Применение методов распознавания образов для синтеза кусочно-линейных систем квазиинвариантного управления*

Теклина Л. Г., Котельников И. В., Гельфер И. С.
neymark@pmk.unn.ru
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

Работа посвящена дальнейшему развитию нового подхода к синтезу систем квазиинвариантного управления, основанному на постановке и решении задачи синтеза методами распознавания образов с активным экспериментом. Расширение новой методики синтеза линейных систем на область нелинейных систем управления связано с преодолением главного недостатка линейных систем: больших значений функции управления в переходном процессе.

Ключевые слова: *распознавание образов, квазиинвариантное управление, динамические системы.*

Application of the pattern recognition methods for the synthesis of a piecewise-linear systems of the quasi-invariant control*

Teklina L. G., Kotel'nikov I. V., Gel'fer I. S.
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

The work is devoted to the further development of a new approach to the synthesis of the quasi-invariant control systems. This approach is based on the formulation and solution of the synthesis problem using methods of pattern recognition with an active experiment. Extension of a new method of synthesis for the linear systems to the field of nonlinear control systems is related with overcoming the major drawback of linear systems: large values of a control function in the transition process.

Keywords: *pattern recognition, quasi-invariant control, dynamic systems.*

Введение

Подавление внешних возмущений традиционно считается трудной задачей в теории управления. Проблеме синтеза систем управления, которые должны не устранять возникающие ошибки, а предотвращать их, т. е. сделать объект управления невосприимчивым (инвариантным) к внешним воздействиям, много лет. Идея синтеза таких систем прошла сложный путь: от полного отрицания возможности их создания (дискуссия по поводу инвариантного регулятора Г. В. Щипанова в 1939 г.) до попыток отыскать зерно истины (введение понятия $\varepsilon-$ инвариантности) и найти методы расчета таких систем. Об истории этого вопроса можно прочитать в книге [1]. Поиск шел в привычном направлении: сведение к задаче оптимизации путем введения различных мер неинвариантности, или реактивности, системы [2]. Лишь в конце XX, начале нашего XXI в. появились циклы работ Якубовича В. А. [3,4] и Неймарка Ю. И. [5–7], посвященных инвариантному управлению, где было доказано, что при отсутствии знаний о помехе идеальный инвариантный регуля-

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №11-01-00379.

тор действительно не реализуем, но реализуемы линейные системы *квазиинвариантного* управления. Показано, что при надлежащем выборе управляющей функции существует множество значений параметров синтезируемого квазиинвариантного управления, при которых управляемый объект удовлетворяет требованию квазиинвариантности. Но вот методов поиска этих значений не существует. Квазиинвариантное управление не является оптимальным, и для его расчета не применимы классические методы оптимального управления. Для решения этой проблемы предлагается использовать методы интеллектуального анализа данных, получаемых в процессе решения поставленной задачи как задачи распознавания с активным экспериментом.

Задача синтеза систем квазиинвариантного управления

В работах [5–7] доказана возможность синтеза и изучены некоторые свойства линейных систем квазиинвариантного управления (и стабилизации, и слежения) для произвольного объекта, описываемого математической моделью вида

$$\begin{cases} A_n(p)x = -B_m(p)(u + \xi(t)) \\ \mu u = D_{n-m-1}(p)(x - f(t)) \end{cases} \tag{1}$$

где $p = \frac{d}{dt}$, $A_n(p)$, $B_m(p)$, $D_{n-m-1}(p)$ — действительные полиномы степеней n, m, $n - m - 1$ соответственно, $\xi(t)$ — ограниченное неизвестное возмущение, $f(t)$ — заданная функция отслеживания ($f(t) = 0$ отвечает системе стабилизации), x и u — одномерные переменные объекта и управления. Для этой модели установлены условия реализации квазиинвариантного управления, а именно:

– $n > m$ для кусочно-гладких ограниченных $u(t)$, и $\xi(t)$;

– $x(t)$ и $f(t)$ — кусочно-гладкие функции, имеющие $n - m$ производных;

– полином $\mu A_n(p) + B_m(p) D_{n-m-1}(p)$ Гурвицев, т. е. все его корни λ_i имеют отрицательные реальные части ($Re\lambda_i < 0$).

Показано, что при выполнении этих условий существует множество значений параметров — неизвестных коэффициентов $(\mu, d_1, \ldots, d_{n-m-1}) = (\mu, \mathbf{d})$ управляющей функции во втором уравнении системы (1), при которых система удовлетворяет требованию квазиинвариантности управления, когда надлежащим выбором параметров ошибка управления в установившемся режиме может быть сделана сколь угодно малой, т. е. $|x(t) - f(t)| < \varepsilon$ при $t > T_{\text{тр}}$, где $T_{\text{тр}}$ — длительность переходного процесса.

Кроме того синтезируемая система управления должна обеспечивать и требуемое качество переходного процесса, а именно:

– ограничение на длительность переходного процесса $T_{\text{тр}} \leqslant T_{\max}$;

– ограничение на величину ошибки управления в переходном процессе $|x(t) - f(t)| \leqslant x_{\max}$;

– ограниченность значений функции управления $|u(t)| \leqslant u_{\max}$.

Синтез системы управления заключается в поиске таких значений неизвестных параметров μ, d, при которых синтезируемая система отвечала бы всем предъявляемым к ней требованиям по квазиинвариантности управления и качеству переходного процесса для неизвестного, но ограниченного по величине внешнего возмущения $\xi(t)$. Причем ставится задача отыскания и описания не всех возможных значений неизвестных параметров, а хотя бы некоторого их подмножества достаточно простой конфигурации (совокупность параллелепипедов, сфер, эллипсоидов и т.п.), но определяемого с заданной высокой степенью статистической достоверности и отвечающего условию достаточности меры робастной устойчивости по определяемым параметрам. Рассмотрим возможности синтеза такой системы методами распознавания при условии, что описание объекта управления (первое уравнение системы (1)) известно и заданы начальные условия $\mathbf{x}^* = (x^*, \dot{x}^*, \ldots, x^{(n-1)*})$ в фазовом пространстве системы.

Постановка задачи синтеза в качестве проблемы распознавания образов

Рассматривается задача управления объектом, описываемым известным линейным дифференциальным уравнением n - ого порядка, с помощью управления, задаваемого также дифференциальным уравнением, но с неизвестными $k = n - m$ параметрами

$$\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \ldots, \omega_k) = (\mu, d_1, \ldots, d_{n-m-1}).$$

Следовательно, синтезируемый объект описывается двумя группами переменных: фазовыми переменными $\mathbf{x} = (x, \dot{x}, \ldots, x^{(n-1)})$ в n — мерном фазовом пространстве $\mathbf{X}$ и параметрами $\boldsymbol{\omega}$ в k — мерном пространстве параметров $\boldsymbol{\Omega}$. В фазовом пространстве известно состояние равновесия $\mathbf{x_0}$ и заданы начальные условия $\mathbf{x}^*$. Дополнительно задаются определенные требования к функционированию синтезируемой системы в виде l неравенств, характеризующих некоторое множество $\mathbf{Y}^*$ в l — мерном пространстве «характеристик» системы управления $\mathbf{Y}$. Классическими характеристиками y_i систем управления являются требования, перечисленные в предыдущем разделе:

– $y_1 = |x(t) - f(t)| < \varepsilon$ при $t > T_{\text{tp}}$;

– $y_2 = T_{tp} \leqslant T_{\max}$;

– $y_3 = |u(t)| \leqslant u_{\max}$;

- $y_4 = |x(t) - f(t)| \leqslant x_{max}$ при $t \leqslant T_{\text{tp}}$.

При задании вектора $\boldsymbol{\omega}$ и начальных условий $\mathbf{x}^*$ в фазовом пространстве при интегрировании системы (1) получаем некоторое решение $x(t)$, которое имеет характеристики $\mathbf{y} = \Gamma(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\omega})$, представляющие собой численные оценки $\mathbf{y} = (y_1, \ldots, y_4)$ качества переходного процесса и установившегося режима. Синтезировать систему — значит найти такое множество значений $\boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{\Omega}^* \subset \boldsymbol{\Omega}$, для которых $\mathbf{y} = \Gamma(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\omega}) \in \mathbf{Y}^*$.

Для постановки задачи в виде проблемы распознавания образов в качестве пространства признаков выбираем пространство неизвестных параметров $\boldsymbol{\Omega}$. За распознаваемый образ принимается область $\boldsymbol{\Omega}^*$ в пространстве признаков. Решение задачи распознавания в пространстве $\boldsymbol{\Omega}$ — построение в этом пространстве локального решающего правила достаточно простого вида (набор параллелепипедов, сфер, эллипсоидов и т. п.), описывающих искомую область параметров $\widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*} \subseteq \boldsymbol{\Omega}^*$, при условии минимизации числа ошибок второго рода для распознаваемого образа и максимизации меры робастной устойчивости для множества параметров $\widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*}$. С целью ускорения процесса решения ищется решение не оптимальное, а близкое к оптимальному, удовлетворяющее требуемой надежности распознавания P_0 и необходимой мере робастной устойчивости по определямым параметрам $R(\widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*}) \geqslant R_0$. За оценку достоверности правила распознавания принимается величина $P = 1 - N_0/N(P > P_0)$, где N_0 — число ошибочных ответов на контрольной выборке объема, а за меру робастной устойчивости для области $\boldsymbol{\Omega}^*$ — радиус робастной устойчивости $R(\widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*}) = \max\limits_{\boldsymbol{\omega} \in \widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*}} (\min\limits_{\boldsymbol{\omega} \in \widetilde{\boldsymbol{\Omega}}} \rho(\boldsymbol{\omega}, \overline{\widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*}}))$, где ρ — эвклидово расстояние от точки внутри области до ее границы $\overline{\widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*}}$.

Для построения решающего правила формируется обучающая выборка с использованием решающего правила в пространстве $\mathbf{Y}$:

$$\boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{\Omega}^* \quad \text{если} \quad \Gamma(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\omega}) \in \mathbf{Y}^*,$$

которая выполняет роль учителя. Все обучающие выборки формируются в процессе решения задачи, т. е. решается задача распознавания с активным экспериментом. Для формирования таких выборок решается задача планирования и проведения эксперимента (выбор параметров $\boldsymbol{\omega}$ — построение $x(t)$ — отыскание характеристик $\mathbf{y}$) с целью получения представительных обучающих выборок. В задаче планирования эксперимента удобнее использовать решающую функцию, построенную на базе решающего правила в пространстве $\mathbf{Y}$:

$$F(\boldsymbol{\omega}) = \rho(\Gamma(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\omega}), \mathbf{Y}^*),$$

где ρ — функция, представляющая собой расстояние в пространстве $\mathbf{Y}$ от точки $\mathbf{y} = \boldsymbol{\Gamma}(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\omega})$ (технические характеристики объекта) до множества $\mathbf{Y}^*$. Функция $F(\boldsymbol{\omega})$ не только указывает на принадлежность точки $\boldsymbol{\omega}$ к распознаваемому образу ($F(\boldsymbol{\omega}) = 0$ для $\boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{\Omega}^*$), но и может служить мерой близости $\boldsymbol{\omega}$ к $\boldsymbol{\Omega}^*$ при $F(\boldsymbol{\omega}) \neq 0$.

Синтез линейной системы управления

Решение задачи синтеза реализуется в два этапа путем решения двух задач распознавания:

I. Отыскание области значений в пространстве параметров $\boldsymbol{\Omega_0} \subset \boldsymbol{\Omega}$, при которых синтезируемая система устойчива, из условия, что полином $\mu A_n(p) + B_m(P)D_{n-m-1}(p)$ Гурвицев, т. е. все его корни имеют отрицательные действительные части. Множество $\boldsymbol{\Omega_0}$ — распознаваемый образ. В общем случае область устойчивости — область невыпуклая и несвязная, но мы ставим задачу выделения и описания хотя бы части $\widetilde{\boldsymbol{\Omega_0}} \subseteq \boldsymbol{\Omega_0}$ этой области, полагая ее связной и выпуклой.

II. Построение области параметров $\widetilde{\boldsymbol{\Omega}^*} \subseteq \widetilde{\boldsymbol{\Omega_0}}$, удовлетворяющей целевому условию управления. На этом этапе распознаваемым образом является искомое множество $\boldsymbol{\Omega}^*$.

Каждый этап реализуется последовательным выполнением трех процедур:

1) поиск точки с координатами значений параметров, удовлетворяющих целевому условию этапа;

2) формирование обучающей выборки на основе выбранной точки и исходя из гипотезы компактности искомого множества;

3) построение решающего правила, отвечающего заданной степени статистической достоверности.

На первом этапе процедура (1) реализуется путем решения задачи минимизации $\min\limits_{\boldsymbol{\omega}} \Lambda(\boldsymbol{\omega})$, где $\Lambda(\boldsymbol{\omega}) = \max\limits_{i}(Re\lambda_i)$, λ_i — корни характеристического полинома, причем процесс минимизации заканчивается, как только выполнится неравенство $\Lambda(\boldsymbol{\omega}) < 0$.

На втором этапе процедура (1) реализуется путем решения задачи минимизации

$$\min_{\boldsymbol{\omega} \in \widetilde{\boldsymbol{\Omega_0}}} F(\boldsymbol{\omega}) = \min_{\boldsymbol{\omega} \in \widetilde{\boldsymbol{\Omega_0}}} \rho(\Gamma(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\omega}), \mathbf{Y}^*).$$

Процедура (2) формирует обучающую последовательность путем случайного выбора параметров на основе равномерного распределения из некоторой области G, представляющей собой окрестность найденной точки. Требования к этой области состоят в том, что она должна включать как точки со значениями параметров, удовлетворяющих цели этапа, так и точки, не удовлетворяющие поставленной цели. Это сделать не сложно простым расширением области G.

По найденным обучающим выборкам строятся решающие правила распознавания (процедура 3). При этом проводится оценка надежности построенного решающего правила на независимой контрольной выборке. В случае несоответствия результата проверки заданной степени статистической достоверности P_0 обучающая выборка пополняется новыми данными, и процесс обучения продолжается. Мы в своих исследованиях строили синдромальные решающие правила [8], выбирая из полученных синдромов (параллелепипедов) для описания распознаваемого образа синдромы максимального объема с целью максимизации меры робастной устойчивости.

Задача синтеза решена, если построенное множество $\widetilde{\mathbf{\Omega_0}}$ удовлетворяет заданной степени статистической достоверности, а мера робастной устойчивости достаточна для синтезируемой системы. В противном случае существуют два пути модификации управляющей функции: изменение пространства признаков и использование нелинейных стратегий управления. Второй способ особенно актуален при превышении допустимых значений функции управления. И теоретические [6, 7], и экспериментальные исследования показывают, что для линейных систем управления самой большой неприятностью являются большие значения функции управления в переходном процессе, причем эти значения тем больше, чем выше требования к точности управления. Зачастую преодолеть этот недостаток линейных систем можно путем выбора простейшей нелинейной стратегии управления, а именно: через построение кусочно-линейной управляющей функции.

Алгоритм построения кусочно-линейной управляющей функции

Цель введения кусочно-линейного управления — выполнение требования ограниченности значений функции управления $|u(t)| \leqslant u_{\max}$ во время переходного процесса как при запуске системы, так и при сбое в системе управления. Алгоритм построения кусочно-линейной функции базируется на знании области устойчивости системы управления $\widetilde{\mathbf{\Omega_0}}$, найденной для линейной системы. И теоретически [5–7], и экспериментально установлена большая роль параметра μ при синтезе квазиинвариантного управления с заданными свойствами. Именно поэтому при построении кусочно-линейной управляющей функции в первую очередь изменяется параметр μ. Для того, чтобы области изменения параметров μ ($\mu \in \mathbf{M}$) и $\mathbf{d}$ ($\mathbf{d} \in \mathbf{H}$) не зависели друг от друга, область $\widetilde{\mathbf{\Omega_0}}$ должна представлять собой прямую сумму двух множеств $\mathbf{M_0} = \{\mu\}$ и $\mathbf{H_0} = \{\mathbf{d}\}$, т. е. $\widetilde{\mathbf{\Omega_0}} = \mathbf{M_0} \oplus \mathbf{H_0}$, или

$$\widetilde{\mathbf{\Omega_0}} = \{\boldsymbol{\omega} = (\mu, \mathbf{d}) \quad / \quad \mu \in \mathbf{M_0} \quad \& \quad \mathbf{d} \in \mathbf{H_0}\}.$$

Простейшим типом такой области является параллелепипед.

Из области $\widetilde{\mathbf{\Omega_0}}$ выделяются множества $\mathbf{M_0} = \{\mu\}$ и $\mathbf{H_0} = \{\mathbf{d}\}$. В $\mathbf{M_0}$ выбираем некоторые значения, близкие к минимальному и максимальному по модулю (μ_{min} и μ_{max} соответственно), и разбиваем весь интервал изменения $|\mu|$ на k значений:

$$|\mu_i| = \mu_{\min} + \Delta\mu(i-1), \quad i = 1, \ldots, k, \quad \Delta\mu = \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{k-1}.$$

Начиная с $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ (начальные условия) для произвольного значения $\mathbf{d}$ из области устойчивости $\mathbf{H_0}$ при интегрировании системы на каждом шаге в качестве μ выбираем минимальное (для достижения минимальной ошибки управления) из ряда полученных значений:

$$|\mu| = \begin{cases} \mu_{\min}, & \text{если} \quad \hat{D}(t) \leqslant \mu_1 u_{\max} \\ \mu_i, & \text{если} \quad \mu_{i-1} u_{\max} < \hat{D}(t) \leqslant \mu_i u_{\max} \\ \text{изменение}\,\mathbf{d}, & \text{если} \quad \mu_k u_{\max} < \hat{D}(t) \end{cases},$$

где $\hat{D}(t) = |D(p)(x(t) - f(t))|$. Параметры $\mathbf{d}$ изменяются (временно!) лишь в случае невозможности достижения требуемой величины $u(t)$ только за счет изменения μ.

Изменение вектора $\mathbf{d}$ проводится путем решения задачи

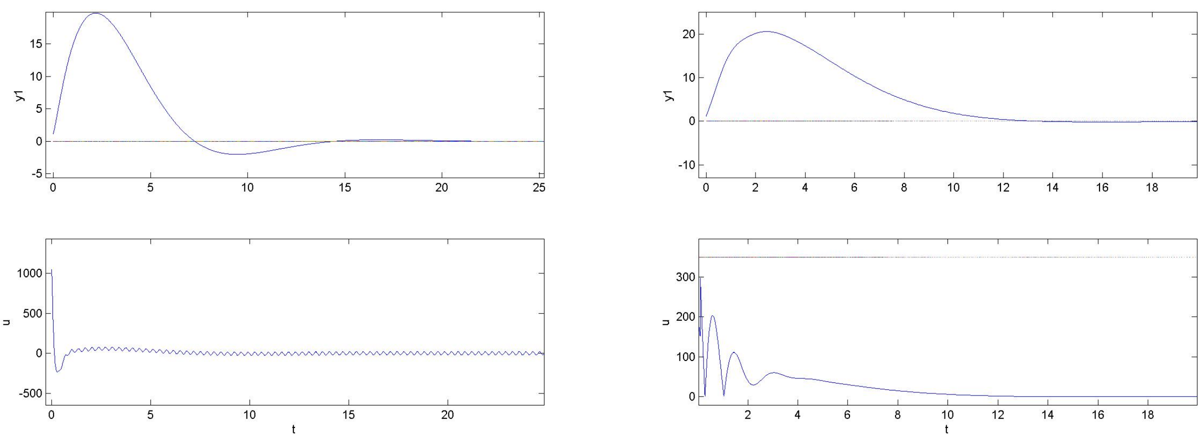
$$\min_{\mathbf{d} \in \mathbf{H_0}} |D(p)(x(t) - f(t))|,$$

причем процесс минимизации можно закончить, как только $|D(p)(x(t) - f(t))| \leqslant \mu_{\max} u_{\max}$, а можно продолжить с целью выбора меньших значений μ. При возвращении к нормальному режиму работы системы управления восстанавливается исходное значение вектора $\mathbf{d}$, которое можно выбрать не произвольным образом, а исходя, например, из меры робастной устойчивости по этим параметрам.

Если требуемого сокращения функции управления достичь не удается, необходимо рассматривать иные нелинейные стратегии управления.

Как выбрать число k кусочно-линейных интервалов? Эксперименты показали, что с ростом k в среднем снижается, но незначительно, длительность переходного периода, но возрастает число переключений. Мы в своих исследованиях начинали с $k = 2$ и увеличивали число интервалов лишь в случае, если не достигали требуемых результатов.

Для иллюстрации возможностей кусочно-линейных систем управления в сравнении с линейными приведем пример динамической системы, описывающей двухзвенный перевернутый маятник, управляемый перемещением точки опоры в условиях наличия неизвестного внешнего возмущения [9]. На рис. 1 представлены характеристики переходного процесса: ошибка управления и управляющая функция $u(t)$.



(а) линейная $u(\mathbf{x})$ (б) кусочно-линейная $u(\mathbf{x})$

Рис. 1: Переходный процесс для линейной и кусочно-линейной управляющей функции

Для линейной системы управления (рис. 1, а) функция управления в переходном процессе достигает значений $|u(t)| > 1000$ при ограничении $u_{\max} \leqslant 300$. Требуемого ограничения удается добиться при переходе к кусочно-линейной управляющей функции, для которой общий вид переходного процесса представлен на рис. 1, б.

Уточнение области изменения параметров для синтеза системы управления с заданными свойствами

В выбранной области $\widetilde{\mathbf{\Omega_0}}$ существует линейное квазиинвариантное управление, но существование нелинейного (и в частности, кусочно-линейного) требует дополнительной проверки. Кроме того, есть еще и дополнительные требования, предъявляемые к переходному процессу. Синтез системы управления заключается в поиске таких значений неизвестных параметров $\boldsymbol{\omega}^* \in \mathbf{\Omega}^* \subseteq \mathbf{\Omega_0}$, при которых синтезируемая система отвечала бы всем предъявляемым к ней требованиям для неизвестного, но ограниченного по величине внешнего возмущения $\xi(t)$.

Поскольку при синтезе кусочно-линейных систем квазиинвариантного управления значение параметра μ определяется текущими значениями $\mathbf{d}$ и $\mathbf{x}$, а область изменения μ — это область устойчивости синтезируемой системы управления, то $\mathbf{\Omega}^* = \mathbf{M_0} \oplus \mathbf{H}^*$, где $\mathbf{H}^* \subseteq \mathbf{H_0}$.

При задании вектора $\mathbf{d}$ и начальных условий $\mathbf{x}^*$ в фазовом пространстве при интегрировании системы получаем некоторое решение $x(t)$, которое имеет характеристики $\mathbf{y} = \Gamma(\mathbf{x}^*, \mathbf{d})$. Сказанное выше означает, что

$$\mathbf{H}^* = \{\mathbf{d}/\mathbf{y} = \Gamma(\mathbf{x}^*, \mathbf{d}) \in \mathbf{Y}^*\}.$$

Причем опять же ставится задача отыскания и описания не всех возможных значений неизвестных параметров, а хотя бы некоторого их подмножества $\widetilde{\mathbf{H}}^* \subseteq \mathbf{H}^*$ достаточно простой конфигурации, но определяемого с заданной высокой степенью статистической достоверности. Теперь за распознаваемый образ принимается область $\mathbf{H}^*$ в подпространстве признаков $\mathbf{H}$. Решение задачи распознавания в подпространстве $\mathbf{H}$ — построение в этом подпространстве решающей функции, которое ведется аналогично построению решающего правила для $\widetilde{\mathbf{\Omega}}^*$ в пространстве $\mathbf{\Omega}$, но с использованием следующей решающей функции в пространстве $\mathbf{Y}$:

$$\mathbf{d} \in \mathbf{H}^*, \quad \text{если} \quad \Gamma(\mathbf{x}^*, \mathbf{d}) \in \mathbf{Y}^*,$$

при этом $F(\mathbf{d}) = \rho(\Gamma(\mathbf{x}^*, \mathbf{d}), \mathbf{Y}^*)$, где ρ — функция, представляющая собой расстояние в пространстве $\mathbf{Y}$ от точки $\mathbf{y} = \mathbf{\Gamma}(\mathbf{x}^*, \mathbf{d})$ до множества $\mathbf{Y}^*$.

Аналогично поиску области $\widetilde{\mathbf{\Omega}}^*$ построение области $\widetilde{\mathbf{H}}^* \subseteq \mathbf{H}^* \subseteq \mathbf{H_0}$ методами распознавания образов складывается из последовательного решения трех задач:

1. Отыскание хотя бы одной точки $\mathbf{d}^*$, принадлежащей распознаваемому образу. $\mathbf{d}^* \in \mathbf{H}^*$ находится из условия

$$F(\mathbf{d}^*) = \min_{\mathbf{d} \in \mathbf{H_0}} F(\mathbf{d}) = \min_{\mathbf{d} \in \mathbf{H_0}} \rho(\Gamma(\mathbf{x}^*, \mathbf{d}), \mathbf{Y}^*).$$

2. Формирование обучающей выборки $\Xi_{\mathbf{H}^*}$ на основе гипотезы компактности и выбранной точки $\mathbf{d}^*$. Если при построении $x(t)$ $\mathbf{d}$ изменяется, то все полученные значения $\mathbf{d}$ включаются в $\Xi_{\mathbf{H}^*}$.

3. Построение решающего правила распознавания по сформированной обучающей выборке $\Xi_{\mathbf{H}^*}$ с оценкой его надежности на независимой контрольной выборке.

В случае если $\widetilde{\mathbf{H}}^*$ найдено и удовлетворяет заданной степени статистической достоверности, а мера робастной устойчивости достаточна для синтезируемой системы, задача синтеза решена, и $\widetilde{\mathbf{\Omega}}^* = \mathbf{M_0} \oplus \widetilde{\mathbf{H}}^*$.

При решении упомянутой выше задачи управления двухзвенным перевернутым маятником при требованиях $|x(t)| < 10^{-3}$ при $t > T_{tp}$, $|u(t)| \leqslant 300$ и $P_0 = 0.99$ уже при $k = 2$ была получена достоверность $P = 0.9911$ на всей области $\mathbf{H_0}$, т. е. $\widetilde{\mathbf{\Omega}^*} = \widetilde{\mathbf{\Omega_0}}$, но, подчеркнем, лишь для выдвинутых для этой системы управления требований.

Заключение

Предлагаемая работа имеет целью показать, что проблема синтеза систем управления может плодотворно рассматриваться как задача распознавания образов и что на этом пути возможно существенное продвижение в ее решении. Синтез кусочно-линейных систем квазиинвариантного управления — это лишь первый шаг на пути решения очень сложной проблемы: синтеза нелинейных систем управления с заданными свойствами. И полученные результаты позволяют надеяться на ее успешное решение методами интеллектуального анализа данных.

Литература

[1] *Лезина З. М., Лезин В. И., сост.* Щипанов Г. В. и теория инвариантности. М.: Физматлит, 2004.

[2] *Якубович В. А.* Оптимизация и инвариантность линейных стационарных систем управления. // *Автоматика и телемеханика.* 1982. № 8. С. 5–45.

[3] *Якубович В. А.* Синтез стабилизирующих регуляторов, обеспечивающих независимость выходной переменной системы управления от внешнего воздействия. // *ДАН.* 2001. Т. 380, № 1. С. 27–30.

[4] *Проскурников А. В., Якубович В. А.* Синтез стабилизирующих регуляторов, обеспечивающих независимость выходной переменной системы управления от внешнего воздействия // *ДАН.* 2003. Т. 38, № 6. С. 742–746.

[5] *Неймарк Ю. И.* О парадоксе и идеальном регуляторе Щипанова // *Вестник ННГУ им. Н. И. Лобачевского. Математическое моделирование и оптимальное управление.* 2006. Вып. 3, № 32. С. 83–88.

[6] *Неймарк Ю. И.* О квазиинвариантном управлении // *Дифференциальные уравнения.* 2007. № 11. С. 1–6.

[7] *Неймарк Ю. И.* Синтез и функциональные возможности квазиинвариантного управления // *Автоматика и телемеханика.* 2008. № 10. С. 48–56.

[8] *Kotel'nikov I. V.* A syndrome recognition method based on optimal irreducible fuzzy tests // *Pattern Recognition Image Anal.*. 2001. Vol. 11, no. 3. Pp. 553–559.

[9] *Неймарк Ю. И.* Математические модели в естествознании и технике. Нижний Новгород: Издательство Нижегородского университета, 2004. 401 с.