

**В. Я. КОПП**, д-р тех. наук, проф. СевНТУ, Севастополь;  
**С. А. КАЧУР**, канд. тех. наук, доц. СНУЯЭиП, Севастополь

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ В СЛУЧАЕ НЕТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

Запропоновано рішення завдання настроювання вимірювальної системи, що включає кілька різних класів вимірників, для спостереження за об'єктом в умовах великої апіорної невизначеності. Розроблено структурну схему й модель вимірювальної системи з використанням мереж Петри. Застосування мережної моделі дозволяє знизити тимчасові витрати на одержання інформації про об'єкт і підвищити швидкодія алгоритмів керування.

**Ключові слова:** оптимальне керування, вимірювальна система, складна система, мережі Петри

Предложено решение задачи настройки измерительной системы, которая включает несколько разных классов измерителей, для наблюдения за объектом в условиях большой априорной неопределенности. Разработана структурная схема и модель измерительной системы с использованием сетей Петри. Применение сетевой модели позволяет снизить временные затраты на получение информации об объекте и повысить быстродействие алгоритмов управления.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, измерительная система, сложная система, сети Петри.

Solution of task of tuning of the measuring system including a few different classes of measuring devices is offered, for the supervision after an object in the conditions of large a priori vagueness. A flow diagram and model of the measuring system with the use of the Petri nets is developed. Application of net model allows to reduce temporal expenses on the receipt of information about an object and promote the fast-acting of algorithms of management.

**Keywords:** optimum management, measuring system, difficult system, the Petri nets.

**Введение.** Для ряда сложных систем, управление которыми должно осуществлять и в случаи нештатных ситуаций, существует необходимость разработки моделей, описывающих недетерминированную динамику поведения в различных состояниях в условия неопределенности, а также алгоритмов управления на их основе. Решению данной задачи посвящено большое количество работ, однако проблема повышения быстродействия при выработке управления сложными системами, в том числе при получении информации об объекте управления, остается актуальной и сегодня

### **Анализ проблемы**

Предположим, что объект управления описывается стохастическим дифференциальным уравнением [1, 2]. Если процесс смены состояний структуры  $L(t)$  удовлетворяет определенным марковским закономерностям, то совокупный процесс  $Y(t) = \{Y^{(1)}(t), \dots, Y^{(s)}(t)\}$  является марковским со случайной структурой в самом широком смысле. Цель управления для

каждого из состояний системы может быть различной, поэтому различными могут быть и критерии оптимальности. Формирование оптимальных управлений  $u(t)$  производится на основе измерений  $Z(t)$  фазовых координат системы.

В случае неточного измерения фазовых координат единственной информацией для формирования управления являются измерения. Процесс  $Z(t)$  несет в себе всю имеющуюся информацию о фазовых координатах системы  $Y(t)$  и ее текущем состоянии.

Структурная схема системы изображена на рис. 1, где КН – канал наблюдения выходного процесса; УУ – управляющее устройство. Так как текущее состояние системы в точности неизвестно и имеются лишь некоторые апостериорные данные о нем, то в ряде задач не удастся распределить управления по отдельным состояниям и приходится использовать единое управление  $u(t)$ .

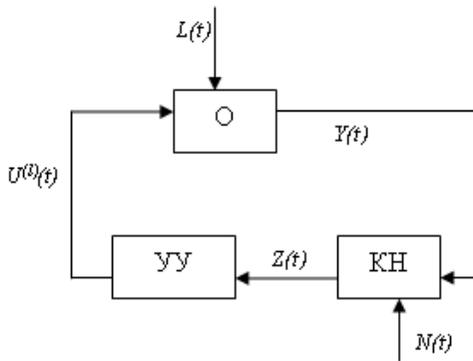


Рис. 1 – Структура системы при неточном измерении

Представляется, что при решении задачи оптимального управления целым этапом функционирования сложной системы в условиях априорно не заданной ситуации при жестких требованиях к быстрдействию [3] целесообразно использовать на практике приближенные алгоритмические подходы на основе сетевых моделей объекта, в частности сетей Петри (СП) [4, 5].

#### **Цель исследования, постановка задачи**

Цель исследования – разработка измерительной системы, предоставляющей достоверную информацию с требуемой скоростью для оптимального управления сложными системами в условиях аварийной ситуации.

Рассмотрим возможности использования моделей на базе СП [5] при решении задачи оптимального управления в общем виде для совокупности измерительных систем.

Каждая измерительная система представляет собой стохастическую систему. Связи между измерительными системами носят вероятностный характер и определяются в процессе функционирования системы в целом. Такая совокупность систем может быть описана СП, синтезирующей возможности стохастических и функциональных СП с введением сдерживающих событийных гипердуг при наличии ограничений, присущих простым СП [5]. Примером измерительной системы может служить множество телеметрических датчиков, входящих в состав радиотелеметрической системы (РТС).

Предположим, имеется ситуация, когда необходимо передать информацию об объекте  $O$  от  $m$  измерителей (датчиков), независимо работающих и подключающихся к объекту в различные моменты времени, определяемые состоянием рассматриваемого объекта. Передача информации от измерителей происходит по одному каналу наблюдения КН. Необходимо выбрать из каждого класса  $Q_i (i = \overline{1, n})$  не более одного измерителя  $D_j^{(Q_i)} (j = \overline{1, k_i})$ , наилучшим образом отражающему состояние объекта в текущий момент времени, и выполнить его настройку. Такая совокупность  $D_j^{(Q_i)}$  определяет текущую  $l$ -ю измерительную систему. Таким образом, в каждый момент времени может быть сформирована новая измерительная система на базе имеющихся классов объектов. Структурная схема системы управления измерителями приведена на рис. 2. Если выходным сигналам каждого класса измерителей сопоставить определенную полосу частот, то в каждый момент времени будем иметь РТС с частотным разделением каналов (число каналов  $k_l \leq n$ ).

Будем считать, что  $l$ -я измерительная система описывается уравнением следующего вида

$$\dot{Y}^{(l)} = (D^{(l)}(t) + A^{(l)}(t))\varphi^{(l)}(Y, t) + W^{(l)}(Y, t)F^{(l)}(t) + H^{(l)}(Y, t)V(t) + M^{(l)}(Y, t)U^{(l)}(t),$$

$$Y(t_0) = Y_0, \quad (1)$$

где  $Y(t)$  –  $m$ -мерный вектор фазовых координат;

$Y^{(l)}(t)$  –  $k_l$ -мерный вектор фазовых координат ( $Y^{(l)}(t) \subseteq Y(t)$ );

$D^{(l)}(t)$  –  $(k_l \times k_l)$ - матрица детерминированных параметров;

$A^{(l)}(t)$  –  $(k_l \times k_l)$ - матрица случайных параметров типа белого гауссова шума;

$\varphi^{(l)}(Y, t)$  –  $k_l$ -мерный вектор нелинейных функций;

$W^{(l)}(Y, t)$ ,  $H^{(l)}(Y, t)$  и  $M^{(l)}(Y, t)$  –  $(k_l \times k_l)$ -матрицы известных дифференцируемых по  $Y$  функций;

$F^{(l)}(t)$  –  $k_l$ -мерный вектор входных сигналов;

$V(t)$  –  $k_l$ -мерный вектор гауссова белого шума;

$U^{(l)}(t)$  –  $k_l$ -мерный вектор управления.

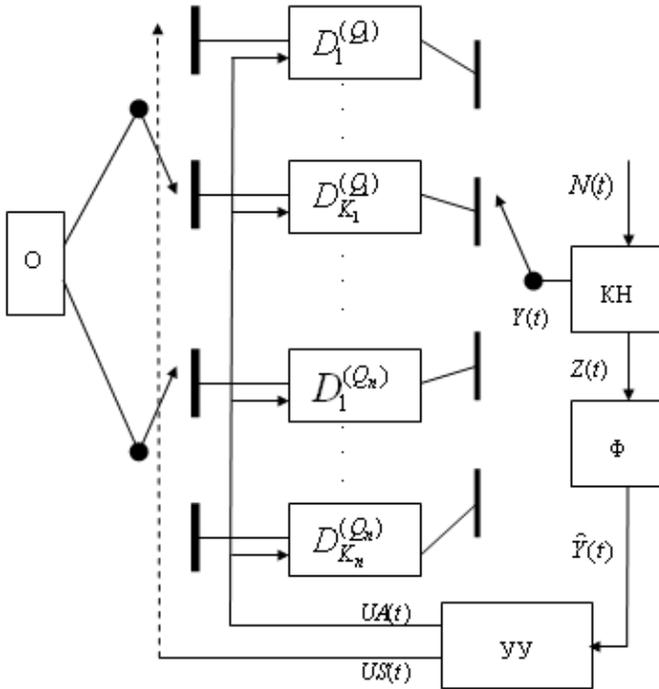


Рис. 2 – Структурная схема управления измерителями

Уравнения канала наблюдения записываются в виде  $m_1$ -мерного вектора  $Z(t)$  ( $m_1 < n_1$ ,  $n_1 = \sum_{i=1}^n k_i$ , где  $k_i$  – количество выходов  $i$ -го элемента)

$$Z(t) = C(t)X(t) + N(t),$$

где  $C(t)$  – ( $m_1 \times n_1$ )-матрица измерения фазовых координат  $X(t)$ ;

$N(t)$  –  $m_1$ -мерный вектор центрированного гауссова белого шума.

На вход устройства управления  $УУ$  поступает оценка вектора состояний  $\hat{Y}(t)$ , полученная в результате фильтрации  $\Phi$ . На выходе  $УУ$  – вектор оптимальных значений параметров  $UA$  и вектор оптимальной структуры  $US$ , определяющий подключение датчиков.

Вектор параметров в случае отсутствия управления описывается уравнением

$$\dot{a} = V'(t), \quad a(t_0) = a_0, \quad (2)$$

где  $a$  – вектор случайных параметров;

$V'(t)$  – вектор центрированного белого шума.

Вектор  $UA$  должен удовлетворять ограничениям вида

$$u_H^{(i)} \leq ua_i \leq u_B^{(i)},$$

где  $u_H^{(i)}, u_B^{(i)}$  – верхние и нижние предельные значения параметра  $ua_i$ .

### Модель на основе СП САУ измерительной системы

Структура разработанной модели приведена на рис. 3. Объекту сопоставлен переход  $T_0$ , измерителям – переходы  $T_1 \neq T_m$ , каналу наблюдения – переход  $T_{KH}$ , фильтру – переход  $T_\Phi$ , УУ – переход  $T_{УУ}$ . При срабатывании перехода выполняются функции соответствующей ему системы.

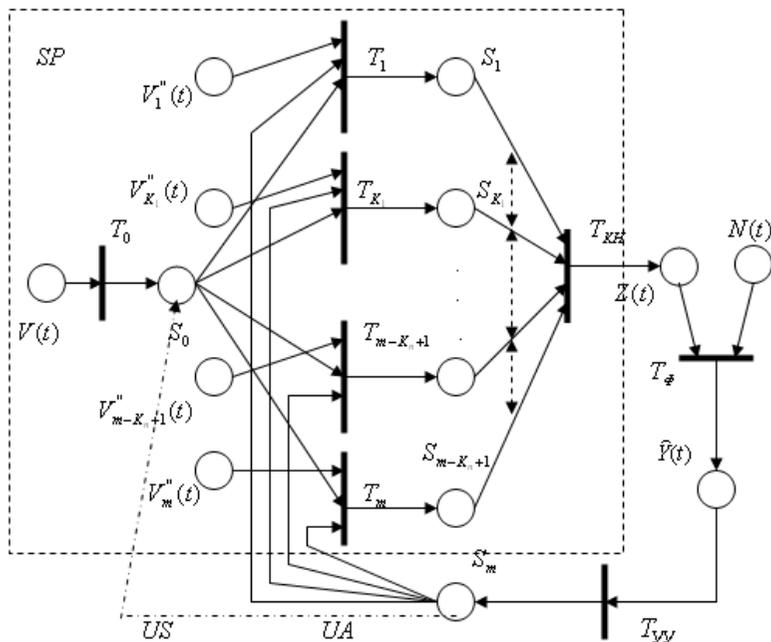


Рис. 3 – Структура модели на основе СП САУ измерительной системы

Содержащие событийные гипердуги отражают множества взаимоисключающих событий. Каждой позиции  $S_i$  сопоставлен вектор математических ожиданий  $mp_i(t)$  и средних квадратических отклонений  $\sigma p_i(t)$  вероятности передачи сигналов по дугам, исходящим из данной позиции.

Начальные значения  $mp_i(t_0)$  и  $\sigma p_i(t_0)$  заданы. Для  $S_0$  первоначально  $mp_0(t_0)=0$  и  $\sigma p_0(t_0)=0$ . В процессе управления элементы  $mp_0(t_i)$  могут принимать значения только из множества  $\{0, 1\}$ . Распределения шумов заданы.

При отсутствии управляющих воздействий входные позиции перехода  $T_i (i=1, m)$  определяются уравнением (2). Фрагмент структуры для описания случайных параметров приведен на рис. 4.

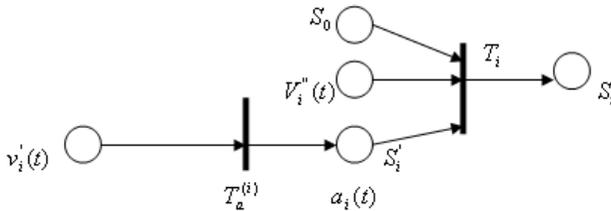


Рис. 4 – Фрагмент СП, описывающий вектор случайных параметров

В качестве конкретного примера применения предложенной модели измерительной системы при соответствующем ее уточнении, связанном со спецификой функционирования наблюдаемого объекта, была рассмотрена измерительная система, предназначенная для диагностики внутриреакторных аномалий, а именно, нарушения теплообмена в активной зоне реактора [6, 7]. Был выполнен сравнительный анализ по одному из важнейших показателей эффективности, каким является время предоставления необходимой информации оперативному персоналу в аварийной ситуации, для существующих систем внутриреакторного контроля (СВРК) и предложенной информационно-измерительной системы (ИИС) на базе СП.

### **Сравнительная характеристика диагностики внутриреакторных аномалий существующими СВРК и ИИС на базе СП**

Предлагаемая адаптивная система управления измерительной системой позволяет за счет самообучения, т.е. формирования в процессе функционирования вероятностных характеристик состояния активной зоны, не производя сканирования всех технологических каналов, выдавать информацию с задержкой приблизительно 2 с.

Сравним время получения информации СВРК в результате сканирования датчиков технологического канала и при использовании предлагаемой адаптивной системы на основе СП.

В реакторе типа ВВЭР-1000 для получения информации, например, о расходе воды, изменении температуры, давления устанавливают датчики в нижней и верхней части канала. Таким образом, при частоте опроса  $f = 50$  Гц и числе измерительных каналов  $N = 900$  время получения информации  $t_1 = 2 \times 900 \times 0,02 = 36$  с.

Время, затрачиваемое на получение информации от 900 датчиков, при диагностике внутриреакторных аномалий с использованием «шумового» анализа при частоте  $f = 50$  Гц составляет 18 с.

Время получения информации является функцией от числа измерений  $n = \varphi(N)$  и для измерительных подсистем СВРК вычисляется по формуле  $t_1 = n \times (1/f)$ .

Обработка информации для ИИС на базе СП ведется в три этапа, для каждого из которых имеется своя схема расположения датчиков. Схема расположения датчиков определяются так, чтобы при минимальном числе датчиков была возможность получить информацию о состоянии каждого технологического канала. Необходимое количество датчиков для каждого этапа измерения в случае одной аномальной зоны  $k=1$  есть функция от числа каналов  $N$ . Максимальное количество аномальных зон  $k_{max}$  для управляемого процесса определяется в соответствии с правилом  $3\sigma$  и составляет 2 % от  $N$ . Для наихудшего случая вероятность  $p$ , что аномальные зоны изменят свое положение или появятся новые, равна 0,5.

Общее количество измерений для ИИС на основе моделей СП определяется по формуле

$$n_c = (n_1 + k_{max} \cdot n_2) p + n_3,$$

где  $n_1, n_2, n_3$  – количество измерений соответственно на 1, 2 и 3 этапах измерения.

Для  $N = 900$  количество областей примем  $6 \times 6 = 36$ , каждая из которых разбивается на  $3 \times 3 = 9$  зон, причем между центрами зон расположено по одной ячейке, т.е. каждая область содержит 25 ячеек (центры областей и зон также являются ячейками). Таким образом, рассматривается  $36 \times 25 = 900$  измерительных каналов. При  $N = 625$  количество областей примем равным  $5 \times 5 = 25$ , расположение зон и ячеек аналогично описанному выше.

Соответствующие расчеты числа измерений приведены в таблице и на рис. 5.

Таблица 1 - Объем измерений на основе моделей СП

$N$	$k_{max}$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_c$ $p=1, k=1,$	$n_c$ $p=0.5, k=k_{max}$
900	18	36	8	1	45	91
625	12	25	8	1	34	63
81	2	9	4	1	14	10

При времени обработки информации от оптического датчика 0,02 с и быстрейшей реакции программы управления оптической системы не более 0,02 с суммарное время обработки информации для  $N=900$  составляет  $t_2 = 91 \times 0,02 = 1,82$  с.

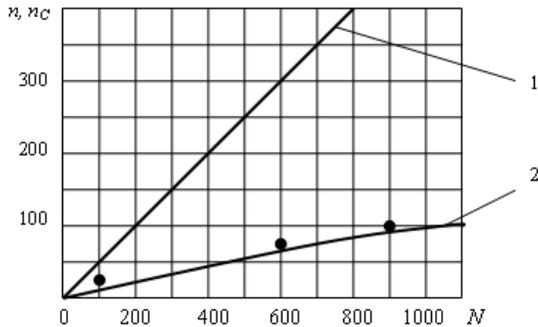


Рис. 5 – Зависимости  $n = N$  (график 1) и  $n_c = f(N)$  для случая  $k = k_{\max}$ ,  $p = 0,5$  (график 2)

Таким образом, использование адаптивной системы управления оптической ИИС на основе моделей СП позволяет примерно в  $10 \div 20$  раз повысить быстродействие СВРК при диагностике внутрореакторных аномалий, связанных с нарушением теплообмена.

**Выводы.** Предложена модель, предназначенная для решения задачи управления измерительными системами с целью их быстрой адаптации к изменению поведения наблюдаемого объекта. Модель может быть применена при создании адаптивно-адресной РТС с частотно-временным разделением каналов (частотным – для измерительной системы, временным – для совокупности измерительных систем). Эффективность применения предложенной модели показана на примере анализа ее быстродействия и существующих систем внутрореакторного контроля в аварийных ситуациях. Комплексное рассмотрение управления сложными объектами и измерительными системами связано с организацией САУ на базе систем интеллектуального управления

**Список литературы:** 1. Казаков И. Е. Методы оптимизация стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М. : Наука, 1987. – 304 с. 2. Кравец В. Г. Основы управления космическими полетами / В. Г. Кравец, В. Е. Любинский. – М. : Машиностроение, 1983. – 224 с. 3. Бахметьев А. М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ / А. М. Бахметьев, О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынов. – М. : Энергоиздат, 1988. – 136 с. 4. Амосов Н. М. Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы / Н. М. Амосов, Т. Н. Байдык, А. Д. Гольцев. – К. : Наук. думка, 1991. – 272 с. 5. 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. 6. Попов И. А. Адаптивное управление процессом кипения ядерного реактора ВВЭР на основе моделей сетей Петри и метода наиболее «горячих» точек / И. А. Попов, С. А. Качур // 36. науч. пр. СНУЯЕтаП – № 31, вып. 3. – 2009. – С. 40–48. 7. Попов И. А.. Идентификация процесса поверхностного кипения теплоносителя в активной зоне АЭУ с ВВЭР / И. А. Попов, С. А. Качур // 36. науч. пр. СНУЯЕтаП – № 32, вып. 4. – 2009. – С. 68–76.

Надійшла до редколегії 05.02.2012