

УДК 681.5.01

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИМ АГРЕГАТОМ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА

Ильясов Б.Г., Сaitова Г.А., Халикова Е.А.

ФГОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа,
e-mail: khalikova_elen@mail.ru

В статье рассматривается решение задачи проектирования системы автоматического управления (САУ) газоперекачивающим агрегатом (ГПА) с заданными показателями качества. Основную сложность представляет наличие внутренних нелинейных связей и взаимозависимость подсистем в агрегате. В зависимости от функционального назначения и режима функционирования ГПА требования к каждой подсистеме могут отличаться. Для рассматриваемого режима синтез параметров регулятора проводится отдельно, а в дальнейшем разработанные регуляторы агрегируются в единый логический регулятор. При решении поставленной задачи используется описание сложной системы через характеристики подсистем и многомерные элементы связи между ними. В качестве индивидуальной характеристики отдельной подсистемы рассматривается ее передаточная функция в режиме управления, когда подсистема функционирует в изолированном от других подсистем состоянии. Построенные математические модели ГПА являются сложными для анализа и синтеза, в связи с этим при проектировании используются методы интеллектуального анализа данных. Синтез регулятора ГПА с заданными показателями качества проводится с использованием нейро-нечеткого моделирования, на основе которого формируются системы нечеткого вывода. Эффективность использования описанного алгоритма синтеза ГПА демонстрируется на конкретном примере.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, система управления, логический регулятор, нейро-нечеткое моделирование, показатели качества управления

THE SYNTHESIS OF ALGORITHMS FOR INTELLIGENT CONTROL OF GAS-COMPRESSOR UNIT TO ENSURE THE REQUIRED QUALITY

Ilyasov B.G., Saitova G.A., Khalikova E.A.

Federal State Educational Institution of Higher Education Ufa State Aviation Technical University, Ufa,
e-mail: khalikova_elen@mail.ru

The article considers the solution of the problem of designing the automatic control system of gas pumping unit (CGU) with the given quality indicators. The main difficulty is the presence of internal nonlinear relationships and interdependence of subsystems in the unit. Depending on the functional purpose and mode of operation of the CGU requirements for each subsystem may vary. For the considered mode, the synthesis of the controller parameters is carried out separately, and further developed controllers are aggregated into a single logical controller. In solving this problem, the description of a complex system through the characteristics of subsystems and multidimensional elements of communication between them is used. As an individual characteristic of a separate subsystem, its transfer function is considered in the control mode, when the subsystem operates in an isolated condition from other subsystems. The constructed mathematical models of CGU are complex for analysis and synthesis, in this regard, the design uses data mining methods. Synthesis of the CGU controller with the specified quality indicators is carried out using neuro-fuzzy modeling, on the basis of which the fuzzy inference systems are formed. The efficiency of the described CGU synthesis algorithm is demonstrated by a specific example.

Keywords: gas pumping unit, logic controller, control system, neuro-fuzzy modeling, control quality indicators

При проектировании системы автоматического управления после решения задачи обеспечения устойчивости возникает проблема обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов: перерегулирования, времени регулирования и других. 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 объясня-

ется особенностями каждого класса систем и входящих в систему подсистем, однако для решения задачи синтеза необходимо определить такие параметры, чтобы система удовлетворяла заданным требованиям.

Целью исследования является решение задачи проектирования САУ ГПА с заданными показателями качества на всех рассматриваемых режимах функционирования.

Для описания системы используются методы теории управления, а именно частотные методы. Одним из инструментов решения поставленной задачи является нейро-нечеткое моделирование на основе которого генерируются системы нечеткого вывода.

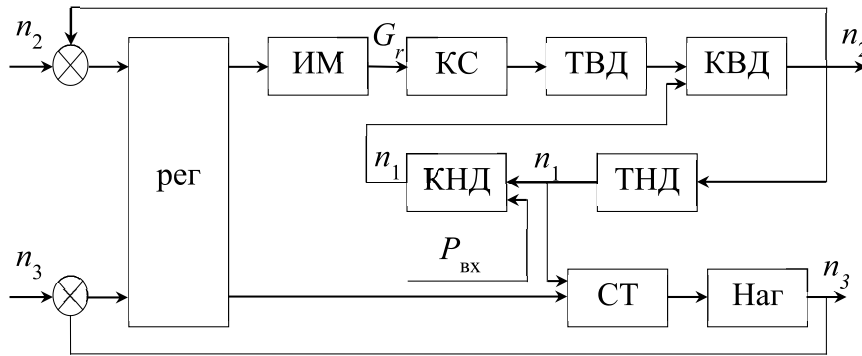


Рис. 1. Структурная схема регулирования ГПА

Описание модели систем управления газоперекачивающими агрегатами

В настоящее время наряду с применением газотурбинного двигателя (ГТД) в составе силовых установок самолетов и вертолетов их используют и в наземных установках, например на электростанциях в качестве привода генератора. При этом могут использоваться как специально разрабатываемые газотурбинные установки (ГТУ), так и авиационные двигатели, целенаправленно конвертированные для функционирования в системах наземных энергетических установок и ГПА [1].

На рис. 1 представлена модель системы управления газоперекачивающим агрегатом.

Введены следующие обозначения:

$P_{вх}$ – входное давление;

n_1, n_2, n_3 , – частоты на соответствующих участках;

ИМ – исполнительный механизм;

КВД – корпус высокого давления;

КНД – корпус низкого давления;

ТВД – турбина высокого давления;

ТНД – турбина низкого давления;

СТ – силовая турбина;

КС – компрессорная станция.

Регулирование топлива осуществляется по частоте вращения СТ. В качестве задания частоты вращения СТ выбирается то значение частоты вращения СТ, которое было в момент достижения частоты вращения малого газа.

Специалисты, на основании информации, касающейся эксплуатации газогенераторных перекачивающих агрегатов в течение последних 10 лет, установили, что выход их строя в большей степени сопряжен со следующими проблемами [2, 3]:

- ошибки при проектировании устройства.
- дефекты, допущенные при производстве агрегата и его сборке, а также монтажа.
- неисправности материалов.

Система управления ГПА должна иметь три уровня, на каждом из которых решается своя задача. Наиболее тесно связанными

представляются задачи локального управления ГПА и управления ГПА в составе КЦ. Эти задачи должны решаться децентрализованной системой, на нижнем уровне которой находятся однотипные локальные САУ ГПА, количество которых совпадает с количеством ГПА в компрессорном цехе. С точки зрения математического обеспечения задача локального управления ГПА является достаточно тривиальной, она решается классическими ПИ- и ПИД-регуляторами. Нелинейность и многомерность газотурбинного двигателя как объекта управления приводят к необходимости введения нескольких контуров обратной связи, иногда с переменными (адаптивными) коэффициентами усиления.

В работе [4] предложено описание сложных динамических систем через характеристики подсистем и многомерные элементы связи между ними. В качестве индивидуальной характеристики отдельной подсистемы рассматривается ее передаточная функция в режиме управления, когда подсистема функционирует в изолированном от других подсистем состоянии.

При проектировании систем управления следующей задачей после достижения устойчивого функционирования ставится задача выполнения заданных показателей качества переходных процессов [5]. Зависимость рассматриваемых величин от параметров синтезируемой системы можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} q_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) = \text{func}_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \vdots \\ q_p(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) = \text{func}_p(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \end{cases}, \quad (1)$$

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.);

$func_1, \dots, func_p$ – функции, выражающие зависимость показателей качества системы от параметров синтезируемых регуляторов.

Рассмотрим в качестве основных показателей качества систем перерегулирование и время регулирования подсистем. Тогда система уравнений (1) примет вид

$$\begin{cases} t_{\text{пер}1} = f_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \sigma_1 = g_1(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \vdots \\ t_{\text{пер}n} = f_n(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \\ \sigma_n = g_n(\{k_i\}, \{\tau_i\}, \{T_i\}) \end{cases}, \quad (2)$$

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

Показатели качества функционирования, предъявляемые к каждой подсистеме, могут отличаться в зависимости от функционального назначения и режима функционирования системы. При построении логического многосвязного регулятора для каждого режима синтез параметров проводится отдельно с целью последующего объединения.

Методы интеллектуального анализа данных при решении задачи синтеза

Построенные математические модели ГПА являются сложными для анализа и синтеза регуляторов, в связи с этим при проектировании используются методы интеллектуального анализа данных: методы распознавания и оценки технического состояния (объекта, ГТД, ГПА), методы интеллектуального управления, методы нелинейного управления, методы теории многосвязных систем автоматического управления, теории систем искусственного интеллекта.

Представить зависимость показателей качества функционирования системы от параметров подсистем и связей между ними в математическом виде очень сложно, 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 различные методы, позволяющие решить поставленную задачу.

В качестве инструментов синтеза параметров систем управления сложными объектами могут использоваться инструменты анализа данных, такие как искусственные нейронные сети, нечеткая логика, машинное обучение, эволюционные вычисления, генетические алгоритмы и т.д. В качестве наиболее подходя-

щего 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 работах [6, 7]. Выбор осуществляется по нескольким критериям: коэффициенты усиления и постоянные времени в перекрестных неголономных связях. На рис. 2 представлена структура рассматриваемой 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 [8].

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

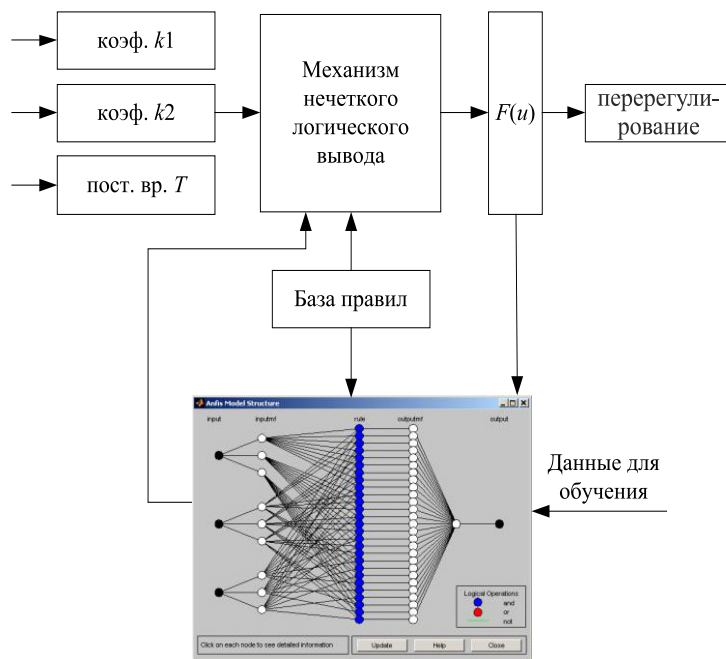


Рис. 2. Структура системы нечеткого вывода

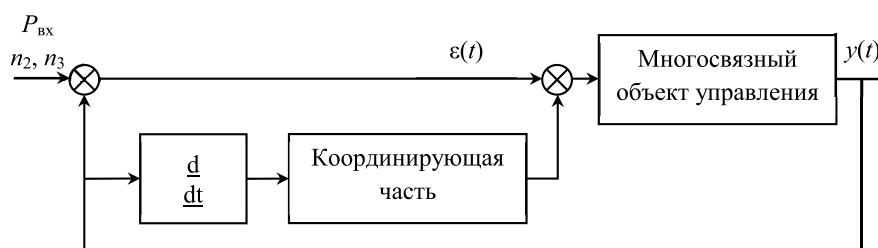


Рис. 3. Координирующая часть нейро-нечеткого регулятора в структурной схеме САУ

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

Пример проектирования системы управления

Рассмотрим задачу обеспечения заданных показателей качества на одном из режимов функционирования. Для рассматриваемого режима заданы требования к показателям переходных процессов (2) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \{t_{\text{пер}}\} &= \{2; 2\}, \\ \{\sigma_{\text{пер}}\} &= \{0,2; 0,2\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Проведен синтез структуры системы, обеспечивающей устойчивость и заданные показатели устойчивости на заданном конкретном режиме согласно алгоритму [5, 10].

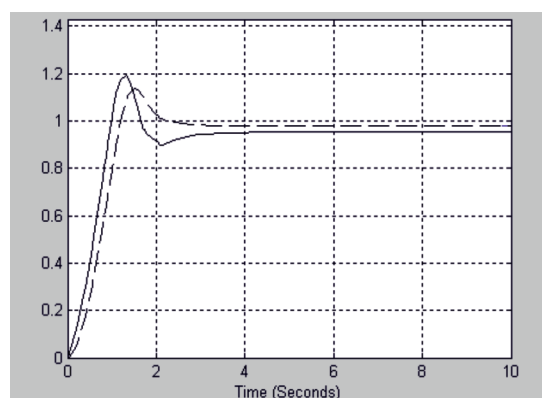


Рис. 4. Графики переходных процессов САУ

При моделировании получены графики переходных процессов, представленные на рис. 4.

Как видно из рис. 4, синтезированная система обладает заданными показателя-

ми качества (3), то есть перерегулирование и время регулирования удовлетворяют требованиям. Аналогично проведены операции определения требуемых параметров на всех режимах функционирования системы, затем проводится агрегирование результатов. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность разработанного метода синтеза.

Заключение

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-48-020956 р_а «Математическая модель и алгоритмы управления газотурбинным двигателем, работающим на природном газе и предназначенным для газоперекачивающих агрегатов».

Список литературы

1. Гумеров Х.С., Хабибуллин Р.З. Анализ аварийной остановки ГТД АЛ-31СТ по причине помпажа // Труды V Всероссийской конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (с приглашением зарубежных ученых). Т. 2. Май 16–19. Уфа, 2017. С. 128–130.
2. ФГУП «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ» | Продукция | АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ | АЛ-31Ф серии 42 (М1) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.salut.ru/ViewTopic.php?Id=652> (дата обращения: 10.11.2018).
3. Антропов П.Г., Долинина О.Н., Кузьмин А.К., Шварц А.Ю. Использование интеллектуальных систем для диагностики неисправностей газоперекачивающих агрегатов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11252> (дата обращения: 10.11.2018).
4. Петров Б.Н., Черкасов Б.А., Куликов Г.Г. Частотный метод анализа и синтеза многомерных систем автоматического регулирования // Доклады АН СССР. 1979. Т. 247. № 2. С. 304–307.
5. Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А., Сабитов И.И. Применение логического регулятора для управления авиационным газотурбинным двигателем // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19. № 4. С. 132–137.
6. Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А. Анализ устойчивости динамических систем, представленных в полиномиальной векторно-матричной форме // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2018. № 2. С. 3–10. DOI: 10.7868/S0002338818020014.
7. Гвоздев В.Е., Черняховская Л.Р., Никулина Н.О., Бармина О.В. Стратегическое управление на основе инженерии знаний: уч. пособие. Уфа: УГАТУ, 2017 [Электронный ресурс]. URL: http://e-library.ufa-rb.ru/dl/lib_net_r/Strateg_upr_na_osnove_inzhenerii_znaniy_uch_pos_2017.pdf (дата обращения: 17.11.2018).
8. Ярушкина Н.Г., Афанасьева Т.В. Интеллектуальный анализ поведения сложных систем // Радиотехника. Радиосистемы: журнал в журнале. 2012. № 9; 2012. № 1. С. 10–13.
9. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2014. 288 с.
10. Ильясов Б.Г., Сайтова Г.А., Халикова Е.А. Интеллектуальный анализ данных при проектировании многоосвязных систем автоматического управления // Труды VI Всероссийской конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (ITIDS 2018). Т. 3. Май 28–31. Уфа, 2018. С. 17–20.