda)d\lambda + D_v(t), \quad (6)$$

где $D_v(t)$ – дисперсия входного сигнала. Именно формула (6) должна быть реализована в общем случае аппаратно или программно для оценки неопределенности реактивности в реальном времени. Это потребует усложнения оборудования, но повысит адекватность измерения реактивности.

Формула (6) упрощается в предположении стационарности и белизны входного шума. Стационарность входного шума реактиметра при изменении мощности реактора требует дополнительного обоснования, но если это имеет место, то возможность рассматривать входной шум как белый автоматически обеспечивается его физически обусловленным импульсным характером и тем, что блок ИЗН является инфранизкочастотным фильтром. Последний факт иллюстрируется рис. 1, где изображены амплитудно-частотные характеристики блока ИЗН, вычисленные для некоторых нуклидов с константами Кипина. Отметим практическое совпадение частотных характеристик, соответствующих делению тепловыми (t) и быстрыми нейтронами (f).

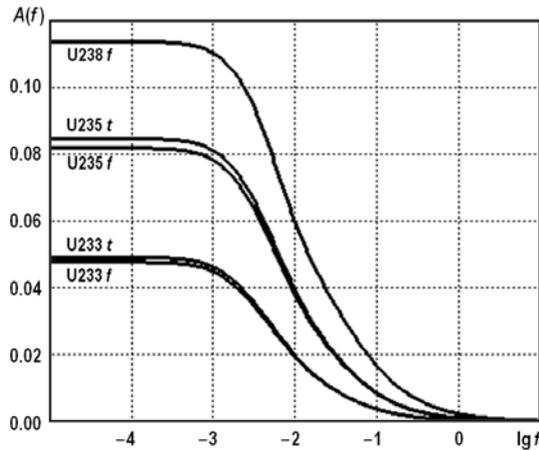


Рис.1. Амплитудно-частотные характеристики блока ИЗН

При стационарном входном шуме реактиметра дисперсия на выходе линейного блока

$$D_f(t) = \int_0^t \int_0^t h(\tau)h(\eta)R_v(\eta - \tau)d\eta d\tau + 2 \int_0^t h(\eta)R_v(\eta)d\eta + D_v.$$

Наконец, если входной шум белый, т.е. $R_v(t) = S_v \delta(t)$, $D_v = S_v \delta(0)$, то

$$D_f(t) = S_v K(t), \quad K(t) = \int_0^t h^2(\tau)d\tau + 2h(0) + \delta(0), \quad (7)$$

где функцию $K(t)$ уместно назвать *динамическим коэффициентом усиления дисперсии*.

Первое слагаемое коэффициента усиления определяет дисперсию выходного сигнала блока ИЗН

$$D_{\text{изн}}(t) = S_v \int_0^t h^2(\tau) d\tau.$$

В случае экспоненциального представления переходной характеристики (2) при учете I групп запаздывающих нейтронов подынтегральная функция

$$h^2(\tau) = \left(\frac{\beta_{\text{эф}}}{\Lambda} \right)^2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I a_i a_k \exp(-(\lambda_i + \lambda_k)\tau).$$

Следовательно, дисперсия выходного сигнала блока ИЗН

$$D_{\text{изн}}(t) = S_v \left(\frac{\beta_{\text{эф}}}{\Lambda} \right)^2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I \frac{a_i a_k}{\lambda_i + \lambda_k} (1 - \exp(-(\lambda_i + \lambda_k)t)),$$

и в установившемся режиме

$$D_{\text{изн}} = S_v \left(\frac{\beta_{\text{эф}}}{\Lambda} \right)^2 K_h, \quad K_h = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I \frac{a_i a_k}{\lambda_i + \lambda_k}.$$

Коэффициент K_h зависит только от констант запаздывающих нейтронов и определяет усиление дисперсии блоком ИЗН с аппаратной функцией $h(t)$, т.е. когда входным сигналом является скорость изменения мощности.

Принимая во внимание характерные значения вероятности генерации запаздывающих нейтронов $h(0) = \beta_{\text{эф}}/\Lambda$, можно утверждать, что, как правило, слагаемым $2h(0)$ в выражении (7) для коэффициента усиления дисперсии можно пренебречь. С несколько иной точки зрения эта возможность обеспечена типичным балансом скоростей в уравнении (1), что позволяет привести уравнение реактиметра к виду

$$r(t)n(t) = \int_0^t h(t - \tau)v(\tau)d\tau. \quad (8)$$

Применимость соотношения (8) практически во всех эксплуатационных режимах иллюстрируется рис. 2, где показано поведение слагаемых уравнения (1) после скачков реактивности величиной в 10 и 50 центов в первоначально стационарном реакторе.

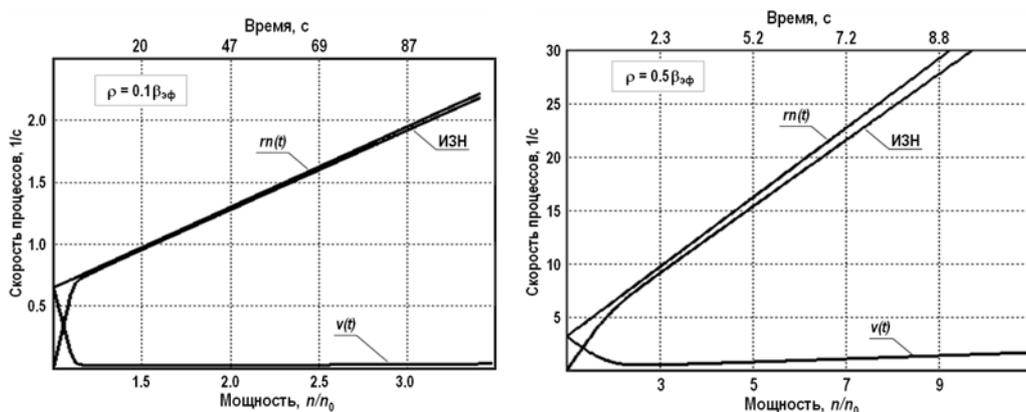


Рис. 2. Поведение слагаемых уравнения кинетики после ввода ступеньки реактивности

Таким образом, метрологический анализ уравнения реактиметра сводится к рассмотрению интеграла запаздывающих нейтронов и дисперсионного уравнения (5)

в форме

$$D_r = (S_v(\beta_{эф}/\Lambda)^2 K_h + r^2 D_n)/n^2. \quad (9)$$

Для перехода в уравнении реактиметра (8) к шкале реактивности r в единицах $\beta_{эф}$ разделим левую и правую части уравнения на $\beta_{эф}/\Lambda$. Тогда уравнение (9) принимает вид $D_p = (S_v K_h + \rho^2 D_n)/n^2$. Для определенности укажем, что здесь размерность частотной плотности белого шума $[S_v] = c^{-1}$, а размерность коэффициента усиления дисперсии $[K_h] = c$.

Частотную плотность белого шума S_v из уравнения (9) целесообразно исключить. Для этого запишем уравнение (8) в эквивалентном виде (для реактивности r в единицах $\beta_{эф}$):

$$\rho(t)n(t) = n(t) - (h(t)/h(0))n_0 - \int_0^t g(t-\tau)n(\tau)d\tau, \quad (10)$$

где в качестве входного сигнала блока ИЗН фигурирует мощность, и аппаратная функция равна

$$g(t-\tau) = (dh(t-\tau)/d\tau)/h(0) = \sum a_j \lambda_j \exp(-\lambda_j(t-\tau)).$$

Формула для дисперсии реактивности, следующая из уравнения (10), аналогична формуле (9), но необходимо конкретизировать выражение дисперсии интеграла в уравнении (10). Так, если корреляционная функция шума мощности имеет экспоненциальный характер $R_n(t) = D_n \exp(-\gamma|t|)$, то корреляционная функция сигнала на выходе блока, реализующего интеграл в уравнении (10), равна

$$R_g(t, t_1) = \int_0^t \int_0^{t_1} g(t-\tau)g(t_1-\eta)R_n(\eta-\tau)d\eta d\tau = D_n \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I a_i a_k \lambda_i \lambda_k B(t, t_1),$$

где

$$B(t, t_1) = \int_0^t \int_0^{t_1} \exp(-\lambda_i \eta - \lambda_k \tau - \gamma|t-t_1+\tau-\eta|)d\eta d\tau.$$

Выражение для дисперсии $D_g = R_g(t, t_1)$ получается, если взять

$$B(t, t_1) = B(t) = \int_0^t \int_0^t \exp(-\lambda_i \eta - \lambda_k \tau - \gamma|\tau-\eta|)d\eta d\tau.$$

Порядок преодоления известных [20] трудностей вычисления рассматриваемых интегралов, содержащих разрывные функции, описан в [21, 22].

В случае белого входного шума функция $B(t) = (1 - \exp(-(\lambda_i + \lambda_k)t))/(\lambda_i + \lambda_k)$, так что в установившемся режиме уравнение (9) для дисперсии реактивности в единицах $\beta_{эф}$ принимает вид

$$D_p = (S_n K_g + \rho^2 D_n)/n^2 = (K_g/F + \rho^2)D_n/n^2,$$

где S_n, F – частотные плотность и ширина белого шума. Коэффициент

$$K_g = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I \frac{\lambda_i \lambda_k a_i a_k}{\lambda_i + \lambda_k}$$

определяет усиление дисперсии блоком ИЗН с аппаратной функцией $g(t)$. Время спада последней примерно в три раза короче, чем функции $h(t)$, что приводит к уменьшению коэффициента K_g . Значения коэффициентов K_h, K_g приведены в табл. 1 для ряда нуклидов с константами запаздывающих нейтронов из сис-

тем БНАБ-93 и ENDF/B-VII.

Таблица 1

	БНАБ-93		ENDF/B-VII	
	K_h	K_g	K_h	K_g
^{241}Am	3.64	0.10	3.64	0.10
^{239}Pu	4.01	0.09	4.05	0.09
^{240}Pu	3.62	0.11	3.48	0.11
^{241}Pu	2.82	0.14	2.88	0.13
^{235}U	3.33	0.11	2.67	0.14
^{238}U	1.76	0.21	1.67	0.22

Как видим, коэффициенты усиления дисперсии блоком ИЗН существенно меньше при использовании мощности в качестве входного сигнала.

ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ РЕАКТИМЕТРА

После дискретизации уравнение (3) принимает следующую форму:

$$f_k = \sum_{l=0}^L b_l v_{k-l}, \quad b_0 = 1 + a_0 h_0, \quad b_l = a_l h_l, \quad l = \overline{1, L},$$

где a_l – коэффициенты квадратурной формулы, используемой для аппроксимации интеграла запаздывающих нейтронов. Выражение для дисперсии выходного сигнала получается обычным образом:

$$D_f = D_v \sum_{l=0}^L b_l^2.$$

Это выражение аналогично дисперсионному уравнению (7) для аналоговой модели реактиметра.

Выбором коэффициентов a_l можно распорядиться для минимизации дисперсии. Так, если используется метод прямоугольников, то $a_l = T$, где T – шаг дискретизации. В методе трапеций $a_0 = a_L = T/2$, $a_l = T$, $l = 1, \dots, L-1$; в методе Симпсона $a_0 = a_L = T/3$, $a_{2l-1} = 4T/3$, $a_{2l} = 2T/3$ и т.д. В таком виде квадратурные коэффициенты используются, когда блок ИЗН реализуется как нерекурсивный цифровой фильтр [16], содержащий все ненулевые отсчеты переходной характеристики. При традиционной дискретизации обращенного уравнения кинетики практически всегда применяют линейную аппроксимацию на шаге (см., например, [23]). В общем случае применимы любые алгоритмы вычисления свертки [24], обеспечивающие требуемые точность, простоту аппаратной реализации и минимизацию времени вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты.

1. Предложена метрологическая модель реактиметра в форме уравнения свертки и соответствующего дисперсионного уравнения.
2. Показано, что для типичной амплитудно-частотной характеристики линейного звена реактиметра (для известных систем констант запаздывающих нейтронов) входной аддитивный шум может считаться белым.
3. Для случая белого входного шума найдены аналитические выражения диспер-

сии реактивности.

4. Для ряда нуклидов с константами запаздывающих нейтронов из систем БНАБ-93 и ENDF/B-VII вычислены коэффициенты усиления дисперсии линейным блоком реактиметра для случаев, когда входным сигналом является или мощность, или скорость изменения мощности. Установлено, что усиление дисперсии минимизируется при использовании мощности в качестве входного сигнала.

В качестве возможных направлений применения и обобщения полученных результатов укажем следующее:

- анализ погрешности оценки реактивности для различных схемных решений реактиметра с учетом применяемой номенклатуры электронных компонентов;
- рассмотрение нестационарного шума и коррелированных величин;
- описание точности измерения реактивности в терминах неопределенности [25, 26];
- учет параметрической погрешности, обусловленной константами запаздывающих нейтронов, в том числе энергетической зависимостью констант;
- анализ различных квадратурных формул применительно к вычислению интеграла запаздывающих нейтронов.

Литература

1. ГОСТ Р 8.565-2014. ГСИ. Метрологическое обеспечение эксплуатации атомных станций. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2015. – 19 с.
2. ГОСТ Р МЭК 62385. Атомные станции – системы контроля и управления, важные для безопасности – методы оценки рабочих характеристик измерительных каналов систем безопасности. – М.: Стандартинформ, 2011. – 63 с.
3. ГОСТ 27445-87. Системы контроля нейтронного потока для управления и защиты ядерных реакторов. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2011. – 18 с.
4. IEC 60231. General principles of nuclear reactor instrumentation.
5. IEC 60568. Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – In-core instrumentation for neutron fluence rate (flux) measurements in power reactors.
6. МИ 222-80. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 24 с.
7. МИ 2440-97. ГСИ. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов, измерительных систем и измерительных комплексов. – М.: ВНИИМС, 1999. – 13 с.
8. МИ 2232-2000. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации. – М.: ВНИИМС, 2000. – 10 с.
9. РД ЭО 0150-2004. Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. – М.: Росэнергоатом, 2005.
10. РД ЭО 0151-2004. Методики расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках АЭС с реакторами ВВЭР-1000. – М.: Росэнергоатом, 2005.
11. Рекомендации по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных установок типа ВВЭР. – М.: НТЦ ЯРБ, 2010. – 21 с.
12. Юферов А.Г. Библиография по разработкам реактиметров и методам измерения реактивности в ФЭИ. Обзор ФЭИ-295. – М.: ЦНИИАтоминформ, 2003. – 39 с.
13. Земельман М.А., Тронова И.М. Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» // Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – С. 43-132.
14. Вашины Е. Динамика измерительных цепей. – М.: Энергия, 1969. – 288 с.

15. Грановский В.А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
16. Юферов А.Г., Ибрагимов Р.Л. Реактиметр как адаптивный цифровой фильтр. // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – Вып. 4. – С. 253-260.
17. Борисов В.Ф., Комшилов О.А. Анализ погрешностей измерителя реактивности. // Измерительная техника. – 2002. – №10. – С. 49-52.
18. Юферов А.Г. К задаче идентификации интегральных уравнений кинетики. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 4. – С. 25-34.
19. Uhrig R.E. Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems. Ronald Press, N.Y. – 1970. – 490 p.
20. Cooper G.R., McGillem C. D. Probabilistic Methods of Signal and System Analysis. Oxford University Press. – 1998. – 491 p.
21. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Примеры и задачи по статистической радиотехнике. – М.: Советское радио, 1970. – 600 с.
22. Астапов Ю.М., Медведев В.С. Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
23. Боев И.А., Колотушкин Д.С. Развитие методик измерения реактивности и нейтронно-физических характеристик реакторов ВВЭР на Нововоронежской АЭС. Сборник трудов МНТК-99 «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, 2015. Доступно на сайте <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/index-ru.htm>
24. Otnes R. K., Enochson L. Applied Time Series Analysis. Basic Techniques. Wiley, 1978, – 449 p.
25. ISO/IEC Guide 98:1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – 105 p.
26. Guide to the Expression of Uncertainties for the Evaluation of Critical Experiments. Idaho National Laboratory, 2007. – 94 p.

Поступила в редакцию 29.06.2016 г.

Автор

Юферов Анатолий Геннадьевич, заведующий лабораторией, канд. физ.-мат. наук
E-mail: anatoliy.yuferov@mail.ru

UDC 620.039.516.2:620.039.515

DISPERSION EQUATION FOR THE REACTIVITY METER

Yuferov A.G.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering,
National Research Nuclear University «MEPhI»
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 240040 Russia

ABSTRACT

The aim of this work is the output and analysis of the metrological model of the reactivity meter in the form of the dispersion equation, connecting the dispersion of input and output signals of the reactivity meter with imposing random noise on the input. Hardware-software implementation of the dispersion equation in the composition of the reactivity meter gives the opportunity to display the uncertainty evaluation of reactivity in real time. It is proposed to standardize the form of the equation for the reactivity meter, presenting the main computing unit of the reactivity meter as equation convolution. Thus metrological characteristics of the reactivity meter is completely determined by the hardware function of this unit. The hardware function is the transitive characteristic that describe the processes on delayed neutrons after the jump in power. It is shown that the frequency response of the linear unit of the reactivity meter allows

us to consider additive input noise as white. Is established the practical coincidence of frequency characteristics corresponding to the fission by the thermal and fast neutrons. For the case of white noise at the input was obtained the expressions of the variance of reactivity with exponential and discrete representation of the transient response of delayed neutrons. Was calculated coefficients of the dispersion strengthening for a number of known systems of the constants of delayed neutrons when the input signal is either a power or speed. It is found that the dispersion strengthening is minimized by using the power as the input. Is specified the problems and directions for further research and development, concerning, in particular, the analysis of the reactivity of error estimates for the various circuit design of the reactimeter taking into account the range of applied electronic components.

Key words: reactivity meter, metrology, dispersion equation, control and management of nuclear facilities

REFERENCES

1. GOST R 8.565-2014. GSI. Metrologicheskoe obespechenie ekspluatatsii atomnykh stanciy. Osnovnye polozheniya [Metrological maintenance of operating nuclear power plants. The main provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 19 p. (in Russian).
2. GOST R MEK 62385. Atomnye stancii – sistemy kontrolya i upravleniya, vazhnye dlya bezopasnosti - metody ocenki rabochikh kharakteristik izmeritelnykh kanalov sistem bezopasnosti [Nuclear power plants - Instrumentation and control important to safety - Methods for assessing the performance of safety system instrument channels]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 63 p. (in Russian).
3. GOST 27445-87. Sistemy kontrolya neytronnogo potoka dlya upravleniya i zashchity yader-nykh reaktorov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Neutron flux monitoring systems for control and protection of nuclear reactors. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 18 p. (in Russian).
4. IEC 60231. General principles of nuclear reactor instrumentation.
5. IEC 60568. Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – In-core instrumentation for neutron fluence rate (flux) measurements in power reactors.
6. MI 222-80. Metodika rascheta metrologicheskikh kharakteristik izmeritelnykh kanalov informacionno-izmeritelnykh sistem po metrologicheskim kharakteristikam komponentov [Method of calculation of metrological characteristics of measuring channels of information-measuring systems metrological characteristics of components]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1981. 24 p. (in Russian).
7. MI 2440-97. GSI. Metody eksperimental'nogo opredeleniya i kontrolya kharakteristik pogreshnosti izmeritelnykh kanalov, izmeritelnykh sistem i izmeritelnykh kompleksov [Methods of experimental determination and control characteristics of the error of measurement channels, measuring systems and measuring systems]. Moscow. VNIIMS Publ., 1999. 13 p. (in Russian).
8. MI 2232-2000. GSI. Obespechenie effektivnosti izmereniy pri upravlenii tekhnologicheskimi processami. Ocenivanie pogreshnosti izmereniy pri ogranichennoy iskhodnoy informacii [Providing measurement of efficiency in the management of technological processes. Evaluation of measurement uncertainty with limited initial information]. Moscow. VNIIMS Publ., 2000. 10 p. (in Russian).
9. RD EO 0150-2004. Tipovye programmy i metodiki provedeniya fizicheskikh eksperimentov na energoblokakh atomnykh elektrostanciy s reaktorami VVER-1000 [Programs and methods of physical experiments on nuclear power units with VVER-1000 reactors]. Moscow. Rosenergoatom Publ., 2005 (in Russian).
10. RD EO 0151-2004. Metodiki rascheta neytronno-fizicheskikh kharakteristik po dannym fizicheskikh eksperimentov na energoblokakh AES s reaktorami VVER-1000 [Method of calculation of neutron-physical characteristics according to physical experiments on nuclear power units with VVER-1000 reactors]. Moscow. Rosenergoatom Publ., 2005 (in Russian).
11. Rekomendacii po sopostavleniyu rasschitannoy i izmerennoy reaktivnosti pri obosnovanii yadernoy bezopasnosti reaktornykh ustanovok tipa VVER [Recommendations for comparing the calculated and measured reactivity on basing nuclear safety of reactor VVER-

- type plants]. Moscow. NTC YaRB Publ., 2010. 21 p. (in Russian).
12. Yuferov A.G. Bibliografiya po razrabotkam reaktivmetrov i metodam izmereniya reaktivnosti v FEI [Bibliography on development of the reactivity meters and methods of the reactivity measurements in IPPE]. Obzor FEI-295. Moscow. CNIIAtominform Publ., 2003. 39 p. (in Russian).
13. Zemelman M.A., Tronova I.M. Metodicheskiy material po primeneniyu GOST 8.009-84 «GSI. Normiruemye metrologicheskie kharakteristiki sredstv izmereniy». Normirovanie i ispol'zovanie metrologicheskikh kharakteristik sredstv izmereniy [Methodological material for use GOST 8.009-84 «GSI. Standardized metrological characteristics of measuring instruments». Standardization and use of metrological characteristics of measuring instruments]. Moscow. Izdatel'stvo standartov Publ., 1985, pp. 43-132 (in Russian).
14. Vashny E. Dinamika izmeritelnykh cepej [Dynamics of measuring circuits]. Moscow. Energiya Publ., 1969. 288 p. (in Russian).
15. Granovskiy V.A. Dinamicheskie izmereniya. Osnovy metrologicheskogo obespecheniya [Dynamic measurements. Fundamentals of metrology software]. Leningrad. Energoatomizdat Publ., 1984. 224 p. (in Russian).
16. Yuferov A.G., Ibragimov R.L. Reaktivmetr kak adaptivnyy cifrovoy filtr [Reactivimeter as an adaptive digital filter]. *Atomnaya energiya*, 2005, v. 98, iss. 4, pp. 253-260 (in Russian).
17. Borisov V.F., Komshilov O.A. Analiz pogreshnostey izmeritelya reaktivnosti [Analysis of reactivity meter errors]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2002, no. 10, pp. 49-52 (in Russian).
18. Yuferov A.G. K zadache identifikatsii integralnykh uravneniy kinetiki [On the problem of identification of integral equations of the kinetics]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2005, no. 4, pp. 25-34 (in Russian).
19. Uhrig R.E. Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems. Ronald Press, N.Y., 1970. 490 p.
20. Cooper G.R., McGillem C. D. Probabilistic Methods of Signal and System Analysis. Oxford University Press, 1998. 491 p.
21. Goryainov V.T., Zhuravlev A.G., Tikhonov V.I. Primery i zadachi po statisticheskoy radio-tekhnike [Examples and problems in statistical radio engineering]. Moscow. Sovetskoe radio Publ., 1970. 600 p. (in Russian).
22. Astapov Yu.M., Medvedev V.S. Statisticheskaya teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya [Statistical theory of automatic regulation and control systems]. Moscow. Nauka Publ., 1982. 304 p. (in Russian).
23. Boev I.A., Kolotushkin D.S. Razvitie metodik izmereniya reaktivnosti i neytronno-fizicheskikh kharakteristik reaktorov VVER na Novovoronezhskoy AES [The development of methods of measurement of reactivity and neutron-physical characteristics of VVER Novovoronezh nuclear power plant]. Sbornik trudov MNTK-99 «Obespechenie bezopasnosti AESs VVER». OKB «GIDROPRESS», Podol'sk, 2015. Available at <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/index-ru.htm> (in Russian).
24. Otnes R.K., Enochson L. Applied Time Series Analysis. Basic Techniques. Wiley, 1978. 449 p.
25. ISO/IEC Guide 98:1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 105 p.
26. Guide to the Expression of Uncertainties for the Evaluation of Critical Experiments. Idaho National Laboratory, 2007. 94 p.

Author

Yuferov Anatoliy Gennad'yevich, Head of Laboratory, Cand.Sci. (Phys.-Math.)
E-mail: anatoliy.yuferov@mail.ru