

УДК 681.5

Качур С.А., доц., канд. техн. наук,

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г.Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОБОБЩЕННЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Предложен обобщенный универсальный алгоритм оптимального управления структурой и параметрами сложных стохастических систем переменной случайной структуры на базе сетей Петри. Рассмотрены варианты нетерминального и терминального управления с ограничениями на управление. Дана модификация метода "ветвей и границ" для решения поставленной задачи в условиях большой априорной неопределенности.

Трудности реализации оптимального управления процессами и системами случайной структуры традиционными методами и широкие возможности современной вычислительной техники обусловили актуальность разработки приближенных алгоритмических методов оптимизации. Алгоритмический подход к существующим аналитическим методам позволяет эффективно решать проблему оптимизации технических систем в целом, поскольку в условиях априорно не заданной ситуации не имеет смысла стремиться к получению строгого оптимума при практической реализации алгоритмов.

Однако проблема повышения моделирующей и разрешающей способности моделей и, следовательно, алгоритмов остается актуальной для всех алгоритмических подходов. В частности, применение статистической теории процессов и динамических систем случайной структуры для решения задачи оптимального управления на практике приводит к существенным усложнениям расчетных алгоритмов. В настоящее время значительное внимание уделяется созданию систем интеллектуального управления [1]. Широкие возможности нейруправления [2], перспективы модульной структуры нейронных сетей [3] позволяют говорить о необходимости разработки новых подходов к решению задач адаптивного управления. Одним из универсальных методов описания, анализа и синтеза сложных систем в условиях неопределенности является использование математического аппарата сетей Петри (СП).

Пусть поведение объекта описывается СП [4].

Управление объектом организуется на основании наблюдения m -мерного вектора состояния $Z(t)$ ($m < n_1, n_1 = \sum_{i=1}^n k_i$, где k_i - количество выходов i -го элемента)

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

где $C(t)$ - $(m \times n_1)$ -матрица измерения фазовых координат $Y(t)$; $N(t)$ - m -мерный вектор центрированного белого гауссовского шума.

Вектор параметров в случае отсутствия управления описывается уравнением

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

где a - вектор случайных параметров; $V'(t)$ - вектор центрированного белого шума.

Искомыми будут векторы управления параметрами UA и структурой US . 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 .

Задача сводится к определению двух параллельных во времени последовательностей значений векторов UA и US на интервале времени $[t_0; t_K]$.

Прежде, чем рассмотреть терминальное управление, решим задачу в нетерминальном варианте.

Обработка априорной информации и получение на ее основе данных для анализа и синтеза управления производится в процессе моделирования сетью Петри рассматриваемой системы, т.е. в результате моделирования динамики поведения управляемого объекта выполняется оценивание и идентификация параметров, структуры и входных воздействий, на базе которых осуществляется прогноз поведения объекта и синтез управляющих воздействий, описывающих закон управления.

Результаты моделирования используются как в алгоритме оптимизации структуры, так и в алгоритме параметрической оптимизации стохастических систем. Однако, если в алгоритме оптимизации структуры предполагается отсутствие управляемого изменения параметров, а в алгоритме параметрической оптимизации параметры не влияют на смену структуры, то в обобщенном алгоритме рассматривается взаимодействие параметров и структуры, т.е. параллельное управление набором параметров и классом структур на заданном интервале времени $[t_1; t_2]$. Под классом структур будем понимать множество структур, имеющих один набор управляемых каналов передачи информации (дуг).

Такое управление может быть определено вектором US класса структур $s \in S$, для которого при минимуме квадрата отклонения оценки текущего состояния $\hat{Y}$ от требуемого теоретического Y_T регулировка параметров минимальна. Таким образом, необходимо найти разумный компромисс между $\min_{s \in S} \max_{l \in s} M[(\hat{Y}^{(l)}(t) - Y_T^{(l)})^T (\hat{Y}^{(l)}(t) - Y_T^{(l)})]$ ($t_1 \leq t \leq t_2$, l - структура класса s),

$\min_{s \in S} k^{(s)}$ ($k^{(s)}$ - число параметров, выходящих за допустимые пределы для класса s) и $\max_{s \in S} \hat{p}^{(s)}$ ($\hat{p}^{(s)}$ - вероятность появления класса s).

Обобщенный нетерминальный критерий можно представить в виде

$$I_o = \min_{s(t) \in S} I_s(s, t) = \min_{s(t) \in S} \left[\sum_{l \in s(t)} \left| \hat{\sigma}^{*(l)}(Y, UA^{(s)}, t) p^{(l)}(s, t) \right| \left[\frac{1}{k^{(s)}} \sum_{i=1}^{k^{(s)}} \left\{ \begin{array}{l} (ua_i^{(s)} - u_B^{(i)})/u_B^{(i)}, \text{ если } ua_i^{(s)} > u_B^{(i)} \\ u_H^{(i)} - ua_i^{(s)}/u_H^{(i)}, \text{ если } ua_i^{(s)} < u_H^{(i)} \end{array} \right\} \right] \right] \quad (1)$$

$$t_1 \leq t \leq t_2,$$

где $u_H^{(i)}, u_B^{(i)}$ - нижнее и верхнее значения i -о параметра; $ua_i^{(s)}$ - значение i -о параметра для класса s ; $k^{(s)}$ - число параметров, выходящих за допустимые пределы для класса s ; $\hat{\sigma}^{*(l)}(Y, UA^{(s)}, t)$ - центрированный относительно $Y_T(t_2)$ вектор оценок средних квадратичных отклонений выходных сигналов для l -й структуры; $UA^{(s)}$ - вектор значений параметров для класса s ; $\hat{p}^{(l)}(s, t)$ - оценка вероятности l -й структуры внутри класса структур $s(t) \in S(t)$.

Интегральный обобщенный критерий оптимизации на интервале $[t_0; t_K]$ сформулируем на основе (1):

$$I_{ок} = \sum_{i=1}^m \max_l \hat{p}^{(l)}(US, UA, t_i, \tau | I_o), \quad \tau = t_i - t_{i-1}, \quad m = \frac{t_0 - t_K}{\tau}. \quad (2)$$

Нетерминальный критерий дает оценку I_o класса при выбранных параметрах, а терминальный критерий определяет оценку $I_{ок}$ выбора последовательности структур системы при заданных последовательностях классов структур (US) и параметров (UA).

Таким образом, задача терминального управления заключается в определении последовательности векторов US и UA , задающих наиболее веро-

ятную структуру системы, изменяющуюся на интервале $[t_0; t_K]$, отвечающую критерию оптимальности (4).

При решении задачи адаптивного управления структурой и параметрами системы на основе критерия (2) не рассматривался вопрос, связанный с ограничениями на структуру системы в целом, т.е. не определялись условия появления экстремальных ситуаций. Данные условия описываются множеством входных воздействий, множеством значений параметров и структур с учетом динамики поведения системы и не могут быть в большинстве случаев априорно заданы для современных сложных управляемых объектов.

Проблема может быть решена на основе предложенного алгоритма с использованием метода “ветвей и границ”. Применительно к задаче оптимального управления структурой и параметрами ветвление состоит в сопоставлении в момент t_i каждому классу структур S_j подмножества возможных классов структур ms_j в следующий момент времени t_{i+1} . Каждому классу структур S_j в момент t_i также сопоставляется оценка $f_i^{(s_j)}$ принятия решения о выборе данного класса.

Оценка класса структур производится по формуле

$$f_i^{(s_j)} = \frac{I_s(s_j, t_i)}{1 - I_{pz}(s_j, t_i)},$$

где $I_s(s_j, t_i)$ определяется из (4);

$$I_{pz}(s_j, t_i) = \sum_{(l \in s_j) \wedge (l \in ZL)} \hat{p}^{(l)}(t_i),$$

где $\hat{p}^{(l)}(t_i)$ - оценка вероятности структуры l внутри класса s_j ; ZL - множество запрещенных структур или фрагментов структур.

Первоначально в момент t_0 с нулевой оценкой имеем один корневой класс структур $s_0^{(j)}$, определенный на основе измерений $Z(t)$. В результате ветвления на интервале $[t_0; t'_K]$ ($t'_K = t_i + \delta$, где δ - интервал времени прогнозирования поведения системы, который либо задан первоначально, либо определен вычислительными возможностями техники) с шагом τ получаем дерево классов структур. Уровень дерева соответствует времени функционирования системы. Решением задачи является определение ветви дерева с лучшей суммарной оценкой

$$f_{\Sigma}(\omega, t'_K, s_j) = \sum_{\substack{i=1 \\ q \in \omega}}^K f_i^{(q)}, \quad K = \frac{t'_K - t_0}{\tau},$$

где ω - ветвь дерева решений с листом s_j ; q - узел ветви ω .

Для каждого момента времени $t_i (i < K)$ по каждой ветви дерева аналогично определяется суммарная оценка (оценка подзадачи)

$$f_{\Sigma}(\omega, t_i, s_j) = \sum_{\substack{j=1 \\ q \in \omega}}^i f_j^{(q)}.$$

Особенность применения для рассматриваемого случая метода “ветвей и границ” заключается в определении ограничений, позволяющих исключить из рассмотрения ветви дерева до нахождения конечного решения. В классической постановке метода “ветвей и границ” ограничения заключаются в отбрасывании тех нерешенных подзадач, оценка которых хуже оценки уже полученного решения.

Модификация данного метода связана с содержательной постановкой задачи оптимизации систем с переменной случайной структурой. Специфика состоит в том, что одни и те же классы структур могут появляться на одном уровне дерева решений в разных ветвях. Поэтому на текущем i -м уровне дерева решения осуществляется определение наилучшей для каждого класса s_j суммарной оценки

$$I_{onm} = \min_{\omega_r} f_{\Sigma}(\omega_r, t_i, s_j)$$

и отбрасывание всех ветвей с классом-листом s_j , для которых $f_{\Sigma} < I_{onm}$.

Данная процедура осуществляется на каждом уровне в процессе построения дерева решений. Прогноз, т.е. путь ω_{onm} , удовлетворяющий I_{onm} , получают за реальное время меньше τ , так как в действительности управляющие векторы US_{onm} и UA_{onm} должны выдаваться с минимальным интервалом времени τ . Поэтому после определения US_{onm} дерево решений модифицируется. Его корень опускается на один уровень по ветви ω_{onm} , а ветви не связанные с новым корнем отбрасываются и рассмотрение полученного дерева продолжается с его классов-листов в течение модельного времени δ . Новому корню дерева соответствует US_{onm} . При поступлении информации от измерителей дерево решений формируется снова от $s_0^{(j)}$, определенного в результате работы системы первичной идентификации. На рисунке 1 изображен обобщенный алгоритм адаптивной оптимальной САУ

на основе СП. Управляемый объект контролируется посредством измерителей. Вектор наблюдения $Z(t)$ поступает на систему первичного оценивания и идентификации, на выходе которой формируются оценки вектора состояний $\hat{Y}(t_0)$, параметров $\hat{a}'(t_0)$, входных воздействий $\hat{V}(t_0)$, структуры $I_0(t_0)$ и класса структур $s_0(t_0)$. Оценка $\hat{V}(t_0)$ поступает на вход системы прогнозирования, формирующей прогноз $\hat{M}_V$ внешних воздействий на заданном интервале ($\hat{M}_V$ - множество прогнозируемых векторов $\hat{V}(t_i), i = \overline{1, m}$, m - максимальное возможное число уровней дерева решения, начиная с момента поступления последнего вектора наблюдения, $m = \frac{t_K'' - t_0}{\tau}, t_K'' = t_K + \delta$). Оценки и прогноз поступают на блок совмещенного синтеза управления, который может функционировать либо на основе критерия (1), либо на основе критерия (2) в зависимости от постановки задачи.

Реализация обобщенного адаптивного алгоритма на основе СП эффективна при использовании современной вычислительной техники.

Предложенный адаптивный алгоритм параметрической оптимизации стохастических систем является основанием для определения режимов

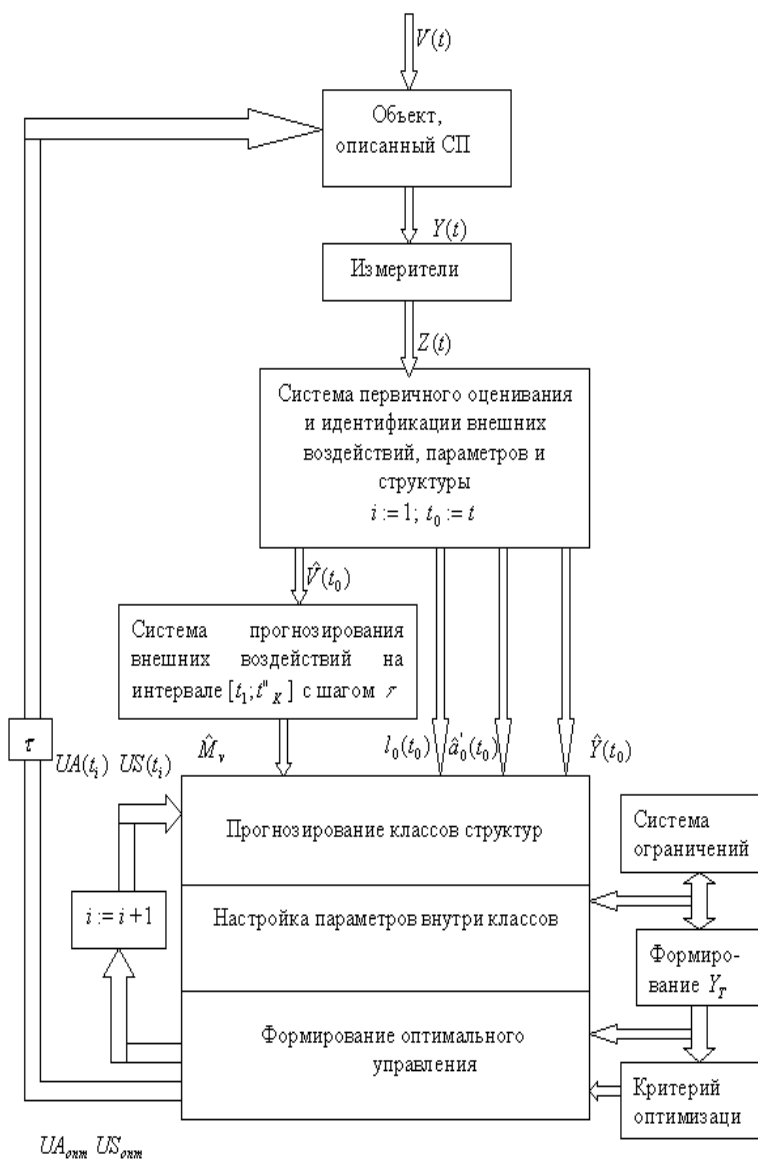


Рисунок 1 – Схема оптимальной адаптивной САУ на основе СП

работы нейрокомпьютера. Помимо данного алгоритма режимы работы нейрокомпьютера могут задавать адаптивный алгоритм структурной оптимизации и алгоритм параметрической оптимизации стохастических систем и их соединений на базе СП. Предполагается рассмотреть возможность использования данного алгоритма для управления полетами космических и летательных аппаратов.

Библиографический список

1. Васильев С.Н. Расширение потенциала управления с помощью новых средств представления и обработки знаний /С.Н. Васильев // Проблемы управления и информатики. — 2002. — №4. — С. 21 – 36.
2. Галушкин А.И. Основы нейроуправления / А.И. Галушкин // Нейрокомпьютеры. — 2002. — №9-10. — С. 87 – 106.
3. Дорогов А.Ю. Структурный синтез модульных слабосвязанных нейронных сетей. Методика структурного синтеза модульных нейронных сетей / А.Ю. Дорогов // Кибернетика и системный анализ. — 2001. — №2. — С. 34 – 42.
4. 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.

Поступила в редакцию 03.10.2003 г.