

Интеллектуальный анализ данных при проектировании многосвязных систем автоматического управления

Б.Г. Ильясов
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: ilyasov@ugatu.ac.ru

Г.А. Сaitова
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: saitova@bk.ru

Е.А. Халикова
Факультет информатики и робототехники
Уфимский государственный авиационный
технический университет
Уфа, Россия
e-mail: khalikova_elena@mail.ru

Аннотация¹

В статье рассматривается решение задачи проектирования многосвязной системы автоматического управления (МСАУ) с заданными показателями качества с использованием нейро-нечеткого моделирования, на основе которого формируются системы нечеткого вывода

1. Введение

При проектировании системы автоматического управления следующей после проблемы устойчивости появляется проблема обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов: перерегулирования, времени регулирования и другие. Зачастую эти требования являются противоречивыми, что связано в первую очередь с особенностями функционирования систем. Например, при уменьшении перерегулирования происходит увеличение времени регулирования и наоборот, таким образом, две эти величины имеют обратную зависимость. Представить указанную зависимость для сложных систем в математическом виде невозможно, что объясняется особенностями каждого класса систем и входящих в сложную систему подсистем, однако для решения задачи синтеза необходимо определить такие параметры, чтобы система удовлетворяла заданным требованиям. Одним из инструментов решения поставленной задачи является нейро-нечеткое моделирование на

Труды Шестой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-31 мая, Уфа-Ставрополь, Россия, 2018

Всероссийская научная конференция "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", Уфа-Ставрополь, Россия, 2018

основе которого генерируются системы нечеткого вывода.

2. Описание МСАУ через частотные характеристики подсистем и связей между ними

При исследовании МСАУ чаще всего используют запись уравнений движения системы в векторно-матричной форме относительно ее физических координат. МСАУ, в которой все связи между подсистемами осуществляются через многомерный объект, описываются следующими уравнениями движения:

$$\begin{aligned} X(s) &= W(s)[U(s) + F(s)], \\ U(s) &= R(s)[X^0(s) - X(s)] \end{aligned} \quad (1)$$

где $X^0(s)$, $X(s)$, $X(s)$, $U(s)$, $F(s)$ – векторы задающих, регулируемых, управляющих и возмущающих воздействий соответственно; $W(s) = \|W_{ij}(s)\|_{n \times n}$ – матричная передаточная функция (МПФ) многомерного объекта по управляющим воздействиям, $R(s) = \text{diag}\{R_1(s), R_2(s), \dots, R_n(s)\}$ – МПФ сепаратных регуляторов. Структурная схема МСАУ, соответствующая уравнению (1), представлена на рисунке 1.

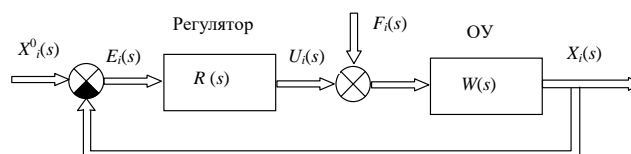


Рис. 1. Структурная схема многосвязной системы автоматического управления

В работе [1] предложено описание МСАУ через характеристики подсистем и многомерные элементы связи между ними. В качестве *индивидуальной характеристики* (ИХ) отдельной подсистемы рассматривается ее передаточная функция $\Phi_i(s)$ в режиме управления, когда подсистема функционирует в изолированном от других подсистем состоянии.

Для МСАУ, соответствующей системе уравнений (1), передаточные функции индивидуальных характеристик подсистем имеют вид:

$$\Phi_i(s) = \frac{x_i(s)}{x_i^0(s)} = \frac{R_i(s)W_{ii}(s)}{1 + R_i(s)W_{ii}(s)}.$$

Если все сепаратные подсистемы идентичны, то есть для всех $i, j \in \overline{1, n}$, $\Phi_i(s) = \Phi_j(s)$, то МСАУ называется *гомогенной*.

Рассмотрим k связанных между собой подсистем $\overline{m} = \overline{m_1, m_k}$, $m_1, m_k \in \overline{1, n}$ ($m_i < m_j$, $i, j \in \overline{1, n}$). *Характеристикой многомерной относительной связи* (ХС) между k подсистемами \overline{m} в полной МСАУ, состоящей из n подсистем и имеющей математическую модель (1), является значение

$$H_m^-(s) = \frac{\det[W_{ij}(s)\gamma_{ij}]_{k \times k}}{\det[W_{ij}(s)\delta_{ij}]_{k \times k}}, \quad k = \overline{2, n}, \quad i, j \in \overline{m},$$

где $W_{ij}(s)$ – передаточные функции элементов матрицы многосвязного объекта управления,

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1, & i \neq j, \end{cases} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j = \overline{2, n}.$$

Если связи между подсистемами голономные, то $H_m^-(s) = h_m^-$, где h_m^- – числовой коэффициент.

Для гомогенных МСАУ целесообразно вести понятие обобщенной ХС, представляющей собой сумму элементов одного класса эквивалентности:

$$h_k = \sum \binom{n}{k} h_m^-, \quad k = \overline{2, n}, \quad \text{где } \binom{n}{k} = C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}.$$

Характеристическое уравнение гомогенной МСАУ с голономными связями может быть представлено через ИХ подсистем и ХС между ними:

$$1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) + \dots + h_n\Phi^n(s) = 0, \quad (2)$$

Рассмотрим уравнение

$$D(s, x) = 1 + h_2x^2 + \dots + h_nx^n = 0 \quad (3)$$

относительно переменной x , которое получается из (2) подстановкой $\Phi(s) = x$. Уравнение (3) называется *алгебраическим уравнением связи*. Тогда

Интеллектуальный анализ данных при проектировании многосвязных систем автоматического управления

для гомогенных МСАУ справедлив следующий критерий устойчивости [2].

Критерий устойчивости. Для устойчивости линейных гомогенных МСАУ необходимо и достаточно, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) замкнутой подсистемы $\Phi(j\omega)$, для всех $\omega \in (-\infty, +\infty)$, построенный на плоскости корней уравнения связи (3), не охватывал ни один из его корней.

При проектировании МСАУ следующей задачей после достижения устойчивого функционирования системы ставится задача выполнения заданных показателей качества переходных процессов. Зависимость рассматриваемых величин от параметров синтезируемой системы можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} q_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) = \text{func}_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \vdots \\ q_p(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) = \text{func}_p(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \end{cases}, \quad (4)$$

где q_1, \dots, q_p – показатели качества рассматриваемых переходных процессов;

$\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}$ – множества изменяемых параметров системы (коэффициентов усиления, постоянных времени и т.д.);

$\text{func}_1, \dots, \text{func}_p$ – функции, выражающие зависимость показателей качества системы от параметров синтезируемых регуляторов.

Рассмотрим в качестве основных показателей качества МСАУ перерегулирование и время регулирования подсистем. Тогда система уравнений (4) примет вид:

$$\begin{cases} t_{\text{per}1} = f_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \sigma_1 = g_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \vdots \\ t_{\text{per}n} = f_n(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \sigma_n = g_n(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \end{cases}$$

где $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ – перерегулирование, $t_{\text{per}1}, \dots, t_{\text{per}n}$ – время регулирования переходных процессов подсистем.

Требования к каждой подсистеме могут отличаться в зависимости от функционального назначения и режима функционирования МСАУ. При построении логического многосвязного регулятора для каждого режима синтез параметров проводится отдельно для дальнейшего объединения.

3. Методы интеллектуального анализа данных при решении задачи синтеза

Представить зависимость показателей качества функционирования МСАУ от параметров подсистем и связей между ними в математическом виде невозможно, что объясняется особенностями каждого класса систем и входящих в сложную систему подсистем. Показатели перерегулирования и времени регулирования имеют обратную зависимость, также

сказывается взаимное влияние подсистем друг на друга. Однако существуют многочисленные методы, позволяющие решить поставленную задачу.

В качестве инструментов синтеза параметров систем управления сложными объектами могут использоваться различные инструменты анализа данных, такие как искусственные нейронные сети, нечеткая логика, машинное обучение, эволюционные вычисления и генетические алгоритмы. В качестве наиболее подходящего выбран метод синтеза с использованием адаптивных нейро-нечетких сетей.

Адаптивные нейро-нечеткие сети объединяют в себе достоинства систем нечеткого вывода и нейронных сетей. С одной стороны, они позволяют разрабатывать и представлять модели систем в форме правил нечетких продукций, которые обладают наглядностью и простотой содержательной интерпретации, а с другой стороны, для построения правил нечетких продукций используются методы нейронных сетей, что является более удобным и менее трудоемким процессом для проектировщиков.

Например, при построении нейро-нечеткой сети, реализующей принятие решений по выбору параметров системы с целью удовлетворения заданным показателям перерегулирования, используется алгоритм, описанный в работе [3]. Выбор осуществляется по нескольким критериям: коэффициенты усиления и постоянные времени в перекрестных негOLONOMНЫХ связях. На рис.2 представлена структура рассматриваемой системы нечеткого вывода.

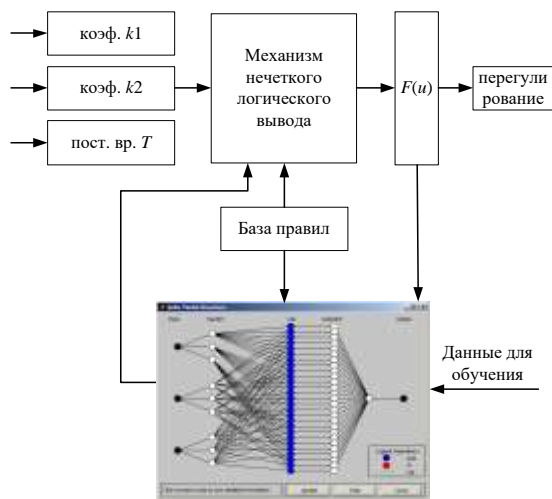


Рис.2. Структура системы нечеткого вывода

Качество обучения разрабатываемой сети напрямую зависит от количества примеров – объема обучающей выборки, и насколько полно примеры описывают данную задачу. Вся информация, используемая нейро-нечеткой сетью для построения системы нечеткого вывода, содержится во множестве обучающих выборок. При этом функции принадлежности синтезированных систем настроены

(обучены) так, чтобы минимизировать отклонения между результатами нечеткого моделирования и экспериментальными данными.

Аналогично проводится нейро-нечеткое моделирование при увеличении количества и сложности требуемых параметров. Для построения нейро-нечеткой сети в работе используется приложение программного комплекса MatLab – редактор ANFIS, с помощью которого автоматически синтезируется нейро-нечеткая сеть. Последовательность процесса разработки модели нейро-нечеткой сети имеет вид:

1. Подготовка обучающей выборки.
2. Загрузка обучающих данных.
3. Построение структуры системы нечеткого вывода.
4. Визуализация структуры гибридной сети.

Результаты обучения нейро-нечеткой сети экспортируем в рабочую область Matlab после чего их можно будет использовать в пакете Simulink, загрузив в блок Fuzzy Logic Controller, который будет выступать в качестве координирующей части нейро-нечеткого регулятора.

Расположение координирующей части в структурной схеме многосвязной САУ представлено на рис. 3.

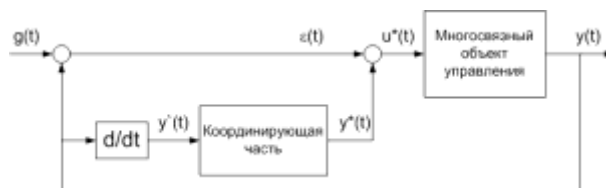


Рис.3. Координирующая часть нейро-нечеткого регулятора в структурной схеме МСАУ

Обученная сеть позволяет подбирать параметры МСАУ с учетом требуемых показателей качества, что дает возможность корректировать работу системы при изменениях условий функционирования.

4. Пример проектирования МСАУ

Рассмотрим задачу обеспечения заданных показателей качества МСАУ, состоящей из 6 неоднотипных объектов на различных режимах функционирования. На некотором фиксированном режиме графики переходных процессов имеют вид, представленный на рис. 4.

Для каждого режима заданы требования к показателям переходных процессов в следующем виде:

$$\{t_{\text{пер}}\} = \{1,1,1,1,1,1\} \quad (5)$$

$$\{\sigma_{\text{пер}}\} = \{0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1\}$$

Проведен синтез структуры системы, обеспечивающей устойчивость на заданном конкретном режиме согласно алгоритму [6].

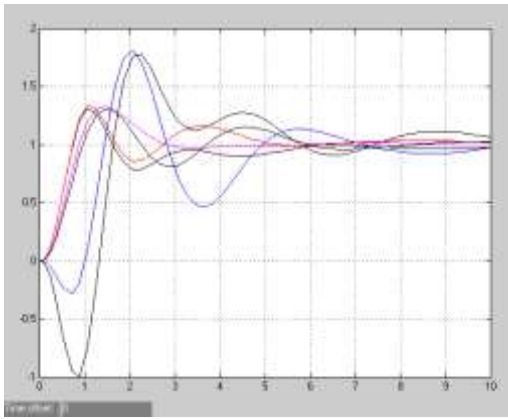


Рис.4. Графики переходных процессов МСАУ

При моделировании получены графики переходных процессов, представленные на рис. 5.

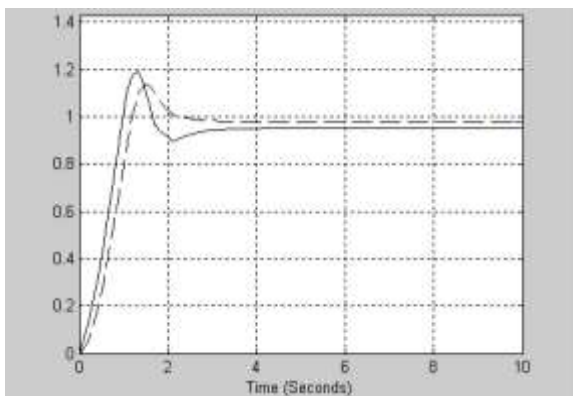


Рис.5. Графики переходных процессов МСАУ

Как видно из рис.5, синтезированная МСАУ обладает заданными показателями качества, то есть перерегулирование и время регулирования удовлетворяют требованиям

Аналогично проведены операции определения требуемых параметров на всех режимах функционирования МСАУ. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность разработанного метода синтеза.

5. Заключение

Таким образом, предложена процедура формирования многомерных связей в многосвязной системе управления, которая обеспечивает требуемые показатели качества. Проанализированы возможности повышения качества переходных процессов системы при различных распределениях связей между объектами с использованием нейросетевого моделирования.

Acknowledgments (благодарности)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00702 «Развитие методов анализа устойчивости многосвязных динамических систем управления сложными техническими объектами».

Список используемых источников

1. Петров Б.Н., Черкасов Б.А., Ильясов Б.Г., Куликов Г.Г. Частотный метод анализа и синтеза многомерных систем автоматического регулирования. – Докл. АН СССР, 1979, т.247, №2, с.304-307.
2. Ярушкина, Н. Г. Интеллектуальный анализ поведения сложных систем / Н. Г. Ярушкина, Т. В. Афанасьева // Радиотехника. Радиосистемы : журнал в журнале. – 2012 .– № 9 ; 2012 .– № 1 .– С. 10-13
3. Стратегическое управление на основе инженерии знаний [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Е. Гвоздев, Л. Р. Черняховская, Н. О. Никулина, О. В. Бармина ; Уфа : УГАТУ, 2017. <URL:http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Strateg_upr_na_osnove_inzhenerii_znaniy_uch_pos_2017.pdf>
4. Ильясов Б. Г. Применение логического регулятора для управления авиационным газотурбинным двигателем = The application of logical controller for aircraft gas turbine engine control / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, И. И. Сабитов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015 .– Т. 19, № 4 .– С. 132-137 .
5. Ильясов Б. Г. Управление неустойчивыми объектами в составе многосвязной автоматической системы / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/125-19941>
6. Ильясов Б.Г., Саитова Г.А., Халикова Е.А. Анализ запасов устойчивости гомогенных многосвязных систем управления. Известия РАН. Теория и системы управления, изд. «Наука/Интерпериодика», 2009, №4 – С. 4-12.