

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-07>

EDN SSEKBU

Оригинальная статья / Original paper



Диагностика состояний активной зоны ВВЭР-1000 по реактивностным возмущениям

В.Я. Шпицер  , В.В. Кривин  

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Российская Федерация

 shpitser@mail.ru

Аннотация. В основе самоподдерживающейся цепной реакции деления ядер лежит вероятностная природа фундаментальных физических процессов. Мерой динамики этих процессов (идентификатором состояния) принято считать реактивность как особенное физическое свойство среды или технической системы. В статье предлагается отнести реактивность к классу случайных функций с нулевым математическим ожиданием в стационарном критическом состоянии. Флуктуации относительно нулевого значения воспринимаем как результат воздействия внешних факторов, вызывающих мгновенный отклик активной зоны (АЗ) реакторных установок (РУ), работающих на установленной мощности основную часть эксплуатационного времени. Этого определения достаточно, чтобы развить методы технической диагностики по возмущениям реактивности АЗ. Активную зону реактора рассматриваем как стохастический объект, который удерживается в нормативном поле своих конструктивных и режимных характеристик. По архивным данным «измерений» реактивности определенным состояниям АЗ можно соотнести фрагменты стохастического временного ряда, которые служили бы идентификаторами этих состояний. Набор таких фрагментов (тестов) составляет библиотеку опыта эксплуатации АЭС. В настоящей работе рассматриваются эффекты внешнего пуассоновского возмущения реактивности и классификация возникающих при этом модуляций нейтронной плотности в рамках модели одногрупповой кинетики. Отражение в вероятностных характеристиках нейтронной плотности случайных статических и динамических режимных факторов через реактивность воспринимаем как свидетельство генерации дефектности активных зон РУ. Детерминированная составляющая нейтронной плотности достаточно точно описывается уравнениями кинетики и соответствует тренду математического ожидания реактивности относительно нулевого значения. Предлагается процедура обработки данных аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) и системы внутриреакторного контроля (СВРК) включающая: формирование библиотеки тестов-возмущений на основе архивных данных; анализ откликов по критерию согласия Колмогорова–Смирнова между эмпирическими функциями распределения текущей выборки эмпирических данных и вычисляемой по уравнениям кинетики на основе библиотеки возмущений. Утверждается, что предлагаемая процедура является средством идентификации уровня дефектности активной зоны РУ, а также может использоваться в качестве имитатора событий при глубоком обучении классифицирующей нейронной сети. Результаты относятся к достижениям нейтронно-шумовой диагностики.

Ключевые слова: кинетика, реактивность, пуассоновский поток, сигнатура, шумовая диагностика, дефектность, деградация.

Для цитирования: Шпицер В.Я., Кривин В.В. Диагностика состояний активной зоны ВВЭР-1000 по реактивностным возмущениям. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):71–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-07>

For citation: Shpitser V.Y., Krivin V.V. Diagnostics of VVER-1000 core states by reactivity perturbations. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):71–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-07>

Diagnostics of VVER-1000 core states by reactivity perturbations

Vladimir Y. Spitzer  , Valery V. Krivin 

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
✉ shpitser@mail.ru*

Abstract. The self-sustained nuclear fission chain reaction is based on the probabilistic nature of fundamental physical processes. The measure of the dynamics of these processes (state identifier) is taken to be reactivity as a special physical property of the medium or technical system. The paper proposes to attribute reactivity to the class of random functions with zero mathematical expectation in the stationary critical state. Fluctuations with respect to zero value are perceived as a result of external factors causing an instantaneous response of the core of reactor plants operating at the installed power for the main part of the operating time. This definition is sufficient to develop methods of technical diagnostics based on perturbations of the reactivity of the core. The reactor core is considered as a stochastic object that is kept within the normative field of its design and regime characteristics. According to the archive data of reactivity ‘measurements’, it is possible to correlate to certain states of the reactor core the fragments of stochastic time series, which would serve as identifiers of these states. The set of such fragments (tests) constitutes a library of NPP operation experience. In the present work, the effects of an external Poisson perturbation of reactivity and the classification of neutron density modulations arising therefrom are considered in the framework of the one-group kinetics model. The reflection in the probabilistic characteristics of neutron density of random static and dynamic regime factors through reactivity is perceived as evidence of generation of defectiveness of the reactor core. The deterministic component of neutron density is described quite accurately by the equations of kinetics and corresponds to the trend of the mathematical expectation of reactivity with respect to zero value. A procedure of processing the data of neutron flux control equipment and reactor intrinsic control system is proposed, which includes formation of a library of test perturbations on the basis of archived data; analysis of responses by the Kolmogorov-Smirnov criterion of agreement between the empirical distribution functions of the current sample of empirical data and those calculated by the equations of kinetics on the basis of the library of perturbations. It is argued that the proposed procedure is a means of identifying the defect level of the core and can also be used as an event simulator in deep learning of a classifying neural network. The results refer to the achievements of neutron-noise diagnostics.

Keywords: kinetics, reactivity, Poisson flow, signature, noise diagnostics, defectivity, degradation.

Введение

Любое изменение технологических параметров АЗ влияет на ее реактивность. При этом технологические параметры тесно связаны друг с другом, обуславливая соответствующие эффекты реактивности (температурный, барометрический, гидродинамический, мощностной, связанные с выгоранием топлива и эффектами отравления). Нейтронно-шумовая диагностика АЗ основана на установленной связи изменения физических характеристик и устойчивости критического состояния со стохастической составляющей реактивности [1].

Основным генератором случайных возмущений реактивности являются флуктуации температуры и плотности при турбулентном течении теплоносителя [2,3]. Кроме того, главный циркуляционный насос (ГЦН) РУ выступает как источник гармонических пульсаций давления, влияющих на теплообмен в АЗ [4]. Флуктуации реактивности, являются следствием многочисленных микроскопических событий. Это значит, что вероятностные характеристики макроскопических явлений можно получить, рассматри-

вая совокупность отдельных актов механических и гидродинамических взаимодействий металлоконструкций, теплоносителя и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ).

Достаточно общей моделью последовательностей этих актов является временной ряд независимых элементарных импульсов, имеющих случайные параметры (амплитуду, фазу, длительность) и возникающие в случайные моменты времени. Если частота следования импульсов мала (≤ 10 1/с), то закон распределения вероятности макроскопической величины значительно отличается от нормального [5]. Основная гипотеза этой работы состоит в том, что помеха рассматривается как некоторый естественный тест, поступающий на вход вместе с регулярным сигналом, а диагностика – это классификация откликов нейтронной плотности на эти тесты.

В статье в качестве стохастического возмущения используется неоднородный пуассоновский поток реактивности, который воспринимается как материальный носитель элементарных дефектных состояний. Накоп-

ление дефектности (эволюция АЗ) является причиной деградации [6].

Модель возмущения реактивности

Математической моделью совершенно случайной последовательности событий является пуассоновский процесс. Числовые характеристики пуассоновского процесса известны [7]:

$M_{\xi_p}^{\xi} = \lambda$ – среднее (ξ_p – пуассоновская случайная величина); $D_{\xi_p}^{\xi} = \lambda$ – дисперсия;

$\beta_1 = 1/\sqrt{\lambda}$ – асимметрия; $\beta_2 = 1/\lambda$ – эксцесс.

События отмечаются на оси времени с некоторой частотой наступления, среднее значение которой характеризуется вероятностной интенсивностью потока событий (λ). Интервалы между событиями на оси времени подчиняются экспоненциальному распределению. С ростом (λ) пуассоновское распределение асимптотически нормально. Это позволяет использовать пуассоновские потоки в качестве инструмента аппроксимации эмпирических временных рядов, содержащих аддитивную помеху. В работе используется следующая парадигма:

1. Зададим ансамбль пуассоновского потока флуктуации реактивности в форме матрицы ρ_{ij} .

2. Получим (посредством прямого решения уравнений кинетики) представление плотности нейтронов в форме матрицы n_{ij} .

3. Определим фактические значения параметров пуассоновского потока из условия однородности расчетной матрицы n_{ij} и аналогичной матрицы, составленной по измеряемым данным.

Неоднородный пуассоновский поток событий (выборочных значений) формируется методом прямого статистического моделирования и основывается на алгоритмической формуле (стилистика записи алгоритма соответствует формату Mathcad) (1):

$$\Delta\tau := 0.1 \quad A := \text{rnorm}(300, 0.0000, 0.0011) \\ \lambda := 0.5$$

$$\rho := \begin{cases} \text{for } i \in 0..100 \\ \quad \begin{cases} \text{for } j \in 0..299 \\ \quad \xi \leftarrow \text{rnd}(1) \\ \quad \rho_{i,j} \leftarrow A_j \text{ if } \xi < \lambda\Delta \\ \quad 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ \rho \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – матрица реактивности;

A – мгновенное значение реактивности (случайная величина, распределенная нормально ($0, \sigma = 0.0011$));

i – индекс реализации в статистическом ансамбле;

j – индекс значения во временном ряду;

γ – случайное число равномерно распределенное на интервале ($0, 1$);

$\Delta\tau$ – шаг дискретизации по времени (0.1 с., параметр измерительного комплекса).

Это двухпараметрическая модель эволюции дефектности АЗ по каналам дисперсии мгновенных значений (σ) и частоты следования импульсов реактивности (λ) относительно базового значения равного нулю. Внесение трендов и циклических составляющих в математическое ожидание, дисперсию и интенсивность импульсов возмущений реактивности образует многопараметрическую, достаточно универсальную, платформу моделирования стохастических возмущений АЗ. Преимущество двухпараметрической модели в интерпретируемом физическом содержании параметров.

На рисунке 1 приведены две реализации пуассоновского процесса на интервале наблюдения 30 сек.

Этот рисунок иллюстрирует импульсное возмущение реактивности относительно базового значения равного нулю за счет неядерных внешних факторов, воспринимаемых как дефекты АЗ. Если в качестве исходных данных используются непосредственно показания штатных реактиметров, то индикатором дефектности АЗ может служить, например, коэффициент вариации [$\sigma(\rho)/\text{mean}(\rho)$] в текущей выборке относительно назначенного нормативного коридора.

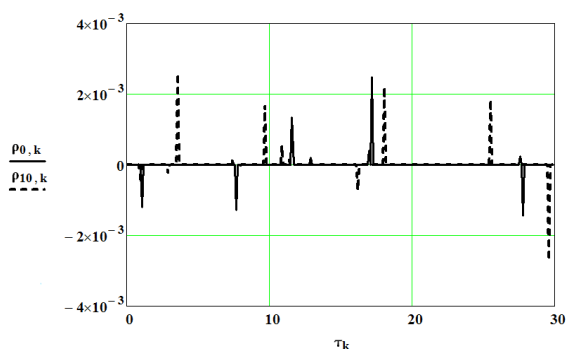


Рисунок 1. Реализации № 0 и № 10 пуассоновского потока ($\sigma = 0.0011$; $\lambda = 0.5$) возмущения реактивности продолжительностью 30 сек.

Figure 1. Realisations of No. 0 and No. 10 Poisson flow ($\sigma = 0.0011$; $\lambda = 0.5$) reactivity perturbations of 30 sek. duration

На рисунках 2, 3 приведены эволюция среднего значения $\text{mean}(\rho)$ и коэффициента вариации $[\sigma(\rho)/\text{mean}(\rho)]$ реактивности для модельного ансамбля из 100 реализаций.

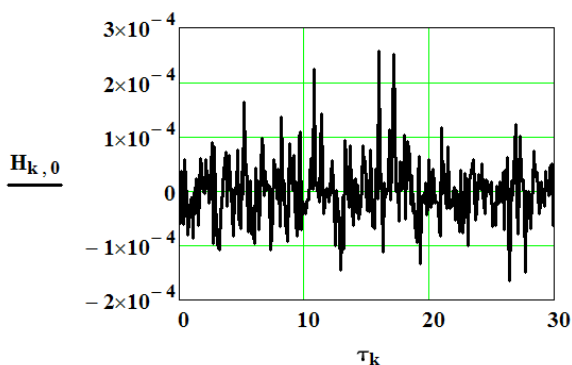


Рисунок 2. Эволюция среднего значения $H_{k,0} = \text{mean}(\rho)$ реактивности по ансамблю 100 реализаций

Figure 2. Evolution of the mean $H_{k,0} = \text{mean}(\rho)$ reactivity over an ensemble of 100 implementations

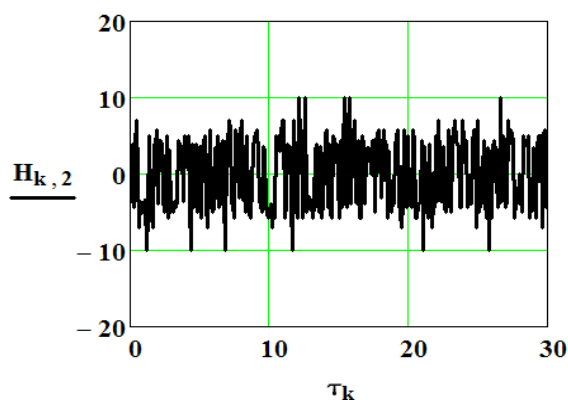


Рисунок 3. Коэффициент вариации $H_{k,2} = [\sigma(\rho)/\text{mean}(\rho)]$ реактивности по ансамблю 100 реализаций

Figure 3. Coefficient of variation $H_{k,2} = [\sigma(\rho)/\text{mean}(\rho)]$ of reactivity over an ensemble of 100 implementations

Эти рисунки иллюстрируют, что пуассоновские потоки и однородные им временные ряды штатно «измеряемой» реактивности при работе на установленной мощности могут классифицироваться и обрабатываться как некоторая форма технологического шума. Это является предпосылкой специализированной шумовой диагностики АЗ.

Следует заметить, что при реальном мониторинге состояния АЗ матрица ρ заполняется и обновляется постепенно. Размерность матрицы с одной стороны ограничивается допустимой статистической, а с другой допускаемой динамической погрешностями фиксируемых мгновенных состояний АЗ. Помимо среднего значения и его вариации, введем в анализ индикатор дефектности

$$R = \left[\max(\rho^{(j)}) - \min(\rho^{(j)}) \right] / (b - a) \quad \text{— размах}$$

значений в каждом столбце, нормированный на ширину нормативного поля (a — минимальное значение; b — максимальное значение). Ширина нормативного поля — это эксплуатационный параметр (подбирается на основе анализа архивных данных). Индикатор $R \geq 1$ фиксирует деградацию АЗ. Таким образом, специализированная система шумовой диагностики дефектных состояний АЗ может быть сконструирована на основе мониторинга описанных непараметрических показателей в стационарных режимах.

Промышленное «измерение» реактивности основано на решении обратной задачи кинетики в точечном приближении с учетом шести групп запаздывающих нейтронов в режиме реального времени [8]. Реактиметр является нелинейным функциональным преобразователем сигналов аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) и системы внутриреакторного контроля (СВРК). Погрешность «измерений» реактивности относительно теоретического значения может достигать ($\pm 10\%$), а функция распределения значительно отличаться от нормальной. Это ограничивает чувствительность диагностики, основанной на анализе статистических свойств случайной составляющей «измерений» реактивности. Действительный поток реактивности можно восстановить, рассмотрев задачу параметрической идентификации возмущений нейтронной плотности.

Модель возмущения нейтронной плотности

Рассмотрим реактор ВВЭР -1000 с параметрами АЗ [8]:

$n_0 = 3000$ (1000) МВт – регламентное значение тепловой (электрической) мощности;

$l^* = 0.001$ сек – среднее время жизни поколения нейтронов;

$\beta_{эфф} = 0.0064$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов;

$\lambda = 0.076 \text{ сек}^{-1}$ – средняя постоянная распада эквивалентного ядра-предшественника.

Решение уравнений кинетики при учете одной группы запаздывающих нейтронов описывается разностью двух экспонент (2):

$$n(\tau) = n(0) \left[\frac{\beta_{эфф}}{\beta_{эфф} - \rho(\tau)} \exp \left(\frac{\lambda \rho(\tau)}{\beta_{эфф} - \rho(\tau)} \tau \right) - \frac{\rho(\tau)}{\beta_{эфф} - \rho(\tau)} \exp \left(- \frac{\beta_{эфф} - \rho(\tau)}{l^*} \tau \right) \right] \quad (2)$$

Приводим это выражение к матричной форме (3):

$$n_{i,j} = n_0 \left[\frac{\beta_{эфф}}{\beta_{эфф} - \rho_{i,j}} e^{\left(\frac{\lambda \cdot \rho_{i,j}}{\beta_{эфф} - \rho_{i,j}} \tau_j \right)} - \frac{\rho_{i,j}}{\beta_{эфф} - \rho_{i,j}} e^{\left(- \frac{\beta_{эфф} - \rho_{i,j}}{l} \tau_j \right)} \right] \quad (3)$$

Выражение (3) будем использовать в качестве имитатора АЗ для всех внешних возмущений (тестов) по каналу реактивности.

На рисунке 4 приведены две гипотетические реализации возмущения нейтронной плотности на интервале наблюдения 30 сек.

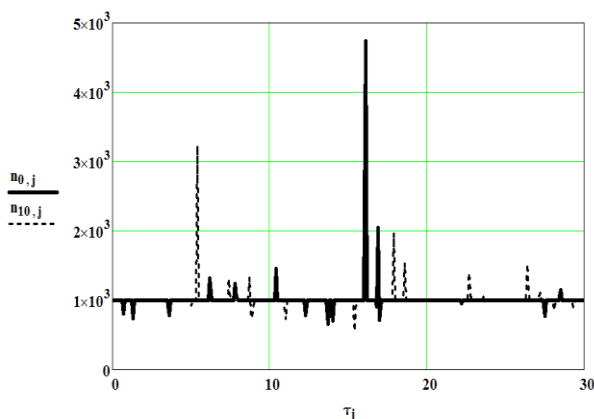


Рисунок 4. Реализации №0 и №10 возмущения нейтронной плотности на интервале продолжительностью 30 сек.

Figure 4. Implementations No. 0 and No. 10 of the neutron density perturbation over a 30-second interval

Этот рисунок показывает возможность реализации (в одгрупповой модели) редких мгновенных аномальных амплитудных значений.

На рисунках 5, 6 приведены эволюция среднего значения и коэффициента вариации $[\sigma(n)/\text{mean}(n)]$ возмущения нейтронной плотности по ансамблю 100 реализаций.

Рисунки иллюстрируют сглаженный характер осредненных значений флуктуаций нейтронной плотности (в отличие от мгновенных импульсов теоретической модели рис. 4). Эти модуляции и определяют фиксируемый технический эффект.

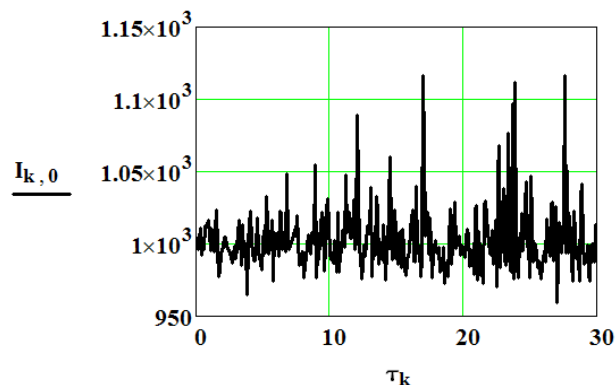


Рисунок 5. Эволюция среднего значения $I_{k,0} = \text{mean}(n)$ возмущения нейтронной

плотности по ансамблю 100 реализаций
Figure 5. Evolution of the mean value $I_{k,0} = \text{mean}(n)$ of the neutron density perturbation over an ensemble of 100 implementations

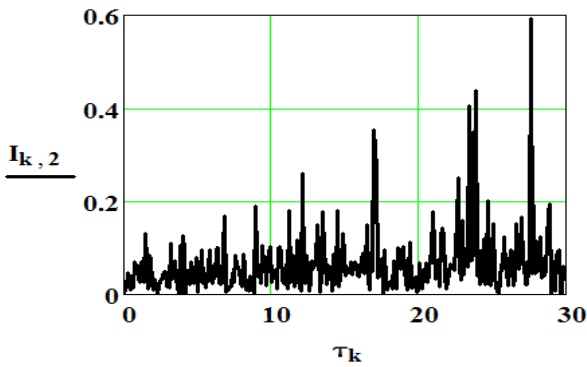


Рисунок 6. Коэффициент вариации

$I_{k,2} = [\sigma(n)/\text{mean}(n)]$ возмущения нейтронной плотности по ансамблю 100 реализаций.

Figure 6. Coefficient of variation $I_{k,2} = [\sigma(n)/\text{mean}(n)]$ of the neutron density perturbation over the ensemble of 100 implementations

Восстановление действительного потока реактивности

Воспользуемся пуассоновской моделью реактивности для решения обратной задачи нейтронной кинетики, сформулировав ее в форме задачи параметрической идентификации.

На временном ряду, измерений датчиками нейтронной плотности штатной системы мониторинга n_{emp} зададим эмпирическую функцию распределения $F_{\text{emp}}(N)$. В стационарном режиме адекватность этой функции зависит только от используемого объема измеренных данных.

На равноразмерном имитационном временном ряду отклика $n_{\text{расч}}$ генерируемом пуассоновской моделью реактивности зададим расчетную функцию распределения $F_{\text{расч}}(N, \sigma, \lambda)$. Адекватность этой функции зависит от объема генерируемых данных, полноты используемой модели кинетики и параметров стохастической модели реактивности.

Обе функции определяются по вариационным рядам $\{x_i\}$ из соотношений (4):

$$F_N(x) = \frac{1}{N} \sum_{1 \leq i \leq N} I(x, x_i) \quad (4)$$

$$I(x, x_i) = \begin{cases} 0, & x \leq x_i \\ 1 & x > x_i \end{cases}$$

Воспользуемся статистикой критерия Колмогорова для оценки значений элемен-

тов кортежа (σ, λ) пуассоновского потока [9,10] (5):

$$D_N = \sup_{|x| < \infty} |F_{\text{emp}}(N) - F_{\text{расч}}(N, \sigma, \lambda)|. \quad (5)$$

Исходим из требования однородности этих распределений в форме (6):

$$S_K = \frac{6ND_N + 1}{6\sqrt{N}}, \quad (6)$$

где $D_N = \max(D_N^+, D_N^-)$,

$$D_N^+ = \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ F_{\text{расч}}(x_i, \sigma, \lambda) - \frac{i-1}{N} \right\},$$

$$D_N^- = \max_{1 \leq i \leq N} \left\{ F_{\text{emp}}(x_i) - \frac{i-1}{N} \right\}.$$

Если для вычисленного по выборке значения статистики S_K^* выполняется неравенство (7):

$$P(S > S_K^*) = 1 - K(S_K^*) < \alpha, \quad (7)$$

где $K(S_K^*) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-k^2 S_K^{*2}}$,

α – уровень значимости, то принимается гипотеза H_0 : $F_{\text{emp}}(N) = F_{\text{расч}}(N, \sigma, \lambda)$ – распределения однородны (принадлежат одной генеральной совокупности).

Кортеж (σ, λ) , обеспечивший выполнение условия однородности эмпирических распределений, назначается сигнатурой пуассоновского процесса и сохраняется в архиве. В противном случае выбираются новые параметры модели возмущения реактивности и поиск возобновляется. Модели возмущения реактивности, соответствующие найденным сигнатурам, объявляются эмпирическими тестами.

Данную технологию продемонстрируем на следующем простом примере. На рисунке 7 приведена реализация пуассоновского процесса с параметрами $\lambda = 5$; $\sigma = 0.0005$; $\Delta t = 0.1$ на интервале наблюдения 30 сек.

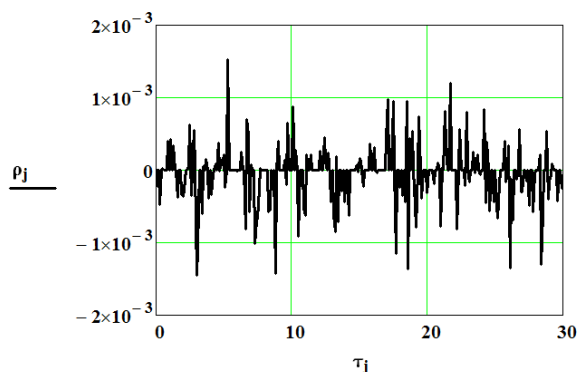


Рисунок 7. Реализация пуассоновского процесса $\lambda = 5$; $\sigma = 0.0005$; $\Delta\tau = 0.1$ на интервале наблюдения 30 сек.

Figure 7. Implementation of the Poisson process $\lambda = 5$; $\sigma = 0.0005$; $\Delta\tau = 0.1$ at an observation interval of 30 sec.

Этот рисунок иллюстрирует флуктуации реактивности относительно нулевого значения при работе на установленной мощности.

На рисунке 8 представлена реализация возмущения нейтронной плотности (с нормировкой $n_0=1000$ МВт) на интервале продолжительностью 30 сек.

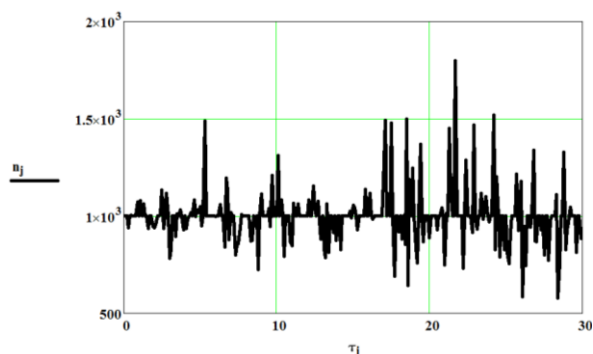


Рисунок 8. Реализация возмущения нейтронной плотности на интервале 30 сек.

Figure 8. Implementation of the neutron density perturbation at the interval of 30 sec.

Этот рисунок иллюстрирует флуктуации мощности (нейтронной плотности) относительно установленного значения (1000 МВт).

Пусть истинная (измеряемая) нейтронная плотность распределена по нормальному закону такому, что среднее значение удерживается нормативном интервале (995-1005) МВт с погрешностью ($\pm 10\%$)

На рисунке 9 представлены модельная функция распределения возмущенной нейтронной плотности $F(y)$ и измеряемая плотность, распределенная по нормальному закону $N(y)$.

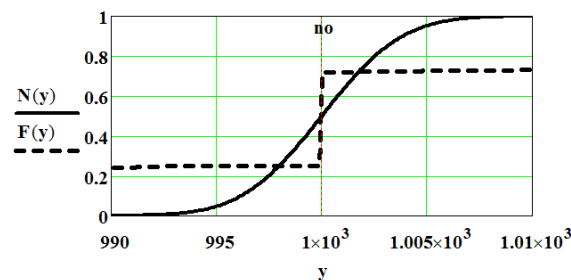


Рисунок 9. Эмпирическая функция распределения $F(y)$. Функция нормального распределения $N(y)$.
Figure 9. Empirical distribution function $F(y)$. Normal distribution function $N(y)$.

Этот рисунок демонстрирует очевидную возможность для любых генераторов возмущения реактивности получать параметры идентификации (σ , λ) подгонкой, обеспечивающей совмещение кривых.

Непосредственный элемент оборудования АЗ, генерирующий возмущения реактивности, устанавливается по корреляции идентифицированного пуассоновского процесса со стохастическими составляющими измерений: температуры, давления и вибрации. Воспользуемся системным определением дефектности АЗ – «вероятность превышение предела».

Вычислим для рассмотренных возмущенной и нормальной функций распределения мощности (нейтронной плотности) вероятность значений вне нормативного поля:

$$Def_F = 1 + F(995) - F(1005). \quad Def_F = 0.525;$$

$$Def_N = 1 + N(995) - N(1005). \quad Def_N = 0.096.$$

Эти оценки отражают неоднородность распределений $F(y) \neq N(y)$. Рассогласование распределений минимизируется предложенной процедурой. Временной ряд индикатора Def_N представляет эволюцию дефектности, а тренд деградацию АЗ.

Заключение

Предлагается система мониторинга текущего состояния и оценки уровня дефектности АЗ РУ, сконструированная на измерениях сигналов аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) и системы внутриреакторного контроля (СВРК) в стационарных режимах.

Вариацией параметров расчетной модели достигается условие однородности модельной и эмпирической функций распределения. При выполнении критерия Колмогорова

ва-Смирнова фиксируются соответствующие значения элементов кортежа (σ , λ) пуассоновского потока. Кортеж (σ , λ) назначается сигнатурой пуассоновского процесса и сохраняется в архиве как элемент библиотеки показателей эксплуатации АЗ РУ.

Модели возмущения реактивности, соответствующие найденным сигнатурам, являются эмпирическими тестами. Они яв-

ляются решениями обратной задачи кинетики АЗ.

На плоскости (σ , λ) визуализируется эволюция состояния АЗ в форме траектории $\sigma(\lambda)$. Иллюстрацией деградации АЗ является тренд зависимости от времени эмпирической вероятности превышения эксплуатационных пределов установленной мощности (плотности нейтронов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Москва: Наука, 2021. 221 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/okrpeg?ysclid=m4gxqqmdmi155074242> (дата обращения: 26.11.2024).
2. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ядерных энергетических установок. Москва: МЭИ, 1984. 67 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001236841> (дата обращения: 26.11.2024).
3. Федоров А.И., Проскуряков М.В., Запорожец М.В., Иванов С.В. Повышение надежности функционирования энергоблоков АЭС на основе данных виброакустической паспортизации. *Вестник ВГТУ*. 2014;10(5-1):85–91. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-funktsionirovaniya-energoblokov-aes-na-osnove-dannyh-vibroakusticheskoy-pasportizatsii> (дата обращения: 26.11.2024).
4. Fedorov A.I., Proskuryakov M.V., Zaporozhets M.V., Ivanov S.V. Improving the reliability of NPP power units based on vibroacoustic certification data. *Bulletin of VSTU*. 2014;10(5-1):85–91. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-funktsionirovaniya-energoblokov-aes-na-osnove-dannyh-vibroakusticheskoy-pasportizatsii> (accessed: 26.11.2024).
5. Проскуряков К.Н., Запорожец М.В. Исследование акустических колебаний в реакторных установках и перспективы их использования для обоснования остаточного ресурса. *Вестник МЭИ*. 2016;5:19–24. Режим доступа: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/93> (дата обращения: 26.11.2024).
6. Proskuryakov K.N., Zaporozhets M.V. Investigation of acoustic vibrations in reactor installations and prospects for their use to substantiate the residual resource. *Bulletin of the MEI*. 2016;5:19–24. (In Russ.). Available at: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/93> (accessed: 26.11.2024).
7. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Монография. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2005. 258 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19449479&ysclid=m4h1yi9168480893214> (дата обращения: 26.11.2024).
8. Украинцев В.Ф. Эффекты реактивности в энергетических реакторах. Обнинск: Обнинский институт атомной энергетики, 2001. 58 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000704994> (дата обращения: 26.11.2024).
9. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. Москва: Физматлит, 2006. 813 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002917693> (дата обращения: 26.11.2024).
10. Казанский Ю.А., Слекенич Я.В. Кинетика ядерных реакторов. Коэффициенты реактивности. Введение в динамику. Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. 300 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006761901?ysclid=m4h2kp52jy723354596> (дата обращения: 26.11.2024).
11. Ширяев А.Н. Стохастические задачи о разладке. Москва: МЦНМО, 2017. 391 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009447149?ysclid=m4h2mzpi4i983560499> (дата обращения: 26.11.2024).
12. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. Москва: Инфра-М, 2017. 164 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008691530> (дата обращения: 26.11.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Шпицер В.Я. – предложение системы мониторинга текущего состояния и оценки уровня дефектности АЗ РУ, сконструированной на измерениях сигналов аппаратуры контроля нейтронного потока и системы внутриреакторного контроля в стационарных режимах.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Shpitzer V.Y. – proposing a system for monitoring the current state and assessing the level of defects reactor plant core designed on measurements of neutron flux monitoring equipment and in-reactor monitoring system signals in steady-state modes.

Кривин В.В. – выполнение измерений, анализ экспериментальных данных, подбор литературных источников, редактирование текста статьи.

Krivin V.V. – performance of measurements, analysis of experimental data, selection of literature sources, article editing.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования. Инициативное исследование.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding. Initiative research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Владимир Яковлевич Шпицер, доктор технических наук, профессор кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

Vladimir Y. Shpitser, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Nuclear Power Engineering, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

Валерий Вольфович Кривин, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-0903-0786>

e-mail: VVKrivin@mephi.ru

Valery V. Krivin, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Information and Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-0903-0786>

e-mail: VVKrivin@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 02.10.2024

После доработки / Revised 03.12.2024

Принята к публикации / Accepted 05.12.2024