

В. В. Рязанов

Институт ядерных исследований НАН Украины, просп. Науки, 47, Киев, 03068, Украина

ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ ПОМОЩИ
ВРЕМЕНИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ЧИСЛОМ НЕЙТРОНОВ

Предлагается новый метод обнаружения нарушений нормальной работы ядерного реактора – по особенностям поведения моментов случайной величины времени достижения заданного уровня числом нейтронов в реакторе. При этом не требуется проводить какие-либо эксперименты. Не требуются также и громоздкие расчеты. Можно задаться произвольным изменением реактивности во времени и получить поведение моментов времени достижения заданного уровня, соответствующее этому изменению реактивности. Возможны и аналитические подходы к указанной задаче.

Ключевые слова: контроль состояния реактора, время достижения заданного уровня числом нейтронов.

Введение

Случайная величина, характеризующая временные интервалы эволюции нейтронов, время достижения некоторого заданного уровня числом нейтронов в реакторе, рассмотрена в [1 - 4]. Под временем достижения заданного уровня числом нейтронов понимается случайное время до момента достижения случайным процессом для полного числа нейтронов в реакторе этого уровня. Эту величину можно рассматривать как стохастический аналог периода реактора [1, 2], если выбрать соответствующий уровень. В [2] получено распределение времени достижения уровня числом нейтронов в реакторе, из которого можно записать любые моменты этой величины, а также такие вероятностные характеристики, как вероятность того, что время достижения уровня числом нейтронов находится в каких-то заданных пределах. В точках опасного изменения реактивности, которые могут привести к аварийным ситуациям, моменты (например, среднее значение и дисперсия) случайной величины времени достижения уровня числом нейтронов в реакторе имеют особенности. В [2] получены выражения для моментов времени достижения уровня, учитывающие динамику изменения реактивности во времени. Моделируя поведение этих моментов для различных процессов в реакторе, можно отслеживать их особенности, контролируя тем самым безопасность реактора.

Для среднего времени достижения, вычисленного в соответствии с выражениями (1) из [2], численный расчет дает следующую особенность при значении реактивности, равной доле запаздывающих нейтронов β , скачка реактивности на мгновенных нейтронах (рис. 1).

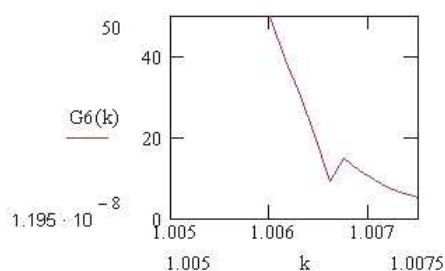


Рис. 1

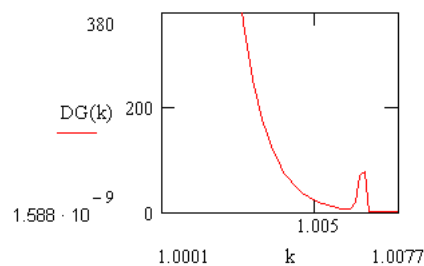


Рис. 2

Приведем также пример особенности поведения дисперсии времени достижения уровня для случая скачка на мгновенных нейтронах (рис. 2). По временной величине времени достижения уровня проводится усреднение. Поэтому в настоящей работе предлагается выделить два времени, т.е. надо различать интегрирование по времени усреднения, времени достижения уровня Γ и текущее время t . Это разные времена. В [2] они рассматривались как одно время, временная зависимость реактивности записывалась как $\rho(t = \Gamma)$. Это, видимо, может служить первым приближением. В общем случае надо выделить $\rho(t, \Gamma)$. Зависимость времени достижения уровня от текущего момента времени можно учесть, например, вводя зависимости эффективного коэффициента размножения нейтронов k от текущего момента времени t и от момента времени достижения уровня Γ .

© В. В. Рязанов, 2013

Возможности временного описания изменений реактивности и поведение среднего значения и дисперсии времени достижения заданного уровня

Существуют, как минимум, три основных возможности временного описания изменений реактивности. В первом случае, как в [2], предполагается, что текущее время совпадает с пространством усреднения по возможным временам усреднения, при этом реактивность зависит от времени достижения уровня Γ , совпадающего с текущим временем t , $\rho(\Gamma = t)$. Во втором случае для каждого текущего момента времени t проводится усреднение по Γ величины $\rho(\Gamma, t)$, затем учитываются зависимости $\rho(t)$. В третьей возможности делаются предположения, сходные со вторым случаем, но не выделено время Γ , а предполагается, что для каждого момента времени проводится усреднение, а после усреднения учитывается зависимость $\rho(t)$. При $\Gamma = t$ усреднение по Γ проводится с учетом того, что $\rho(\Gamma = t)$. Т.е. сначала усредняется по Γ в $\rho(\Gamma, t)$, а затем учитывается и зависимость $\rho(t)$. Такой расчет дает более «сглаженные» зависимости от увеличения реактивности, среднее время достижения уровня спадает не так резко, как без учета зависимости от текущего времени – для случая двух пиков реактивности в рассмотренном ниже примере подключения петли главных циркуляционных насосов (ГЦН).

Возможен еще один подход, когда учитывается зависимость реактивности от текущего времени $\rho(t)$. Как в работе [2], проводится усреднение по t . А в полученные соотношения, как в третьем случае, подставляется зависящая от времени реактивность $\rho(t)$. Предполагается, что проведенное усреднение по временам достижения уровня в один момент текущего времени так же может быть проведено и в любой другой момент текущего времени, и записываются соотношения [2]

$$l_{эф} Z_{\gamma} = (1 - \beta) \int_0^R \exp[t\omega_0(\rho(t))] dt + \beta b \int_0^R \exp[t\omega_1(\rho(t))] dt,$$

$$\langle \Gamma \rangle = \left[(1 - \beta) \int_0^R t \exp[t\omega_0(\rho(t))] dt + \beta b \int_0^R t \exp[t\omega_1(\rho(t))] dt \right] / l_{эф} Z_{\gamma}; \quad (1)$$

$$D = \langle \Gamma^2 \rangle - \langle \Gamma \rangle^2; \quad \langle \Gamma^2 \rangle = \left[(1 - \beta) \int_0^R t^2 \exp[t\omega_0(\rho(t))] dt + \beta b \int_0^R t^2 \exp[t\omega_1(\rho(t))] dt \right] / l_{эф} Z_{\gamma};$$

$$P(a < \Gamma < c, t) = \left[(1 - \beta) \int_a^c \exp[t\omega_0(\rho(t))] dt + \beta b \int_a^c \exp[t\omega_1(\rho(t))] dt \right] / l_{эф} Z_{\gamma},$$

где $l_{эф} = 1/v\Sigma_a \approx 10^{-8} - 10^{-3}$ с – среднее эффективное время жизни нейтрона; v, Σ_a – средняя скорость и сечение поглощения нейтронов соответственно; для тепловых нейтронов $l_{эф} = 1/v\Sigma_a \approx 10^{-3}$ с; $\Gamma_{макс} = R$ – некоторое максимально возможное время достижения уровня; $\rho = (k - 1)/k$ – реактивность реактора; $\lambda = 0,077$ с⁻¹ – эффективная постоянная распада предшественников запаздывающих нейтронов; $\beta = 0,0065$ – доля запаздывающих нейтронов; для случая объединения запаздывающих нейтронов в одну эффективную группу для величины ω записано квадратное уравнение вида

$$k\rho(\omega + \lambda) = \omega l_{эф}(\omega + \lambda) + \beta\omega k,$$

два решения которого имеют вид

$$l_{эф}\omega_0 = \frac{k\rho - k\beta - b}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{4\rho kb}{(k\rho - k\beta - b)^2} \right)^{1/2} \right] = \frac{Y}{2} [1 + (1 + 4d)^{1/2}]; \quad b = \lambda l_{эф} = 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ при } l_{эф} \approx 10^{-3} \text{ с};$$

$$l_{эф}\omega_1 = \frac{k\rho - k\beta - b}{2} \left[1 - \left(1 + \frac{4\rho kb}{(k\rho - k\beta - b)^2} \right)^{1/2} \right] = \frac{Y}{2} [1 - (1 + 4d)^{1/2}]; \quad Y = k\rho - k\beta - b; \quad d = \frac{\rho kb}{Y^2}.$$

Расчеты моментов времени достижения уровня числом нейтронов могут быть проведены для произвольных явлений, сопутствующих работе реактора, например при изменении реактивности вследствие изменения состава активной зоны, выгорания ядерного топлива, отравления реактора, ксеноновых колебаний и т.д.

Рассмотрим пример. В работе [4] рассмотрено подключение ранее неработавшей петли при работе реакторной установки на двух ГЦН. В режиме "подключение ГЦН ранее неработавшей петли" увеличение расхода и снижение температуры теплоносителя на входе в реактор со стороны подключаемой петли обуславливает ярко выраженное асимметричное поведение характеристик активной зоны. В результате подключения ранее неработавшей петли на первых десяти секундах переходного процесса происходит увеличение расхода теплоносителя через реактор. Увеличение расхода приводит к уменьшению подогрева теплоносителя по активной зоне и, следовательно, к снижению средней температуры теплоносителя в реакторе. Вследствие отрицательного температурного коэффициента реактивности в реактор вводится положительная реактивность (рис. 3, первый пик реактивности составляет 0,13 %). Введение положительной реактивности приводит к увеличению нейтронной и тепловой мощности реактора (см. рис. 3).

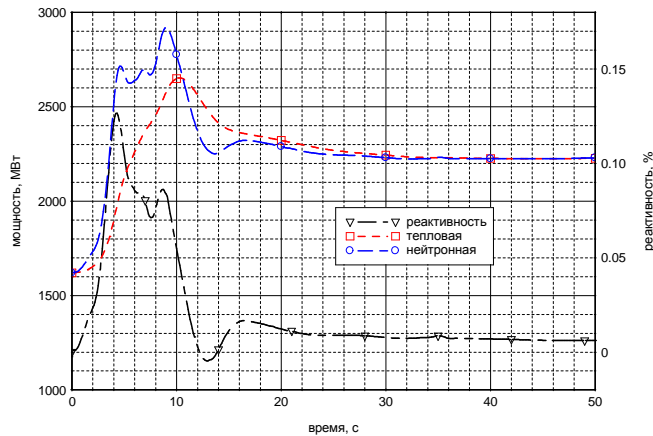


Рис. 3

На 7-й секунде холодный теплоноситель подключаемой петли начинает поступать в активную зону, вызывая дополнительное увеличение реактивности (см. рис. 3, второй пик) и дальнейший рост нейтронной мощности реактора, максимальное значение которой достигает величины 2924 МВт на 9,1 с. Второй пик реактивности получается ниже первого и составляет 0,09 %.

Максимальное значение тепловой мощности реактора в переходном процессе составляет 2653 МВт. В дальнейшем, вследствие действия обратных связей, реактивность стремится к нулю, а нейтронная и тепловая мощность

стабилизируются на уровне 2255 МВт к концу переходного процесса.

Ярко выраженный перекося поля энерговыделения вызывает рост интегральной нейтронной мощности максимально нагруженного твэла с 55 до 126 кВт (выбег мощности 129 %), а тепловой с 55 до 110 кВт (выбег мощности 100 %). При этом максимальное значение температуры топлива в переходном процессе достигает величины 1998 °С для твэла, минимальная величина коэффициента запаса составляет 1,15, т.е. соблюдаются критерии приемлемости для данного типа аварии.

Рассмотрим изменения по величине первого и второго пиков положительной реактивности и влияние этих изменений на среднее время достижения уровня. Обозначим m величину первого пика реактивности. Численный расчет зависимости среднего времени достижения уровня от величины первого пика положительной реактивности m показан на рис. 4.

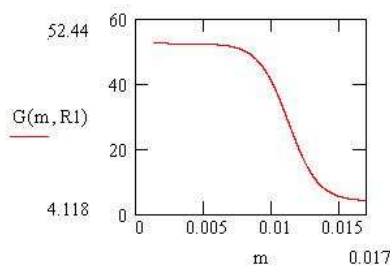


Рис. 4

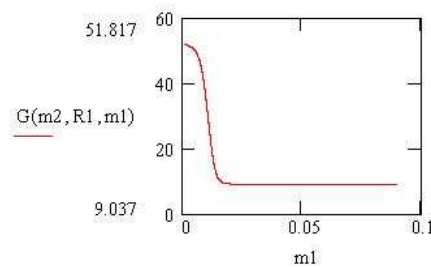


Рис. 5

Видно, что при росте величины первого пика положительной реактивности m значения среднего времени достижения уровня, соответствующие периоду реактора, снижаются до опасно малых значений (меньше 10 с). Предполагается, что время достижения уровня имеет некоторое максимальное значение R_1 .

Аналогично рассматривается зависимость от величины второго пика реактивности, обозначенного m_1 . Эта зависимость при $m = m_2 = 0,127 \cdot 10^{-2}$ показана на рис. 5. На рис. 6 показана зависимость от m_1 при $m = 0,0069$.

Если проводить расчет, как отмечено выше, по второму случаю, когда учитывается зависимость эффективного коэффициента размножения k и реактивности ρ от времени достижения и от те-

кущего момента времени, то после усреднения по значениям времен достижения Γ можно получить зависимости от текущего момента времени, обозначенного $t = t_l$, $k(t, \Gamma)$, $\Gamma = t, t \leq \Gamma_f$, $\Gamma = 0, t > \Gamma_f$,

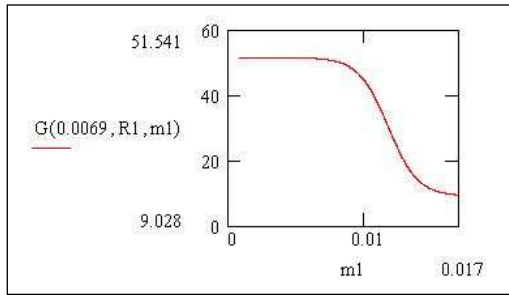


Рис. 6

где Γ_f - случайный момент окончания времени жизни. По времени Γ проводится усреднение, а текущее время $t = t_l$ учитывает реальную динамику системы, происходящие в системе изменения, вызванные внешними воздействиями и внутренними причинами. В настоящем подходе надо выделить $\rho(t, \Gamma)$.

Расчеты по формулам (1), где учитывалась зависимость реактивности от времени, соответствующая рис. 3, и предполагалась зависимость реактивности от двух временных аргументов в виде $\rho(\Gamma + t_l)$, по времени достижения Γ

проводится усреднение, t_l – текущее время, приводят к зависимостям среднего времени достижения уровня, соответствующего периоду реактора, от величины первого пика реактивности m при значениях $t_l = 4, 40, 100, 120$, изображенным на рис. 7.

Зависимости среднего времени достижения уровня от текущего момента времени t_l при разных величинах первого пика реактивности m при значениях $m = 0,27 \cdot 10^{-2}, 0,3 \cdot 10^{-2}, 0,9 \cdot 10^{-2}, 1,7 \cdot 10^{-2}, 0,3 \cdot 10^{-1}, 0,5 \cdot 10^{-1}, 0,7 \cdot 10^{-1}, 0,9 \cdot 10^{-1}$ приведены на рис. 8:

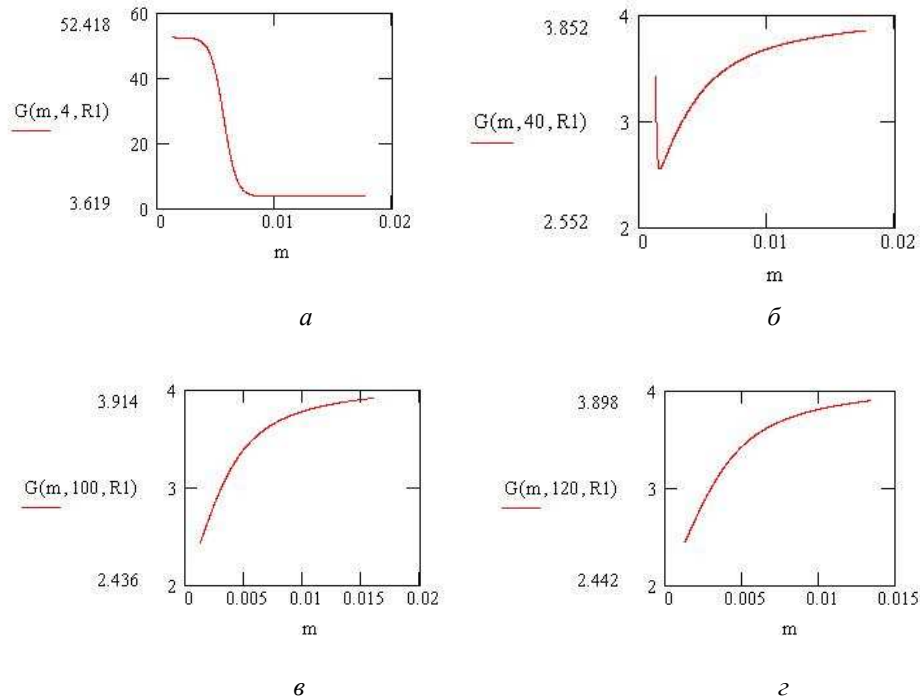
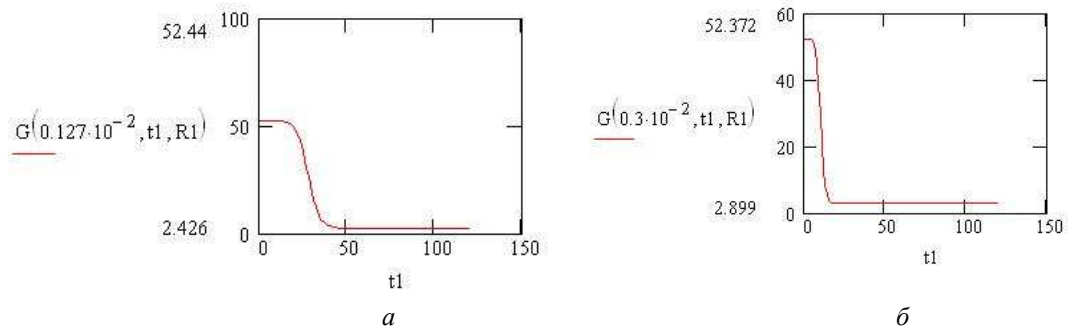


Рис. 7



(Продолжение следует)

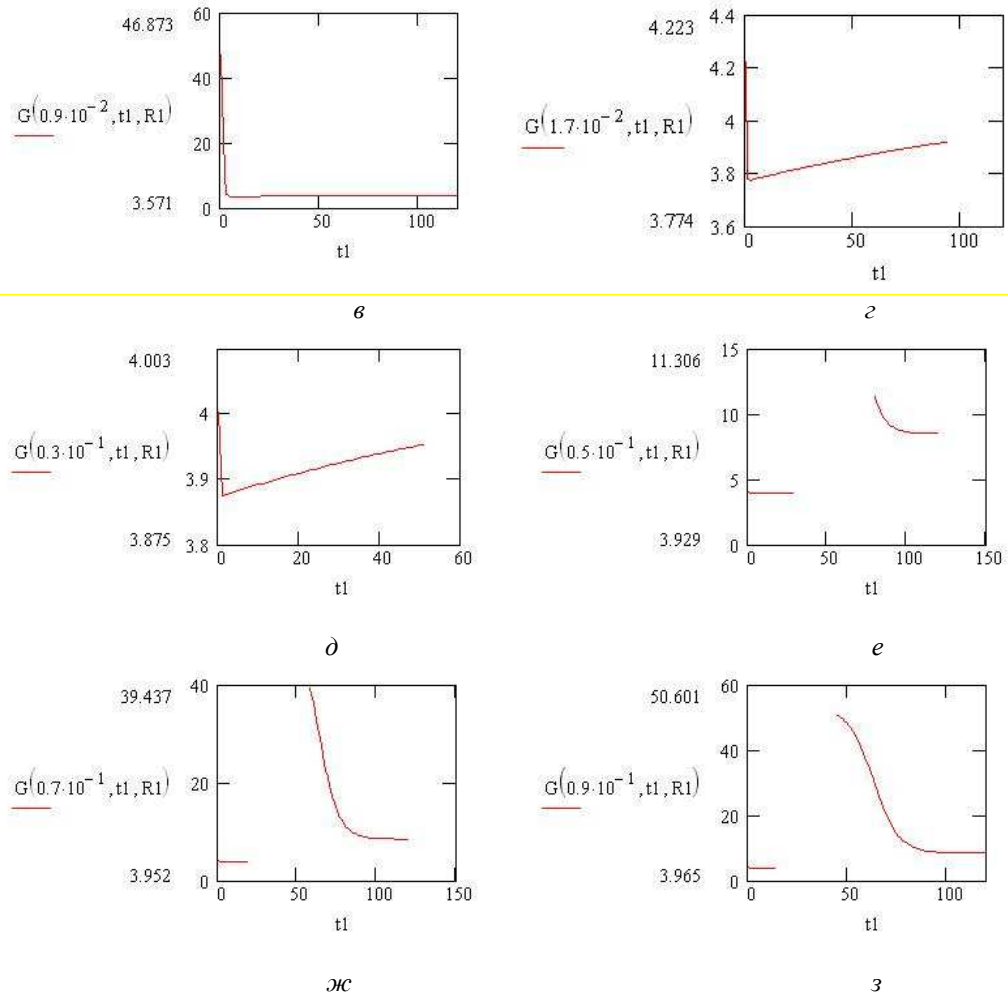


Рис. 8

Для дисперсии расчеты для таких же условий (зависимости дисперсии достижения уровня от m при разных значениях t_1 и зависимости дисперсии достижения уровня от t_1 при разных значениях m) дают результаты, представленные на рис. 9 и 10.

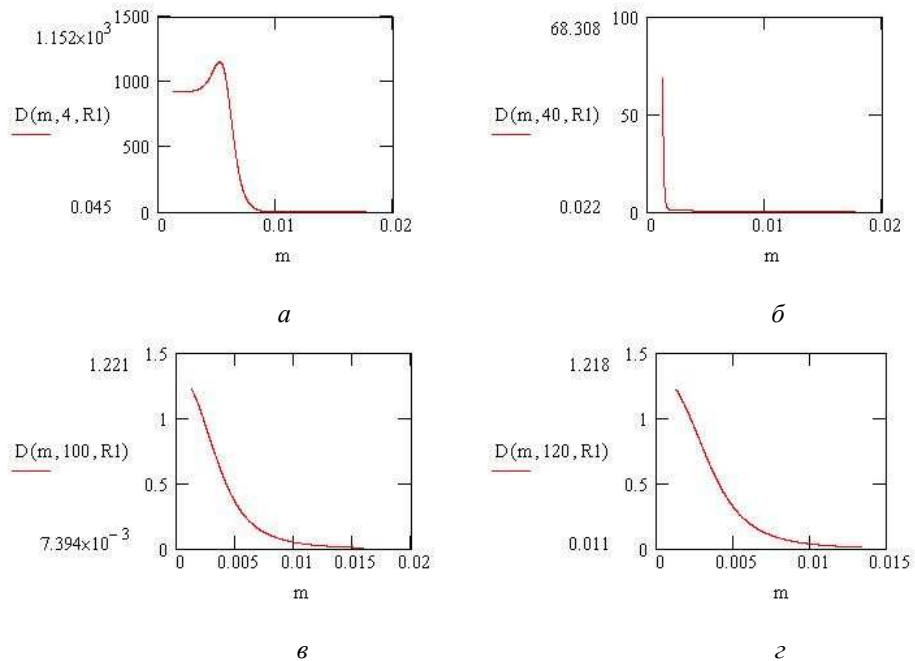


Рис. 9

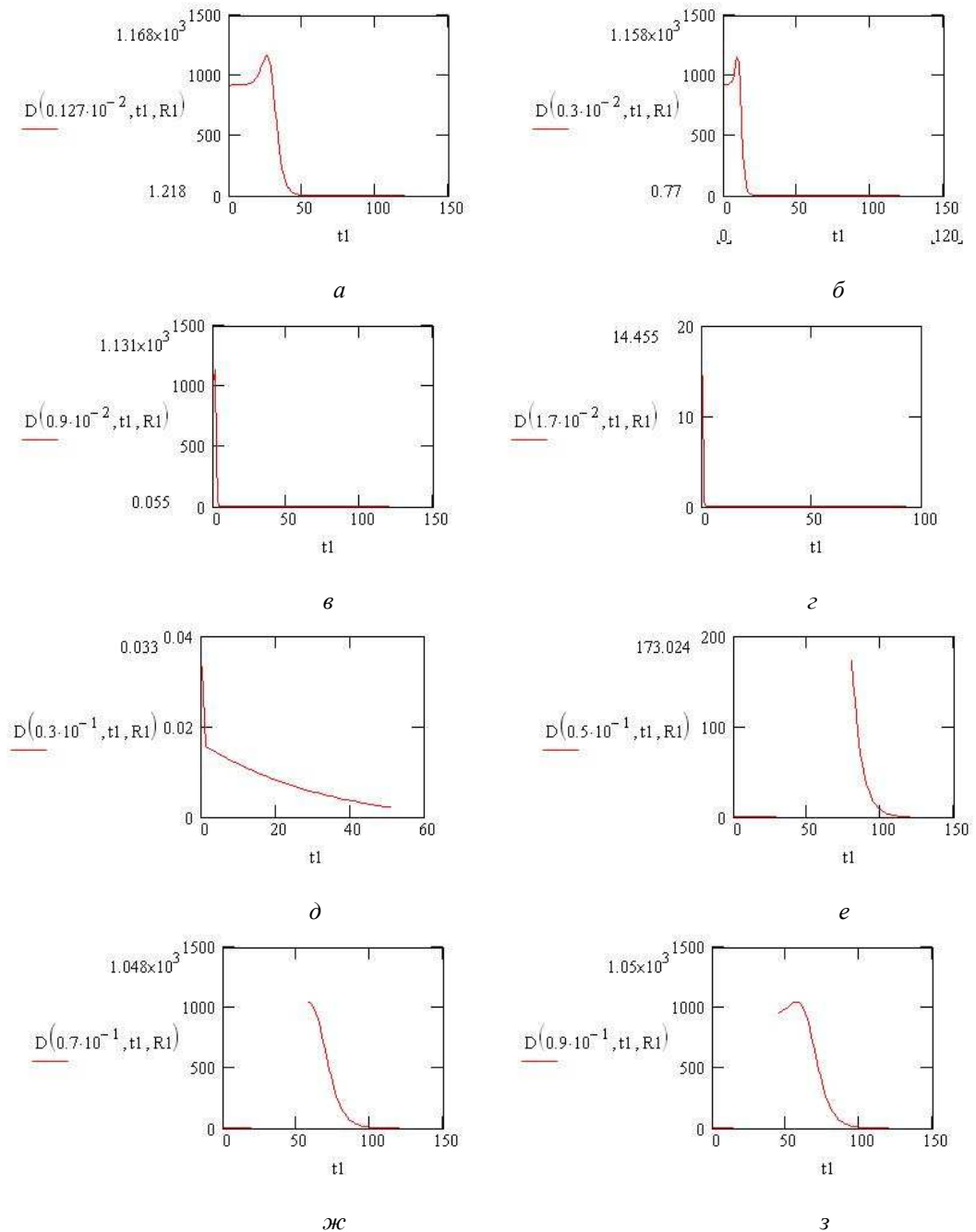


Рис. 10

Обсуждение

Рис. 1 и 2 демонстрируют действенность предлагаемого метода. В точке скачка на мгновенных нейтронах, где, как известно, поведение реактора испытывает особенность, особенности испытывают и моменты случайной величины времени достижения уровня числом нейтронов. Особенности моментов могут быть разного рода. Так, на рис. 4 - 6 показано, что при повышении пиков положительной реактивности на примере рис. 3 само поведение моментов плавное, но среднее время достижения, соответствующее периоду реактора, уменьшается до опасно малых значений.

На рис. 7 и 9 показаны зависимости среднего значения и дисперсии времени достижения от величины первого пика положительной реактивности на примере рис. 3 для различных моментов текущего времени, а на рис. 8 и 10 - зависимости среднего значения и дисперсии времени достижения от текущего момента времени для разных значений величины первого пика положительной реактивности на примере рис. 3. Поведение дисперсии, ее максимумы, соответствующие росту флуктуаций, можно рассматривать как возможные особенности поведения системы в точках вероятных опасных

изменений. Отметим, что полученные в расчетах максимумы дисперсии совпадают с первыми моментами достижения опасно малых уровней средними значениями времени достижения уровня, соответствующими опасно малым периодам реактора. На рис. 8, $e - z$ для среднего значения времени достижения получены разрывы кривой. Такие же разрывы кривой получены и на рис. 10, $e - z$ для дисперсии времени достижения уровня. При некоторых значениях параметра (текущего момента времени в данном случае) не существует значений среднего значения и дисперсии времени достижения уровня. Аналогичные разрывы зависимости среднего времени достижения уровня получены в [5] для примера из работы [6], рассмотренного в [2], для различных значений начального возмущения реактивности $\rho_{возм} = p (= 0,002, \dots)$. Такого рода разрывы, видимо, также соответствуют каким-то особенностям поведения реакторной системы. На рис. 7, $b - z$ средние значения времени достижения, в отличие от рис. 7, a , растут с ростом первого пика положительной реактивности m , оставаясь, тем не менее, опасно малыми.

Заключение

В предлагаемом подходе к контролю состояния и пределов безопасной эксплуатации реактора неоднозначным остается вопрос о корректном выборе временных зависимостей реактивности: зависимостей от текущего момента времени и зависимости от времени достижения уровня, по которой проводится усреднение. Кроме рассмотренного в настоящей работе примера, зависимость от времени t и от момента достижения уровня Γ можно задавать, например, в таком виде, когда $t \rightarrow (t + \Gamma)/2$. Можно также решать задачу аналитически, исследуя, например, производную от среднего времени достижения уровня по какому-то параметру. Можно зависимости от R_I , дисперсии, среднего сопоставлять с временными изменениями, - это другая возможность учета изменений во времени.

Рассмотренный в работе пример - только один из практически неограниченного множества других возможных примеров. Так, в [5] был рассмотрен случай саморегулирования реактора при росте начального возмущения реактивности [6]. Этот пример без роста начального возмущения реактивности рассматривался в [2]. Рассмотренные примеры показывают связь между возможными нарушениями нормальной работы реактора и особенностями поведения моментов времени достижения уровня, указывая тем самым на реальные возможности предлагаемой методики контроля безопасности АЭС. Но поставленная задача - контроль состояния ядерного реактора при помощи времени достижения заданного уровня числом нейтронов - требует дальнейшего детального исследования. Надо установить связь между особенностями поведения моментов случайной величины времени достижения уровня и возможными нарушениями стационарной работы реактора, провести классификацию особенностей и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ryazanov V.V.* Distribution of the neutron lifetime in a nuclear reactor // The 3rd International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, June 7 - 12, 2010 Kyiv, Ukraine, Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, 2011, Proceedings of the NPAE-2010, p. 544 - 548.
2. *Рязанов В.В.* Распределение времени достижения уровня числом нейтронов и период реактора // Атомная энергия. - 2011. - Т. 110, вып. 6. - С. 307 - 317.
3. *Рязанов В.В.* Стохастический аналог периода реактора - время достижения заданного уровня числом нейтронов // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2012. - Вип. 19. - С. 11 - 19.
4. *Овдиенко Ю. Н.* Оценка безопасности ВВЭР-1000 в переходных режимах эксплуатации и реактивностных авариях с использованием модели пространственной кинетики: Дис. ... канд. техн. наук. - К., 2010.
5. *Ryazanov V.V.* Stochastic analog of reactor period - time to reach a given level of number of neutrons. The 4-nd International conference: Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, Sept. 3 - 7, 2012. Book of abstracts. Kyiv, p. 128 - 129.
6. *Саркисов А.А., Пучков В.Н.* Физические основы эксплуатации ядерных паропроизводящих установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 504 с.

В. В. Рязанов

Институт ядерних досліджень НАН України, просп. Науки, 47, Київ, 03068, Україна

МОЖЛИВОСТІ КОНТРОЛЮ СТАНУ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ ЧАСУ ДОСЯГНЕННЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ ЧИСЛОМ НЕЙТРОНІВ

Пропонується новий метод виявлення порушень нормальної роботи ядерного реактора - за особливостями поведінки моментів випадкової величини часу досягнення заданого рівня числом нейтронів у реакторі.

При цьому не потрібно проводити будь-які експерименти. Не потрібні також і громіздкі розрахунки. Можна задатися довільною зміною реактивності в часі й отримати поведінку моментів часу досягнення заданого рівня, відповідну цій зміні реактивності. Можливі й аналітичні підходи до зазначеної задачі.

Ключові слова: контроль стану реактора, час досягнення заданого рівня числом нейтронів.

V. V. Ryazanov

Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, Prospekt Nauki, 47, Kyiv, 03068, Ukraine

POSSIBILITY OF NUCLEAR REACTOR CONTROL THROUGH TIME ACHIEVE A GIVEN LEVEL OF THE NUMBER OF NEUTRONS

A new method for detecting a malfunction in the reactor - on features of behavior of the moments of the random variable time to achieve a given level of the number of neutrons in the reactor. Under the time to achieve a given level of neutron numbers mean random time until it reaches a stochastic process for the total number of neutrons in the reactor at this level. This value can be considered as a stochastic analog reactor period. At the points of dangerous changes in reactivity, which can lead to a crash, the moments (such as mean and variance) of the random variable time to achieve the level of the number of neutrons in the reactor have singularities. Modeling the behavior of these moments for different processes in the reactor, we can keep track of their characteristics, thereby controlling the safety of the reactor. The considered examples show the relationship between the possible malfunction in the reactor and the specific behavior of the moments of the time to reach a level indicating a real possibility of the proposed method of control of NPP safety. There is no need to conduct any experiments. Not be required and cumbersome calculations. They are as follows the reactivity in time and get the behavior of the moments of time to achieve a given level, corresponding to the change of reactivity. It is possible analytical approaches to this problem.

Keywords: monitoring of the reactor, the time to reach a given level of the number of neutrons.

REFERENCES

1. *Ryazanov V.V.* Distribution of the neutron lifetime in a nuclear reactor // The 3rd International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, June 7 - 12, 2010 Kyiv, Ukraine, Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, 2011, Proceedings of the NPAE-2010, p. 544 - 548.
2. *Ryazanov V.V.* Neutron number first-passage time distribution and the reactor time constant // Atomic Energy. - October 2011. - Vol. 110. - Iss. 6. - P. 376 - 388.
3. *Ryazanov V.V.* Stochastic analog reactor period – time achievement a given level of number of neutrons // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of nuclear power plants and of Chornobyl). – 2012. - . Iss. 19. - P. 11 - 19. (Rus)
4. *Ovdienko Yu. N.* Safety assessment of VVER-1000 transient operating conditions and reactivity accidents using a model of the spatial kinetics. Dissertation for the degree of PhD. - Kyiv, 2010. (Rus)
5. *Ryazanov V.V.* Stochastic analog of reactor period - time to reach a given level of number of neutrons. The 4-nd International conference: Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy, Sept. 3 - 7, 2012. Book of abstracts. Kyiv, p. 128 - 129.
6. *Sarkisov A.A., Puchkov V.N.* Physical basis of the operation of nuclear steam generating plants. - Moskwa: Energoatomizdat, 1989. - 504 p. (Rus)

Надійшла 28.01.2013

Received 28.01.2013