

УДК 621.039.56

Управление энергораспределением ядерного реактора на основе сетей Петри

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 14.01.2019 г.; после доработки 16.01.2019 г.

Аннотация

В статье предложен подход к решению проблемы эффективного управления энергораспределением по объему активной зоны реактора с использованием аппарата сетей Петри. Разработано расширение сети Петри, позволяющее снизить размерность описания энергораспределения и повысить быстродействие выбора положения компенсационных стержней. Предложено решение задачи управления энергораспределением как при незначительных отклонениях мощности каналов от допустимых значений, так и в аварийной ситуации при стремлении мощности к критическому уровню.

Ключевые слова: энергораспределение, управление, ядерный реактор, компенсационные стержни, сети Петри, моделирование.

Control by Power Distribution of Nuclear Reactor on the Basis of the Petry Nets

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 14.01.2019 y.; received in final form 16.01.2019 y.

Abstract

In the article offered approach to the decision of problem of effective control by power distribution on volume of active zone of reactor with the use of vehicle of the Petry nets. Expansion of the Petry net is developed, allowing to reduce the dimension of description of power distribution and promote the fast-acting of choice of position of compensative bars. Solution of task of control by power distribution both at insignificant deviations of power of channels from the legitimate values is offered and in an emergency situation at aspiration of power to the critical level.

Keywords: power distribution, control, nuclear reactor, the Petry nets, simulation.

Введение

Среди функций автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) ядерными реакторами наиболее сложной является оптимизация энергораспределения по объему активной зоны [1-5].

Выравнивание энергораспределения в больших энергетических реакторах является необходимым условием эксплуатации, а оптимизация положения стержней регулирования – трудоемкий процесс, который сводится к необ-

ходимости перебора большого числа вариантов. Качество и скорость решения задачи управления энергораспределением в большой мере зависят от опыта оператора.

Применение ЭВМ разгружает оператора, позволяет получить более выровненное энергораспределение. ЭВМ может применяться в режиме советчика оператора или в режиме замкнутого контура регулирования.

В настоящее время в замкнутом контуре регулирования применяются системы логико-

программного управления или адаптивные системы регулирования.

Снижение трудоемкости алгоритмов оптимизации управления энергораспределением актуально в настоящее время. Проблема быстрогодействия программ управления обусловлена выбором математического аппарата, используемого как основа для моделирования процессов в активной зоне реактора.

Современные системы АСКУ для описания процесса используют системы линейных уравнений и множество ограничений. Поскольку необходимо учесть корреляцию между компенсационными стержнями в различных каналах активной зоны, размерность описание процесса пропорциональна квадрату количества каналов активной зоны. Представляется, что сократить такое описание не возможно, но можно уменьшить количество операций, выполняемых вычислительной машиной для определения положения компенсационных стержней с целью либо поддержания энергораспределения на определенном уровне при нормальном течении процесса, либо в случае аварийной ситуации, характеризующейся критическим превышением энерговыделения в канале.

В настоящее время широко обсуждается вопрос применение нейросетевых технологий для управления сложными объектами [6]. Однако при моделировании предполагается функционирование всей нейронной сети в момент изменения входного воздействия. Размерность нейронной сети, описывающей энергораспределение активной зоны реактора, велика. Ее сложность соизмерима с задачей решения системы линейных уравнений. Применение существующих нейронных сетей не даст зримого увеличения быстрогодействия по сравнению используемыми на практике алгоритмами управления энергораспределением.

В статье предлагается для реализации алгоритма управление использовать математический аппарат сетей Петри [7]. Сети Петри позволяют описывать недетерминированную динамику процесса, значительно (на несколько порядков) сокращая время моделирования, при размерности сети, соответствующей размеру нейронной сети, за счет возможности, определенной математическим аппаратом, в конкретный момент времени рассматривать лишь небольшой фрагмент сети Петри (СП) [8].

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка подхода к управлению энергораспределением в активной зоне реактора в проектных и запро-

ектных режимах работы на основе математического аппарата сетей Петри.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) создание расширения сетей Петри, позволяющего моделировать процесс управления с наименьшими временными затратами; 2) создание описания сетью Петри процесса управления в проектном режиме; 3) создание описания сетью Петри процесса управления в аварийном режиме при стремлении мощности канала к критической.

Определение расширения сетей Петри для решения задачи управления энергораспределением в активной зоне реактора

Приведем определения сети Петри [7].

Сеть Петри S является четверкой $S = (P, T, I, O)$. $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – конечное множество позиций, $n \geq 0$. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – конечное множество переходов, $m \geq 0$. Множество позиций и множество переходов не пересекаются, $P \cap T = \emptyset$. $I: T \rightarrow P^\infty$ – является входной функцией-отображением из переходов в комплекты позиций. $O: T \rightarrow P^\infty$ – есть выходная функция-отображение из переходов в комплекты позиций. Позиция p_i является входной позицией перехода t_j том случае, если $p_i \in I(t_j)$; p_i является выходной позицией перехода t_j , если $p_i \in O(t_j)$.

Граф G сети Петри есть двудольный ориентированный мультиграф. $G = (V, A)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$ – множество вершин, а $A = \{a_1, a_2, \dots, a_r\}$ – комплект направленных дуг, $a_i = (v_j, v_k)$, где $v_j, v_k \in V$. Множество V может быть разбито на два непротиворечивых подмножества P и T , таких что $V = P \cup T$, $P \cap T = \emptyset$ и для любой направленной дуги $a_i \in A$, если $a_i = (v_j, v_k)$, тогда либо $v_j \in P$ и $v_k \in T$ либо $v_j \in T$, а $v_k \in P$.

Маркировка μ сети Петри $S = (P, T, I, O)$ есть функция, отображающая множество позиций P в множество неотрицательных чисел N .

$\mu: P \rightarrow N$.

Маркировка μ может быть также определена как n -мерный вектор $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$, где $n = |P|$ и каждое $\mu_i \in N$, $i = 1, 2, \dots, n$. Вектор μ определяет для каждой позиции p_i сети Петри количество фишек в этой позиции.

Маркированная сеть Петри $M = (S, \mu)$ есть совокупность сети Петри $S = (P, T, I, O)$ и маркировки μ и может быть записана в виде

$M = (P, T, I, O, \mu)$.

Выполнением сети Петри управляют количество и распределение фишек в сети.

Переход $t_j \in T$ в маркированной сети Петри $C = (P, T, I, O)$ с маркировкой μ разрешен, если для $p_i \in P$ $\mu(p_i) \geq \#(p_i, I(t_j))$.

На основе сетей Петри разработано достаточно большое число моделей различной целевой направленности. Как правило, эти модели содержат некоторые дополнительные атрибуты (по сравнению с обычными сетями Петри) и поэтому называются расширениями данного аппарата.

Существует множество различных вариантов описания сложных систем, каждый из которых отражает стремление решить проблему сложности и точности. Приведем основные из них.

Ингибиторные сети. Это сети $N = (P, T, I, O, \alpha_i, \alpha_o)$, где $\alpha_i : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$, $\alpha_i \cap I = \emptyset$ функция входных инцидентов, задающая ингибиторные (запрещаю) ребра. В ингибиторных сетях на правила возбуждения перехода t накладывается дополнительное требование – отсутствие маркера во всех запрещающих позициях перехода.

Приоритетные сети. Это сети, учитывающие приоритетные соотношения между переходами. В приоритетных сетях при наличии двух и более переходов срабатывать может лишь переход, имеющий высший приоритет.

Сети с цветными маркерами (цветные). В этих сетях каждому переходу ставится в соответствие функция, определяющая маркирование выходных позиций в зависимости от цветов входных маркеров. В отличие от обычных сетей Петри, это позволяет различать маркеры, их перемещение по сети и существенно упрощать графическую модель системы.

Структурированные сети. Эти сети являются обобщением регулярных сетей и служат для моделирования иерархических систем, которые наряду с неделимыми компонентами содержат составные компоненты, сами представляющие собой системы.

Известны расширения сетей Петри, в которых кратность ребер не является постоянной. К ним относятся самомодифицируемые и предикатные сети. В самомодифицируемых сетях кратность ребра может задаваться как натуральным числом N , так и числом маркеров в некоторой позиции этой же сети. В последнем случае кратность ребра изменяется в процессе функционирования сети и равна текущему числу маркеров в указанной позиции.

Дальнейшим обобщением цветных и самомодифицируемых сетей, позволяющим отобразить определенные отношения между различными маркерами, являются предикатные сети. В них кратность дуг можно задавать в виде некоторого выражения, кроме того, каждому переходу может соответствовать предикат $Pr(t)$. Причем, условия возбуждения перехода дополняются требованием истинности соответствующего предиката, т.е. переход t в предикатной сети может срабатывать, если в его входных позициях присутствует требуемое число маркеров соответствующих цветов и если $Pr(t) = true$.

Перечисленные выше модели предназначены для описания логики функционирования (синтаксиса) децентрализованных параллельных систем. Возможно и более полное описание систем, отображающих как потоки управления, так и потоки данных (функций). Такими моделями являются функциональные и сходные с ними числовые и оценивающие сети. В них поток управления описывается предикатной сетью, а действие над объектом (над данными) – функциями, приписанными каждому переходу. При срабатывании перехода неделимым образом выполняется действие, связанное с этим переходом, и выполняется соответствующее перемещение маркеров.

Оценивающие сети (Е-сети) были разработаны для облегчения понимания работы вычислительных систем и их моделирования. Для сохранения удобства и наглядности при увеличении сложности модели системы используют макро-Е-сети. Макросети позволяют формировать в виде «макро» часто используемые структуры, поддерживая визуальную ясность для понимания работы системы и не теряя возможности машинной интерпретации.

Существуют расширения сетей Петри, с помощью которых некоторые характеристики функционирования систем можно определить аналитически. К ним относятся временные и стохастические сети.

Различные варианты стохастических сетей Петри связаны с введением в сеть Петри вероятностных атрибутов (вероятностей или плотностей вероятностей срабатывания возбужденных переходов).

Для реализации управления энерговыделением предлагается использовать синтез стохастической и функциональной сетей Петри. Вероятности, приписанные дугам, могут принимать значения либо 0, либо 1. Позиция сети содержит один маркер. Стирание маркера в позиции осуществляется после рассмотрения всех

переходов, для которых данная позиция является входной.

Правило срабатывания перехода предложенной СП следующее. Переход активен, если хотя бы в одной его входной позиции имеется маркер и дуге, соединяющей эту позиции с переходом, сопоставлена вероятность, равная единице, а также истинен предикат, приписанный данному переходу.

Рассмотрим применение предложенного расширения СП для решения поставленных задач.

Управление компенсационными стержнями при поддержании энергораспределения на заданном уровне

Представляется, что колебания энерговыделения в активной зоне при внесении дополнительной реактивности с учетом ее знака (положительная реактивность – «+», отрицательная реактивность – «-») определяется скоростью перемещения стержня V_{CT} и частотой акустического шума теплоносителя, зависящей от скорости протекания процесса теплообмена в канале.

Длина волны энергораспределения при введении реактивности i -й канал соответствует длине звуковой волны в рассматриваемом канале

$$\lambda_i = \frac{V_A}{f_i}, \quad (1)$$

где V_A – скорость звука в теплоносителе; f_i – частота акустических шумов теплоносителя в i -м канале (Гц).

Частота волны энергораспределения при введении реактивности i -й канал определяется формулой

$$\omega_i = 2\pi \frac{V_{CT}}{\lambda_i}, \quad (2)$$

где V_{CT} – скорость стержня (считаем ее постоянной); λ_i – длина волны энергораспределения.

При введении стержня в канал образуется энергетическая воронка в поле энерговыделения, аналогично при извлечении наблюдается всплеск энергии. Диаметр основания воронки/всплеска в соответствии с функцией Бесселя соответствует $3\pi/2$, т.е. $3\lambda/4$. Для простоты имитации процесса в области радиусом $\lambda/8$ изменение энерговыделения будем считать постоянным.

Учитывая принятые допущения и (1-2), предлагается описывать волновой процесс из-

менения энергораспределения при введении (выведении) компенсационного стержня в i -й канал следующей функцией

$$A(r, f_i) = \begin{cases} 1,5 \exp\left(-r + \frac{V_A}{8f_i}\right) \cos\left(2\pi \frac{f_i}{V_A} r - \frac{\pi}{4}\right), & \text{если } r > \lambda/8, \\ 1, & \text{если } r \leq \lambda/8 \end{cases} \quad (3)$$

где r – расстояние от центра i -о канала; V_A – скорость звука в теплоносителе; f_i – частота акустических шумов теплоносителя в i -м канале (Гц).

Исходя из (3), изменение мощности в радиусе r от центра i -о канала определяется формулой

$$\Delta Q_i(r, f_i) = \Delta Q_{ki} A(r, f_i), \quad (4)$$

где ΔQ_{ki} – изменение мощности, вносимой k -м стержнем в i -й канал.

Изменение мощности в i -м канале в линейном приближении можно записать в виде [2]

$$\Delta Q_{ki} = a_{ki} \cdot \delta p_{ki},$$

где a_{ki} – коэффициент связи мощности, вносимой реактивностью δp_{ki} в i -м канале.

Требуемое изменение мощности в i -м канале для поддержания энергораспределения определяется соотношением

$$\Delta Q_i^* = Q_i - Q_{iDOP}, \quad (5)$$

где Q_i – текущая мощность i -о канала; Q_{iDOP} – допустимая мощность i -о канала.

Если для устранения неравномерности энергораспределения достаточно реактивности органов регулирования, т.е. величина δp_{ki} для всех стержней находится в допустимом диапазоне при требуемой величине ΔQ_i^* , то нет необходимости производить поиск эквивалентной схемы, включающей несколько стержней, для обеспечения реактивности δp_{ki} . Характеристики исполнительных механизмов обеспечивают поддержание энергораспределения. В этом случае управление энергораспределением описывается СП, приведенной на рис. 1. Данная СП реализует синхронное моделирование.

Рассмотрим особенности функционирования данной СП.

Первоначально в сети Петри все вероятности, кроме $p_{ii}=1$, обнуляются и маркеры стираются. В исходную позицию S_0 помещается маркер, если хотя бы мощность одного канала пре-

вышает допустимую. Позиции S_0 сопоставляется вектор отклонений ΔQ_{0i} мощности в соответствии с (5).

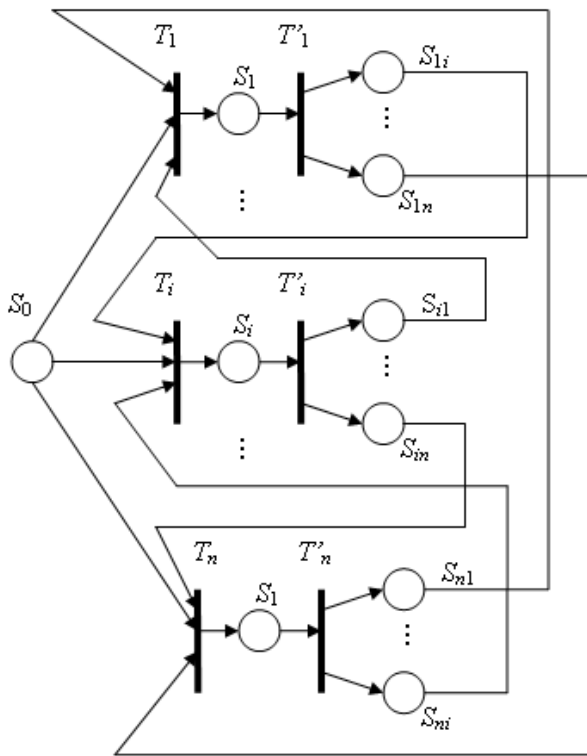


Рис. 1. Сеть Петри, моделирующая управляющие воздействия для поддержания энергораспределения на заданном уровне.

Переходу T_i ($i = \overline{1, n}$) соответствует i -й канал. Дугам, связывающим S_0 и T_i ($i = \overline{1, n}$) сопоставляется вероятность

$$p_{0i} = \begin{cases} 1, & \text{если } Q_i > Q_{iDOP} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Переход T_i ($i = \overline{1, n}$) является безусловным. Входной позиции S_{ji} ($i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}, i \neq j$) перехода T_i соответствует значение мощности ΔQ_{ji} , переносимой волновым процессом от j -о канала к i -у каналу.

Переход T_i срабатывает, если на его входе есть дуги с ненулевыми вероятностями, соединяющие переход с маркированными позициями. При его срабатывании вычисляется значение

$$\Delta_i = \sum \Delta Q_{ji} \quad (6)$$

В выражении (6) рассматриваются значения ΔQ_{ji} ($i = \overline{0, n}; j = \overline{1, n}$), сопоставленные только

позициям с маркерами. Позиции S_i сопоставляется Δ_i , маркер помещается в данную позицию, $p_{ij} := 0$ ($i = \overline{0, n}$).

Переход T'_i срабатывает, если в позиции S_i есть маркер, и истинен предикат

$$\text{Pr} : \{ |Q_i + \Delta_i| > Q_{iDOP} \}.$$

Активизация перехода запускает работу следующего алгоритма расчета изменения мощности.

1. Определяем значения

$$\Delta Q_i(r_{ij}, f_i) = \Delta_i \cdot A(r_{ij}, f_i) \quad (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}, i \neq j).$$

2. Для всех $i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}, i \neq j$ если $\Delta Q_i(r_{ij}, f_i) > \varepsilon$, то $\Delta Q_{ij} := \Delta Q_i(r_{ij}, f_i)$, $p_{ij} := 1$ и помещается маркер в позицию S_{ij} , иначе позиция S_{ij} не помечается.

Когда алгоритмы всех переходов T_i ($i = \overline{1, n}$) завершили работу, первый такт выполнен, и начинается второй такт моделирования. Моделирование продолжается до тех пор, пока может быть активизирован хотя бы один из переходов.

В результате работы сети позиция S_i ($i = \overline{1, n}$) содержит значение Δ_i , определяющее изменение мощности, которое необходимо внести компенсационным стержнем в i -й канал.

Управление компенсационными стержнями при критическом превышении энерговыделения в канале

Рассмотрим случай, когда невозможно понизить мощность в канале до допустимой величины, используя один компенсационный стержень.

При таком варианте развития событий необходимо найти схему перемещения нескольких компенсационных стержней, позволяющую учитывая волновые процессы в активной зоне, используя колебания энергии в противофазе. При реализации такого подхода предлагается для описания каждого канала ввести дополнительно переход T''_i , для которого позиция S_i является выходной (рис. 1). Фрагмент сети Петри, определяющий необходимые изменения для рис. 1, приведен на рис. 2.

Функции переходов T_i изменятся следующим образом.

При срабатывании перехода T_i вычисляются два значения

1) $\Delta'_i = Q_{KP} - \sum \Delta Q_{ji} + \Delta Q_{ki}^{\max A}$ ($\Delta Q_{ki}^{\max A}$ – максимальная мощность, которой располагает k -й стержень в текущий момент времени при его вводе);

2) $\Delta_i = \Delta Q_{ki}^{\max}$.

Позиции S_i сопоставляются уже два значения Δ_i и Δ'_i .

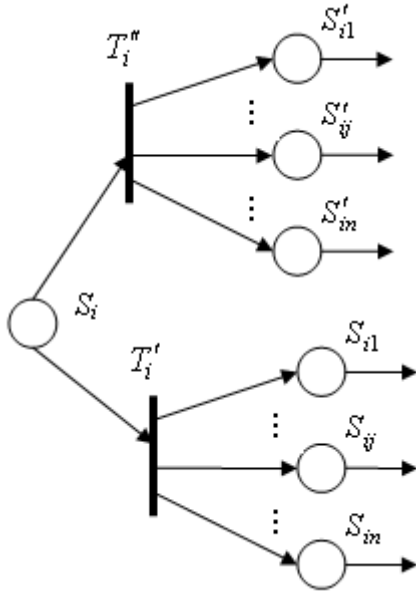


Рис. 2. Фрагмент сети Петри, позволяющий моделировать управляющие воздействия при критическом превышении энерговыделения в канале.

Переход T''_i является условным. Его срабатывание происходит, если $\Delta'_i > 0$. При активизации перехода T''_i алгоритм расчета изменения мощности включает следующие действия.

1. Формируем множество L номеров (j) каналов, находящихся от i -го канала на расстоянии кратном половине длины волны, вызванной возможным извлечением стержня из j -о канала:

$$r_{ji} = \frac{5\lambda_j}{8} \quad \text{или} \quad r_{ji} = \frac{9\lambda_j}{8}.$$

2. Определяем для элементов множества L $\Delta''_j = \min\{Q_{KP} - Q_j; \Delta Q_{ki}^{\max B}\}$ ($\Delta Q_{ki}^{\max B}$ – максимальная мощность, которой располагает k -й стержень в текущий момент времени при его извлечении).

3. Удаляем из множества L номера каналов, для которых $\Delta''_j < \varepsilon$.

4. Определяем значения

$$\Delta Q_j(r_{ji}, f_j) = \Delta''_j \cdot A(r_{ji}, f_j)$$

$$(i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}, i \neq j).$$

5. Упорядочиваем номера каналов в множестве L по убыванию $\Delta Q_j(r_{ji}, f_j)$.

6. Определяем m первых элементов множества L , дающих следующее соотношение

$$\Delta'_i \approx \sum_{z=1}^m \Delta Q_z, \text{ и получаем множество номеров } (l_1, l_2, \dots, l_m).$$

7. Помечаем позиции $S'_{il_1}, S'_{il_2}, \dots, S'_{il_m}$ маркерами и сопоставляем им значения $\Delta Q_{l_1}, \Delta Q_{l_2}, \dots, \Delta Q_{l_m}$. Для этих позиций исходящим дугам присваиваем единичные значения вероятностей.

Дальнейшее функционирование СП соответствует приведенному выше описанию для рис. 1.

Заключение

Предложен подход к решению проблемы эффективного управления энергораспределением по объему активной зоны реактора с использованием аппарата сетей Петри. Разработано расширение сети Петри, позволяющее снизить размерность задачи и повысить на порядок быстродействие процесса моделирования расположения компенсационных стержней. Предложено решение задачи управления энергораспределением как при незначительных отклонениях мощности каналов от допустимых значений, так и в аварийной ситуации при стремлении мощности к критическому уровню.

Показано преимущество сетей Петри по сравнению с нейронными сетями и алгоритмами, основанными на переборе и системах линейных уравнений и неравенств.

Управление энергораспределением на основе сетей Петри является перспективным направлением в развитии автоматизированных систем контроля и управления ядерным реактором.

Список литературы

1. Бахмач Е.С. Программно-технические комплексы автоматического регулирования, разгрузки и ограничения мощности реактора и ускоренной предупредительной защиты: обеспечение и оценка безопасности / Е.С. Бахмач, С.В. Виноградская, К.В. Розен и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – №1. – С. 67-90.

2. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами/ И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; Под общ. ред. акад. Н.А. Доллежала – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
3. Емельянов И.Я. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов / И.Я. Емельянов, П.А. Гаврилов, Б.Н. Селиверстов – М.: Атомиздат, 1975. – 280с.
4. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками – К.: Техника, 1988. –256с.
5. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков – СПб.: Наука, 2000. –382 с.
6. Шаповалова С.И., Шараевский Г.И. Среда моделирования нейронных сетей для решения задач диагностики оборудования АЭС // Проблемы программирования – 2008. – № 2–3. – С. 675–678.
7. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем /Д. Питерсон – М.: Мир, 1984. – 264с.
8. Качур С.А. Модель стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри/ С.А. Качур // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №1. – С.93-98.
7. Piterson D. *Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem* [Theory of the Petry nets and systems simulation] Moscow , Mir, 1984, 264 p.
8. Kachur S.A. Model of the stochastic systems and their combination on the basis of the Petry nets. *Problemy upravleniya i informatiki*, 2002, No.1, pp. 93-98

References

1. Bahmach E.S., Vinogradskaya S.V., Rozen K.V. Programmatic-technical complexes of automatic control, unloading and limitations of power of reactor and speed-up preventive sewn up: providing and estimation of safety. *Yadernya i radiacionnaya bezopasnost'*.2005, No1, pp.67-90.
2. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical government bases by nuclear reactors]. Moscow, Energoizdat, 1981. 360p.
3. Emel'yanov I.Ya., Gavrilov P.A., Seliverstov B.N. *Upravlenie i bezopasnost' yadernyh energeticheskikh reaktorov* [Control and safety of nuclear power reactors]. Moscow, Atomizdat, 1975. 280p.
4. Eremenko V.A. *Puti obespecheniya bezopasnogo upravleniya atomnymi energeticheskimi ustanovkami* [Ways of providing of safe management by the atomic power plants]. Kiev, Techika, 1988. 256p.
5. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Adaptive control by the difficult dynamic systems]. SPb, Nauka, 2000. 382 p.
6. Shapovalova S.I., Sharoevsij G.I. Environment of design of neuron nets for the decision of tasks of diagnostics of equipment of APP. *Problemy hrogrammirovaniya*, 2008, № 2-3, pp. 675-678.