

УДК 621.039.56

## Модель функционирования системы наведения перегрузочных машин АЭС на основе сетей Петри

С.А. Качур<sup>1</sup>, Н.В. Шахова<sup>2</sup>, А.А. Халина<sup>3</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>kachur\_62@mail.ru, <sup>2</sup>nata\_shachova\_73@mail.ru,  
<sup>3</sup>halina Bakanov\_dan@yandex.ru

Статья поступила 04.04.2017 г.; после доработки 05.04.2017 г.

### Аннотация

Предложен подход к исследованию перегрузочной машины как сложной стохастической системы на основе математического аппарата сетей Петри. Разработана сетевая модель системы наведения перегрузочных машин. Способности моделей на базе сетей Петри к самообучению при автоматическом наведении перегрузочной машины позволяет сократить сроки работ по перегрузке ядерного топлива и повысить безопасность этих работ.

**Ключевые слова:** перегрузочная машина, реактор, система наведения, модель, сети Петри.

## Functioning Model of the Aiming System of Shifting Machines of APP on the basis of the Petry Nets

S.A. Kachur, N.V. Shahova, A.A. Halina

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, <sup>1</sup>kachur\_62@mail.ru,  
<sup>2</sup>nata\_shachova\_73@mail.ru, <sup>3</sup>halina Bakanov\_dan@yandex.ru

Received 04.04.2017 y.; received in final form 05.04.2017 y.

### Abstract

Offered approach to research of shifting machine as difficult stochastic system on the basis of mathematical vehicle of the Petry nets. The network model of the aiming system of shifting machines is developed. On the base of the Petry nets to self-training at the automatic aiming of shifting machine allows the capabilities of models to reduce the terms of works on the overload of nuclear fuel and extend safety of these works.

**Keywords:** machine, reactor, aiming system, model, the Petry nets.

### Введение

Безопасность работ при транспортировке, перегрузке и хранению тепловыделяющих сборок (ТВС) обеспечивается высокой профессиональной квалификацией персонала и степенью автоматизации систем перегрузочных машин [1, 2].

На выбор системы наведения большое влияние оказывает конструкция активной зоны реактора. В тех случаях, когда местоположение каждого канала является строго постоянным, можно состав-

вить точную картину расположения каналов. В этом случае выбор системы наведения не вызывает сколько-нибудь серьезных затруднений. Иначе обстоит дело, когда положение каналов неизвестно и под действием тепловых и физических напряжений каждый канал отходит от своего начального положения. В настоящее время актуальна разработка систем автоматизации с элементами интеллектуального управления. Одним из подходов при решении задач автоматизации управления сложными стохастическими системами и процессами

является использование математического аппарата сетей Петри (СП) [3].

В работе используются возможности данного аппарата для описания процесса наведения перегрузочных машин реакторов типа ВВЭР. При автоматическом наведении перегрузочной машины использование способности моделей на базе СП к самообучению позволяет сократить сроки работ по перегрузке ядерного топлива и, следовательно, повысить безопасность этих работ. В процессе функционирования перегрузочной машины за счет изменения шага дискретизации при обучении СП автоматически повышается точность наведения.

При дистанционном наведении необходимо, чтобы оператор быстро определял шаг и направление движения для вывода перегрузочной машины в точку с заданными координатами в активной зоне или хранилище отработавших ТВС. Подобные навыки развивает предлагаемая программная система тренинга.

### Цель и задачи исследования

Целью исследования является создание модели функционирования перегрузочной машины АЭС с реакторами типа ВВЭР для повышения точности и сокращения времени наведения с использованием математического аппарата сетей Петри.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) выполнить анализ особенностей функционирования систем наведения перегрузочных машины для реакторов типа ВВЭР; 2) определить конкретный математический аппарат, позволяющий описывать сложные стохастические объекты, к которым относятся и перегрузочная машина ВВЭР; 3) разработать модель функционирования системы наведения перегрузочной машины ВВЭР на основе выбранного математического аппарата.

### Особенности систем перегрузки ядерного топлива на энергоблоке с ВВЭР

Перегрузка ядерного топлива (ЯТ) на энергоблоке (ЭБ) с ВВЭР осуществляется при полностью остановленном ядерном реакторе (ЯР) и обычно совмещается с ремонтом оборудования ЭБ для ВВЭР перегрузка ЯТ имеет две важные особенности [1]:

- 1) перегрузка топлива связана с изменением геометрии активной зоны ЯР;
- 2) перегрузка топлива оказывает особое влияние на остаточное тепловыделение в активной зоне ЯР.

Первая особенность во многом определяет ядерную безопасность ЭБ, а вторая требует организации сложных технологических систем охлаждения из-за необходимости сохранения в работе тепломеханического и электромеханического оборудования, насосов, средств и приборов контроля.

Для построения модели в качестве примера рассмотрим особенности работы перегрузочной машины без контейнера с подвижным скафандром [4]. Перегрузочная машина с такой компоновкой установлена на реакторе МЗФР в ФРГ. Ее компоновка напоминает компоновку перегрузочной машины АЭС «Хартлпул». Отличие заключается в том, что перегрузочная машина реактора МЗФР не имеет контейнера биологической защиты и поэтому скафандр подвешен к тележке реакторного крана на шести гидроцилиндрах, рабочей жидкостью в которых является теплоноситель реактора.

Во время процесса перегрузки реактора перегрузочная машина совершает перемещения по перегрузочной площадке реактора между технологическими каналами, осуществляя стыковку с ними. Операция стыковки перегрузочной машины с технологическими каналами ядерного реактора – одна из наиболее сложных операций технологического процесса перегрузки топлива. Она состоит из нескольких переходов: выход к определенному технологическому каналу с заданной точностью, стыковка с технологическим каналом, уплотнение и разуплотнение с технологическим каналом после удаления отработанного и установки свежего топлива.

Для осуществления стыковки перегрузочная машина должна выйти с определенной точностью на заданную координату, при этом операционное время выхода на координату необходимо выдерживать с учетом оптимальных возможностей физического принципа выхода на координату. Контейнер перегрузочной машины должен быть точно выверен с технологическими каналами реактора до начала операции по перегрузке, так как передача больших радиальных сил на каналы недопустима. Кроме того, тепловыделяющая сборка может иметь большую длину (около 18 м), и несовпадение оси технологического канала с осью гнезда магазина перегрузочной машины может быть причиной повреждения тепловыделяющей сборки при ее извлечении из канала реактора вследствие чрезмерного ее изгиба.

На выбор системы наведения большое влияние оказывает конструкция активной зоны реактора. В тех случаях, когда местоположение каждого канала является строго постоянным, можно составить точную картину расположения каналов. В этом случае выбор системы наведения не вызывает сколько-нибудь серьезных затруднений. Иначе

обстоит дело, когда положение каналов неизвестно и под действием тепловых и физических напряжений каждый канал отходит от своего начального положения.

С целью сокращения перегрузочного цикла путем уменьшения времени выхода перегрузочной машины на заданную координату и для достижения более точного совмещения оси канала реактора с осью гнезда магазина перегрузочной машины систему наведения, как правило, проектируют двухступенчатой. Первая ступень – это грубый выход на координату, вторая ступень – ступень точного выхода.

Выбор системы наведения оказывает влияние на конструкцию перегрузочной машины. Ниже рассмотрены следующие системы наведения:

1. система точного наведения перегрузочной машины с применением аналогового и цифрового управляющих устройств;
2. система точного наведения перегрузочной машины с применением отклоняющей электромеханической системы;
3. система точного наведения перегрузочной машины с применением оптико-телевизионной системы и системы реперов.

Рассмотрим первый тип систем систему аналогового и цифрового управления.

В патенте ФРГ приведены описание и схема системы точного выхода перегрузочной машины на заданную координату в прямоугольной системе координат. Для каждого направления координат предусмотрен свой привод. При этом для каждого привода существуют два различных независимых друг от друга управляющих устройства. Оба эти устройства работают параллельно с разной точностью и оснащены спаренными датчиками, которые содержат сопротивления, соответствующие рабочим позициям, или установочные устройства для заданного числа импульсов. Кроме того, имеется отклоняющее устройство для обоих управляющих устройств, причем точка отклонения управляющих устройств находится внутри пробега другого управляющего устройства.

Одно управляющее устройство работает по аналоговому способу. Этот способ заключается в том, что каждому применению перегрузочной машины в координатной плоскости соответствует определенная величина сопротивления. Осуществляется это при помощи потенциометра расположенного на перегрузочной машине, скользящий контакт которого перемещается пропорционально пройденному пути. Перемещение перегрузочной машины при этом длится до тех пор, пока не установится равновесие моста между величиной сопротивления потенциометра и сопротивлением,

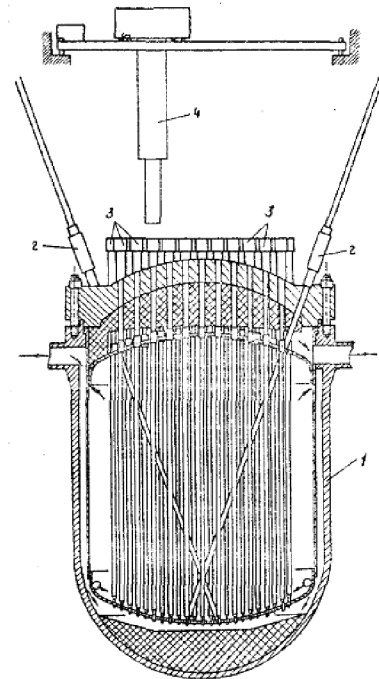
находящимся вне реактора, которое соответствует нормальному положению перегрузочной машины. По аналоговому принципу положение перегрузочной машины отмечается, например, при помощи световых пятен на щите индикаторного прибора.

Другое управляющее устройство, параллельное аналоговому, работает по цифровому принципу. Этот принцип основан на отсчете импульсов. По этому принципу очень легко можно установить точно перегрузочную машину в конечное положение, поскольку повторение импульсов на единицу длины практически может быть любым.

Аналоговая система, обладая по сравнению с цифровой системой преимуществом наглядности, служит исключительно для грубого управления перегрузочной машиной во время движения.

Достоинством параллельного перемещения двух различных систем управления является то, что при нарушении одной системы другая выполняет общее управление перегрузочной машиной. При нарушении аналоговой системы это происходит автоматически, наглядный контроль осуществляется при помощи индикаторов. Визуальный контроль возможен и при цифровой системе, так как число импульсов, установленное для пути перегрузочной машины в координатной системе, фиксируется оптическим устройством.

На рис. 1 представлена схема реактора, из крышки которого выходят топливные каналы.



**Рис. 1.** Схема реактора МЗФР и перегрузочной машины: 1 – реактор; 2 – регулирующие стержни; 3 – головки технологических каналов; 4 – перегрузочная машина.

Принятая система наведения позволила выполнить скафандр подвижным относительно средства его перемещения и осуществлять стыковку путем опускания скафандра на перегружаемый канал. Для этого скафандр устанавливается на шести гидравлических домкратах, закрепленных на тележке мостового крана. Подобное решение дало возможность отказаться от телескопического стыковочного патрубка и упростило систему уплотнения перегрузочной машины и ядерного реактора.

### Описание функционирования перегрузочных машин АЭС на основе сетей Петри

Область применения моделей на базе сетей Петри обширна и многогранна.

С помощью моделей СП решаются различные задачи, связанные с определением траектории движения системы в условиях неопределенности [5]. К классу таких задач относятся повышение точности наведения перегрузочных машин АЭС.

Для описания подобных объектов будет использована расширенная сеть Петри, предложенная в [5].

При изменении положения технологического канала реактора под действием тепловых и физических напряжений для сокращения пере-

грузочного цикла обычно применяют двухступенчатую систему наведения (первая ступень – грубый выход на координату, вторая ступень – точный выход).

Двухступенчатый подход к реализации системы наведения можно описать СП, в которой переходам сопоставлены квадраты плоскости движения тележки мостового крана, дугам – вероятности перехода из одного квадрата в другой в соответствии с предысторией о дрейфе технологических каналов, позициям – точки принятия решения.

Маркер отражает движения или действия оператора перегрузочной машины. Кроме того, переходам сопоставлена модель движения перегрузочной машины внутри выбранного квадрата с учетом расстояния до интересующего объекта, представленная системой дифференциальных уравнений первого порядка.

Параметры модели случайны и определяют внешнюю ситуацию.

При снижении степени детализации описания поведения перегрузочной машины сетевая модель может быть использована для обучения персонала АЭС.

Описание модели представлено в форме таблиц (табл. 1 - 3), в которых дана интерпретация элементов сети Петри на рис. 2.

**Таблица 1.** Описание переходов модели.

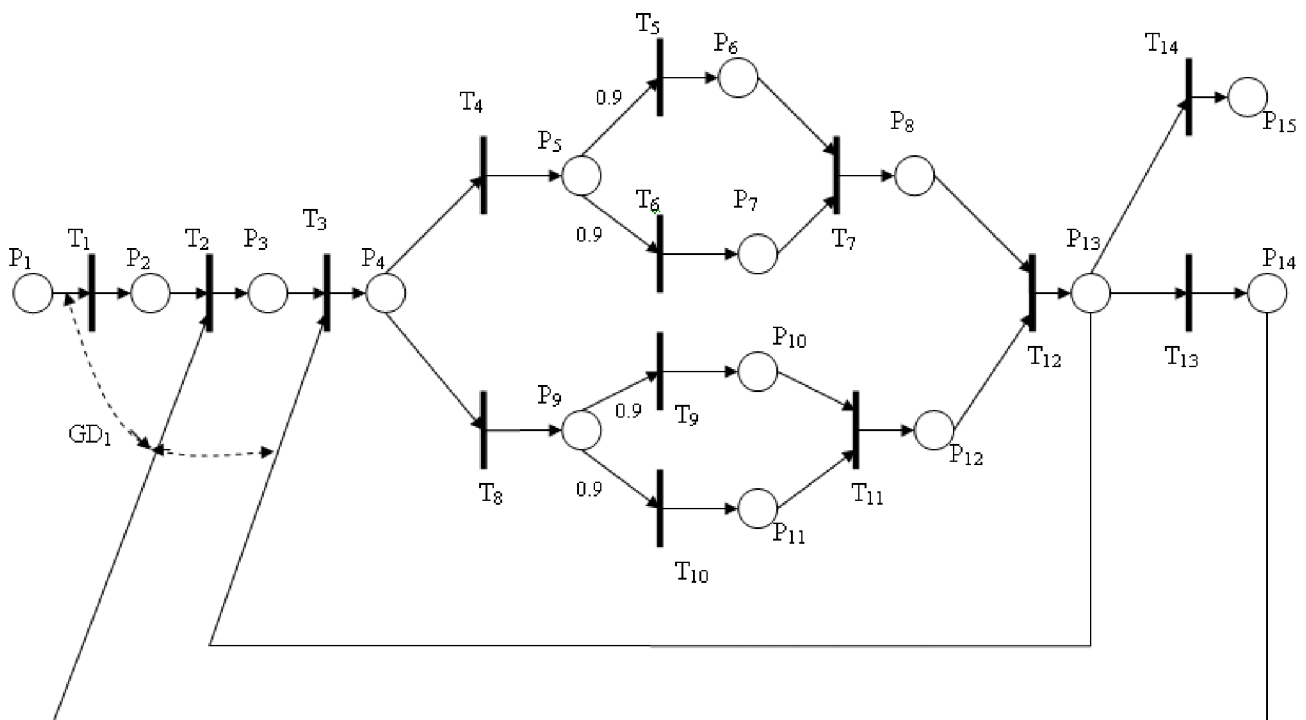
Номер перехода	Предикат, сопоставленный переходу	Функции, выполняемые при срабатывании перехода	Вектор входных позиций перехода
1	{1}	Установка исходных значений; установка вектора вероятностей для дуг, охваченных гипердугой $GD_1$ (1;0;0)	(1)
2	{Нажата кнопка «СТАРТ»}		(2;14)
3	{Объект с заданной точностью не обнаружен}	Чтение заданных координат и точности для цифрового устройства; установка вектора вероятностей для дуг, охваченных гипердугой $GD_1$ (0;0;1)	(3;13)
4	{Имеются изменения по координате X}		(4)
5	{1}	Формирование приращения координаты X для цифрового устройства	(5)
6	{1}	Формирование приращения координаты X для аналогового устройства	(5)
7	{1}	Формирование приращения координаты X	(6;7)
8	{Имеются изменения по координате Y}		(4)
9	{1}	Формирование приращения координаты Y для цифрового устройства	(9)
10	{1}	Формирование приращения координаты Y для аналогового устройства	(9)
11	{1}	Формирование приращения координаты Y	(10;11)
12	{1}	Отображение траектории движения; выдача рекомендаций	(8;12)
13	{Нажата кнопка «ДВИЖЕНИЕ»}	Установка вектора вероятностей для дуг, охваченных гипердугой $GD_1$ (0;1;0)	(13)
14	{Нажата кнопка «ВЫХОД»}		(13)

**Таблица 2.** Перечень рекомендаций при моделировании.

№	Условие выдачи рекомендации	Сообщение
1	Срабатывание перехода $T_1$	НАЧАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
2	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива не превышает допустимую точность	ОБЪЕКТ ОБНАРУЖЕН. НАЖМИТЕ КНОПКУ "ВЫХОД"
2	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива превышает интервал в 4 шага координатной сетки	ОБЪЕКТ ОЧЕНЬ ДАЛЕКО
3	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива находится в интервале от 4 до 2 шагов координатной сетки	ОБЪЕКТ ДАЛЕКО
4	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива находится в интервале от 2 до 1 шагов координатной сетки	ОБЪЕКТ БЛИЗКО
5	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива меньше 1 шага но больше допустимой точности	ОБЪЕКТ ОЧЕНЬ БЛИЗКО
6	Достигнуты установленные координаты	ЗАДАННЫЕ КООРДИНАТЫ (X, Y) ДОСТИГНУТЫ. ВВЕДИТЕ НОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И НАЖМИТЕ КНОПКУ "СТАРТ"

**Таблица 3.** Описание событийной гипердуги.

Название гипердуги	Дуги, охватываемые гипердугой					
	Дуга D <sub>1</sub>		Дуга D <sub>2</sub>		Дуга D <sub>3</sub>	
	№ входной позиции	№ перехода	№ входной позиции	№ перехода	№ входной позиции	№ перехода
GD <sub>1</sub>	1	1	14	2	13	3



**Рис. 2.** Модель системы наведения перегрузочной машины

Примечание: по умолчанию вероятности, сопоставленные выходным дугам, равны 1.

## Заключение

1. Анализ проблемы обеспечения безопасности перегрузки ЯТ позволил определить актуальность решения задачи управления системой наведения перегрузочной машины в случае, когда положение каналов неизвест-

но и под действием тепловых и физических напряжений каждый канал отходит от своего начального положения;

2. показано, что задача управления перегрузочной машиной является частным случаем задачи управления стохастическими системами и их соединениями. Использование

способности моделей на базе СП к самообучению при автоматическом наведении перегрузочной машины позволяет сократить сроки работ по перегрузке ЯТ и, следовательно, повысить безопасность этих работ;

3. при решении задачи дистанционного наведения необходимо, чтобы оператор быстро определял шаг и направление движения для вывода перегрузочной машины в точку с заданными координатами в активной зоне или хранилище отработавших ТВС. Развитие подобных навыков требует создания тренажеров.

### Список литературы

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций. / В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
2. Безсальный В.Т. Система управления перегрузочной машиной: обеспечение и оценка безопасности / В.Г. Безсальный, С.В. Виноградская, Ю.В. Розен и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – № 1. – С. 5-20.
3. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем /Д. Питерсон – М.: Мир, 1984. – 264с.
4. Дружинский И.А. Некоторые аспекты компоновки перегрузочных машин для ядерных реакторов/ И.А.Дружинский, Г.Н. Новиков, Л.И. Сабир-де-Рибас – М.: ЦНИИ и ТЭИ по атомной науке и технике, 1974. – 209с.
5. Качур С.А. Принятие решения о траектории движения на основе сетей Петри/ С.А. Качур // Сб. науч. тр. – Вып. 13. – Севастополь: СНИИЭиП, 2004. – С.176-180.
6. 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.

### References

1. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluatatsiya atomnyh stancij* [Exploitation of the atomic stations] Moscow, Energoatomizdat, 1999, 928 p.
2. Bezsalij V.T., Vinogradskaya S.V., Rozen Yu.V. Control system by a shifting machine: providing and safety evaluation. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*, 2005, No.1, pp. 5-20.
3. Piterson D. *Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem* [Theory of the Petry nets and systems simulation] Moscow, Mir, 1984, 264 p.
4. Druzhinskij I.A., Novikov G.N., Sabir-de-Ribas L.I. *Necotorye aspekty komponovki peregruzochnyh mashin yadernyh reaktorov* [Some aspects of arrangement of shifting machines for nuclear reac-

tors] Moscow, CNII i TEI po atomnoj nauke i tehnike, 1974, 209 p.

5. Kachur S.A. Decision-making about the motion trajectory on the basis of the Petry nets. *Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sebastopol, SNUYaE i P, 2004, No.13, pp. 176-180.
6. Kachur S.A. Model of the stochastic systems and their combination on the basis of the Petry nets. *Problemy upravleniya i infor*