

УДК 004.65

DOI 10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no4-p3

EDN KLMKCW

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ТЕОРИИ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Б. Г. Ильясов • Г. А. Саитова

Аннотация. В статье рассмотрены различные научные подходы к исследованию свойств (в частности, устойчивости) многосвязных систем управления (МСУ), основанные на различных моделях их описания. Показаны необходимость и эффективность сочетания математических моделей МСУ с их физическим содержанием, что открывает новые перспективы в изучении реальных сложных систем. Предложены методика описания МСУ через индивидуальные характеристики САУ и элементы многомерных связей между ними; критерии устойчивости для линейных МСУ с идентичными САУ; критерий устойчивости состояния равновесия системы, а также технология нахождения параметров периодических движений и оценка их устойчивости для нелинейных МСАУ.

Ключевые слова: многосвязная система; декомпозиция; частотные методы; линейная система; нелинейная система.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение поведения сложных объектов, явлений, процессов и систем всегда было актуальным и по сей день остаётся в центре внимания науки [1–6]. Проведенные исследования чётко показали, что имеющиеся у человечества знания недостаточны для понимания свойств и поведения этих сложных систем, явлений, процессов. В работе среди множества существующих в природе сложных систем рассмотрен класс многосвязных систем управления (МСУ) многомерными динамическими объектами различной физической природы (РФП). МСУ состоит из множества автономно управляемых систем РФП, взаимодействующих друг с другом, образуя единый сложный комплекс. При этом управляемые системы могут иметь как локальные цели управления, так и индивидуальные структуру и свойства. Кроме того, математические модели как систем, так и связей между ними могут быть самыми разнообразными как физической, так и математической природы.

Целью исследования являются изучение динамических свойств данного класса систем на уровне математической модели и разработка теоретических положений, которые адекватно отражали бы их оригинальное строение и свойства.

1. МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МСУ

Анализируя подходы к исследованию и проектированию МСУ сложными динамическими объектами (СДО), можно выделить две основные модели (парадигмы), основанные на различных способах описания системы и применяемых методах к их исследованию.

Первая модель исследования (представления) основана на описании МСУ в переменных состояниях [7–10] и реализует чисто математический подход, когда описание МСУ в виде дифференциального уравнения n -го порядка сводят к ее описанию в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка (форма Коши).

Пусть МСУ описывается системой уравнений, заданной в векторно-матричной форме:

$$\dot{X} = AX + BU, Y = CX, \quad (1)$$

где $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$, $B = \|b_{ik}\|_{n \times m}$, $C = \|c_{\lambda i}\|_{p \times n}$, есть матрицы с числовыми значениями коэффициентов; X – вектор переменных состояния; Y – вектор выходных переменных состояния; U – вектор входных переменных (управление).

При такой модели МСУ ее структура и физическое содержание полностью растворяются в математической структуре (1).

Задавая различные значения числовым параметрам матриц A , B , C и осуществляя математические преобразования над этими матрицами, можно определить в любой момент времени состояние системы X (траекторию движения как решение системы (1)).

Далее путём преобразования характеристического уравнения системы (1)

$$D(s) = \det[Is - A] = 0 \quad (2)$$

к характеристическому уравнению развернутого вида

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (3)$$

осуществляется анализ устойчивости МСУ по известным критериям, где I – единичная матрица, a_i – параметры системы; s – оператор Лапласа.

При этом проблема генезиса (природы происхождения) устойчивости МСУ остается по-прежнему открытой.

Другой недостаток этой парадигмы, с точки зрения инженерной практики, заключается в трудности установления прямой связи между переменными состоянием и физическими параметрами реальной системы. По этой причине реализация данной парадигмы при проектировании реальных МСУ встречает определенные трудности и ограничения. Используя данную парадигму, инженер-проектировщик не может получить четкий ответ на вопрос: как изменятся свойства МСУ, если одновременно внести изменения в характеристики тех или иных элементов реальной конструкции системы? Останется ли при этом реальная система устойчивой?

Таким образом данный абстрактный подход к изучению свойств (устойчивости) МСУ многомерными объектами РФП малоэффективен, с точки зрения понимания механизма формирования ее свойств.

Вторая модель исследования (представления) основана на описании МСУ в форме матричных передаточных функций (МПФ) [9–14].

Недостаток данной парадигмы в какой-то степени повторяет недостатки парадигмы описания МСУ в пространстве состояний. В результате матричных преобразований инженер-проектировщик получает конечный результат при заданных параметрах МПФ $R(s)$ многомерного регулятора, МПФ $W(s)$ многомерного объекта управления и заданных входных воздействий $U(s)$, $F(s)$. При этом производимые матричные преобразования не раскрывают как сути происходящих физических процессов внутри системы и её элементов, так и механизма формирования свойств МСУ.

Широкому распространению математического аппарата теории матриц способствовало бурное развитие вычислительной техники. Эти подходы были хорошо понятны математикам, но не инженерам-проектировщикам, для которых при матричных преобразованиях «исчезали» физичность восприятия строения системы, её отдельных конструктивных элементов и их роль в формировании свойств системы, как это было при проектировании систем автоматического управления с одним входом и одним выходом. Причина этого недостатка кроется в переходе от описания характеристик МСУ через характеристики динамических звеньев к описанию через МПФ регулятора и объекта. Теперь встает вопрос: как установить связь между физическими параметрами МСУ и параметрами матричных преобразований? За матричными преобразованиями пропадает физическая сущность МСУ.

Анализ устойчивости МСУ происходит по-прежнему на основе анализа характеристического уравнения (3), которое получено путем преобразования характеристического уравнения МСУ:

$$D(s) = \det[I + W(s)R(s)] = 0, \quad (4)$$

представленного в матричной форме.

Таким образом, представление МСУ как в пространстве переменных состояний (2), так и в матричной форме (4) не позволяет проводить глубокий анализ влияния отдельных физических элементов МСУ, их свойств и связей на устойчивость системы в целом.

Требуются разработка и развитие физико-математического подхода к теории МСУ, основанного на системном представлении МСУ с сохранением физичности строения и восприятия как её отдельных систем, так и связей между ними.

При этом следует помнить об исследованиях свойств двухсвязных САУ, образованных взаимодействием двух физических САУ. Результаты этих исследований изложены в работах А. А. Красовского, М. В. Меерова, О. С. Соболева, В. Т. Морозовского и ряда других исследователей [10–14]. Однако ограничения на возможность исследования МСУ более высокой размерности остановили исследования в этом направлении. Необходимо было пересмотреть взгляд на методологию изучения динамических свойств МСУ сложными объектами РПФ.

2. СТРУКТУРА МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Структура МСУ состоит из множества отдельных систем автоматического (автономного) управления (САУ) и множества различных типов связи между системами.

Автономная система управления представляет собой модель замкнутой системы с обратной связью, включающей в себя:

- модель управляемого параметрами многомерного объекта;
- модель исполнительной части системы;
- модель информационной части системы;
- модели программы и алгоритма поведения управляемого параметра;
- модель внешних воздействий.

Всем этим моделям можно противопоставить реальный физический прототип. Модель САУ адекватна реальной физической системе управления, которая обладает двумя интеллектуальными свойствами: во-первых, с определённой точностью реализует программу управления, во-вторых, не позволяет системе сильно отклоняться от программы управления при действии внешних воздействий.

Модель САУ может относиться к классу линейных и нелинейных, непрерывных и дискретных, а также интеллектуальных, логических систем. Такими же разнообразными могут быть и модели связей между системами. В структуре МСУ важно выделить отдельно связи между парами, тройками, четвёрками и так далее систем, так как эти взаимные групповые связи сильно влияют на свойства всей МСУ.

По структуре связей между САУ можно выделить два типа МСУ. В первой структуре МСУ все САУ связаны друг с другом по собственным ошибкам управления, то есть каждое САУ принимает решение не только по собственной ошибке, но и с учётом ошибок управления других САУ. Здесь главная проблема: согласовать локальные цели с глобальной целью МСУ.

Во второй структуре МСУ связь между САУ осуществляется через многомерный объект управления, в результате положение регулирующего органа каждой САУ влияет на состояние всех регулируемых выходных координат многомерного объекта управления. Здесь проблема управления заключается в качественном достижении желаемого состояния многомерного объекта с учётом физических связей между САУ.

Возможна и более сложная структура МСУ, объединяющая указанные две структуры воедино с целью достижения более высокого качества управления МСУ как единой системой.

Таким образом, в дальнейшем описание МСУ будет происходить на уровне описания индивидуальных характеристик САУ $\Phi_i(s)$ и многомерных связей $H(s)$ между ними.

3. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ МСУ

В конце 1970-х гг. академиком АН СССР Б. Н. Петровым была поставлена задача: осуществить описание МСУ более крупными (чем динамические звенья системы) физическо-математическими блоками и многомерными элементами физических связей между ними. Сам академик Б. Н. Петров известен в теории автоматического управления как автор парадигмы перехода от системы дифференциальных уравнений к ее структурному представлению в виде математических моделей функциональных физических блоков с операторами и связями между ними [15]. Эта парадигма дала новый колоссальный толчок в развитии и создании классической теории автоматического управления (ТАУ).

Теперь перед исследователями стояла задача разработки такого описания МСУ, чтобы сохранилась физичность структуры системы и всех преобразований над ней таким образом, чтобы инженер-проектировщик точно знал (не решая систему дифференциальных уравнений), какие вносимые им изменения будут способствовать улучшению динамических свойств МСУ в целом.

Решение этой проблемы в виде новой формы описания характеристического уравнения МСУ через физические характеристики отдельных САУ и многомерные характеристики связей между ними было представлено в Докладах Академии наук СССР [16].

В этой форме записи вводится упорядоченная маркировка как характеристик отдельных САУ, так и элементов многомерной связи с указанием их размерности с целью подчеркивания их индивидуальности [17–19].

В качестве индивидуальной характеристики (ИХ) i -й САУ рассмотрим ее передаточную функцию $\Phi_i(s)$ в режиме управления, когда i -я система функционирует в изолированном (автономном) от других САУ режиме:

$$\forall i: \Phi_i(s) = \frac{X_i(s)}{X_i^o(s)} = \frac{R_i(s)W_{ii}(s)}{1+R_i(s)W_{ii}(s)}, \quad (5)$$

где $R_i(s), W_{ii}(s)$ – передаточные функции регулятора и многомерного объекта для i -й САУ. При этом i -я САУ соответствует реальной физической системе, имеющей самостоятельное конструкторское значение и свою индивидуальную динамическую характеристику (модель), которая широко используется в классической ТАУ с ее хорошо развитыми методами исследования замкнутых систем с одним входом и одним выходом.

Для конкретизации отношений между отдельными САУ и выражения их особенностей введем в рассмотрение многомерную характеристику связей (МХС). Эта характеристика (модель) отражает реально существующие (физические) взаимоотношения между системами, математическая модель которых строится из множества типовых динамических звеньев классической ТАУ. Для рассматриваемого класса МСУ перекрестные связи между отдельными САУ определяются только недиагональными элементами $W_{ij}(s)$ ($i \neq j$) МПФ $W(s)$ многомерного объекта управления, которые образуют матрицу связей

$$\|W_{ij}(s)\gamma_{ij}\|, \text{ где } \gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & i \neq j, \\ 0, & i = j, \end{cases} \quad i, j = \overline{1, n}.$$

Эта матрица отражает индивидуальность отношений между парами, тройками, четверками и т. д. систем.

Для данного класса МСУ важно выявить не столько абсолютное действие перекрестных связей, сколько их действие относительно прямых связей через многомерный объект управления:

$$\|W_{ij}(s)\delta_{ij}\|, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j = \overline{1, n}.$$

Тогда математическая модель МХС между k системами будет иметь вид:

$$H_k(s) = \frac{\det \|W_{ij}(s)\gamma_{ij}\|_{k \times k}}{\det \|W_{ij}(s)\delta_{ij}\|_{k \times k}}. \quad (6)$$

Характеристика $H_k(s)$ может быть либо вещественной, либо комплексной, либо мнимой.

По характеру действия МХС может быть гибкой или жесткой, стабилизирующей или дестабилизирующей, форсирующей, инерционной или запаздывающей. В общем случае она характеризует как знак, так и величину («силу»), а также характер связей в группе из k САУ, которые соединены в единое целое этим многомерным элементом связи.

На основании вышеизложенного характеристическое уравнение МСУ может быть представлено через индивидуальные характеристики САУ и МХС между ними:

$$D(\Phi, H) = 1 + \sum_{i,j=1}^{C_n^2} \Phi_i \Phi_j H_{ij} + \sum_{i,j,k=1}^{C_n^3} \Phi_i \Phi_j \Phi_k H_{ijk} + \dots + H_{1n} \prod_{i=1}^n \Phi_i = 0. \quad (7)$$

Для МСУ с гомогенными (однотипными, идентичными) САУ, учитывая, что

$$\Phi_1(s) = \Phi_2(s) = \dots = \Phi_n(s) = \Phi(s), \quad (8)$$

получим характеристическое уравнение с комплексными коэффициентами относительно переменной $\Phi(s)$ [20–22]:

$$D(\Phi, H) = 1 + H_2(s)\Phi^2(s) + H_3(s)\Phi^3(s) + \dots + H_k(s)\Phi^k(s) + \dots + H_n(s)\Phi^n(s) = 0, \quad (9)$$

где $H_k(s)$ – обобщенная МХС для системы k -го размера, которая вычисляется по формуле (6).

Рассмотрим случай, когда многомерная связь либо только через объект, либо только через регулятор выражается в виде числовых коэффициентов k_{ij} . При этом МХС будет иметь вид:

$$h_k = \frac{\det \|K_{ij}\gamma_{ij}\|_{k \times k}}{\det \|K_{ij}\delta_{ij}\|_{k \times k}}. \quad (10)$$

Тогда характеристическое уравнение для гомогенных (однотипных) МСУ будет иметь вид:

$$D(\Phi, h) = 1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) + \dots + h_n\Phi^n(s) = 0. \quad (11)$$

Уравнению (11) будет соответствовать следующее уравнение связей:

$$D(x, h) = 1 + h_2x^2(s) + \dots + h_nx^n(s) = 0, \quad (12)$$

которое определяет корни характеристического уравнения (11), образованные за счёт наличия связей между группами САУ.

Рассмотрим случай, когда индивидуальную характеристику САУ можно представить в виде

$$\Phi(s) = \frac{1}{A(s)},$$

где $A(s)$ есть характеристический полином САУ, а уравнение $A(s) = 0$ есть характеристическое уравнение САУ, корни которого определяют её свойства. Тогда характеристическое уравнение МСУ (11) примет вид:

$$D(A, h) = A^n(s) + h_2A^{n-2}(s) + h_3A^{n-3}(s) + \dots + h_{n-1}A(s) + h_n = 0. \quad (13)$$

Этому уравнению соответствует следующее уравнение связи:

$$D(h, x) = x^n + h_2x^{n-2} + h_3x^{n-3} + \dots + h_n = 0. \quad (14)$$

Представленные формы (11) и (13) характеристических уравнений МСУ позволяют анализировать её устойчивость в зависимости от свойств как отдельных систем управления, так и многомерных связей между ними.

4. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ МСУ

Ниже представлены основные работы авторов статьи, направленные на развитие линейной и нелинейной физико-математической теории МСУ.

Для динамической устойчивости МСУ в работах [21, 22] представлен критерий устойчивости линейной МСУ с голономными связями, образованной множеством САУ с характеристикой $\Phi(s)$ и МХС между ними. Критерий дает необходимые и достаточные условия устойчивости МСУ, определяемые поведением амплитудно-фазовой характеристики $\Phi(j\omega)$ САУ относительно корней (критических точек) уравнения связи (12).

При этом можно определять как запасы устойчивости МСУ в целом, так и условия нахождения её на границе устойчивости.

Для МСУ с идентичными САУ введено понятие запасов устойчивости (по модулю и по фазе) как расстояния соответствующей частотной характеристики системы на комплексной плоскости до ближайшей критической точки уравнений многомерных связей [20]. Данное положение справедливо и при наличии у идентичных систем элементов с чистым запаздыванием и для систем с цифровой управляющей частью.

В работе [23] представлен критерий устойчивости линейной МСУ с голономными связями, определяющий поведение индивидуальной полиномиальной характеристики $A(j\omega)$ САУ относительно корней уравнения связей (14). Здесь также можно определять запасы устойчивости МСУ в целом и условия нахождения её на границе устойчивости.

В работе [24] показаны эффективность применения этих критериев для анализа устойчивости МСУ, содержащей элементы с чистым запаздыванием. Показана возможность вычисления критического запаздывания для системы и её элементов. Полученные критерии позволяют проектировать классы устойчивых МСУ, имеющих определенный запас устойчивости.

На основе полученных результатов разработан критерий устойчивости цифровых МСУ, который позволяет выбирать период квантования для цифровой САУ [25].

Раскрыты как причина нарушения статической устойчивости МСУ [19, 26], так и природа возникновения её структурной неустойчивости из-за проведения структурных преобразований в системе. Получены критерии структурной устойчивости МСУ.

Основываясь на полученных результатах, были сформулированы закономерности для МСУ, состоящей из связанных устойчивых идентичных систем, что позволило оценить устойчивость МСУ в целом:

условия статической устойчивости данного класса МСУ одновременно являются и условием ее структурной устойчивости, так как при нарушении этих условий МСУ нельзя сделать устойчивой за счет изменения параметров систем.

Показано, что если для уравнения (12) выполняется условие статической устойчивости

$$1 + \sum_{i=1}^n h_i > 0,$$

то МСУ будет структурно устойчива.

Показано, что если в составе МСУ появится структурно-неустойчивая система, то это будет достаточным условием структурной неустойчивости всей МСУ, в которой все системы связаны друг с другом по выходным координатам численными коэффициентами связи, ибо изменение коэффициентов связи не позволяет в этом случае восстановить структурную устойчивость МСУ в целом.

Получен критерий устойчивости МСУ с двукратными связями как через многомерный регулятор, так и через многомерный объект управления [26]. Полученный критерий позволяет формировать связи через многомерный регулятор для улучшения динамических свойств МСУ в целом.

5. АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ МСУ

Рассмотрен класс нелинейных МСУ, в которых отдельные нелинейные системы управления вместе с коэффициентами связи удовлетворяют условию фильтра низких частот, что позволяет применять метод гармонической линеаризации. Приведён критерий устойчивости положения равновесия гармонически линеаризованной нелинейной МСУ, согласно которому характеристический полином нелинейной системы $\Phi(j\omega, a)$ при варьировании амплитуды a в некотором диапазоне должен охватывать все критические точки уравнения связи (14). Дана методика вычисления параметров периодических движений для данного класса нелинейных МСУ на основе начальной информации о характеристическом полиноме нелинейной системы $\Phi(j\omega, a)$ и о значениях корней уравнения связи (14) между ними. Дан критерий устойчивости периодических движений для данного класса нелинейных МСУ [27].

В работе [27] дан анализ периодических движений в нелинейной МСУ с нелинейностями в перекрёстных каналах связи, включающий в себя метод оценки параметров возникающих периодических движений, а также критерий устойчивости периодических движений.

Разработана методика построения областей устойчивости периодических движений и областей устойчивости положения равновесия нелинейных МСУ [28]. Области устойчивых периодических движений и устойчивого положения равновесия нелинейных многосвязных систем управления построены в плоскости амплитудно-фазовых характеристик ее сепаратных систем и корней характеристического уравнения связи.

Наличие информации об этих областях позволяет обоснованно выбирать параметры искусственных гибких связей между отдельными системами и оценивать их влияние на устойчивость в МСУ в целом.

Найдено достаточное условие устойчивости положения равновесия МСУ с нелинейными элементами в сепаратных САУ или связях между ними [29, 30].

Известны постановка и решение задачи абсолютной устойчивости положения равновесия нелинейной одномерной системы с одним входом и одним выходом, у которой нелинейность расположена в заданном угле. Решение данной задачи осуществляется на основе частотного критерия В. М. Попова, но данный критерий не подходит для определения абсолютной устойчивости многосвязных систем управления. Предлагаются формулировка и пример применения частотного критерия, позволяющего определить достаточное условие абсолютной устойчивости нелинейной многосвязной системы управления, основанного на системном описании многосвязных систем автоматического управления через характеристики систем и многомерных элементов связи между ними. Решение задачи усложняется при наличии внутренних нелинейных связей между системами.

В работе [31] дан критерий устойчивости периодических движений в нелинейной МСУ, представляющей собой множество САУ с нечёткими регуляторами и жёстко связанными друг с другом через объект управления. Дана методика определения параметров периодических движений.

Проведён анализ периодических движений в нелинейной МСУ с нелинейными связями между САУ [28].

Таким образом, использование структурно-функциональной декомпозиции МСУ и частотных методов позволяет расширить методы классической теории управления на класс линейных и нелинейных МСУ, в том числе с элементами искусственного интеллекта [30–31], адаптивными [32], цифровыми системами [25]. Данный подход в теории многосвязных систем принципиально отличается от существующих подходов тем, что позволяет в процессе исследований сохранить физический смысл как каждого элемента САУ, так и каждого элемента связи, и их роль в формировании свойств МСУ.

Полученные результаты могут быть полезны исследователям в различных научных направлениях.

6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ТЕОРИИ МСУ

Благодаря аналитическому представлению МСУ в виде соединения множества самостоятельных САУ через множество возможных связей между ними открывается перспектива изучения в аналитической форме динамических свойств МСУ различной физической природы (РФП) на основе их математических моделей.

Эта перспектива охватывает различные классы МСУ: технические, технологические, организационные, экономические, социальные, биологические, химические, геологические (природные), государственные, политические и так далее.

На практике разработанная физико-математическая методология может использоваться при анализе и синтезе поведения:

- технических, технологических, организационных МСУ;
- коллектива людей и отдельных её членов при достижении общей цели;
- общества как результата взаимосвязанного поведения социально-экономических систем в целом, так и её отдельных участников, например, таких как промышленные предприятия, ресурсобеспечивающие предприятия;
- транспортных и энергетических комплексов, социальных организаций и т. д.;
- отдельных государств и различных форм их объединения, а также понимание их политики и действий по отношению к друг другу, обществу, природе в целом;
- сложных биологических систем, выявлению роли отдельных организмов в формировании свойств и качества функционирования всей биосистемы в целом;
- природных систем с учётом взаимодействия их друг с другом, а также с человеком и обществом с целью сохранения целостности всей глобальной системы и устойчивости её поведения.

Детальное изучение каждой МСУ из этого класса в предлагаемом научном направлении позволяет вскрыть закономерности в формировании как их свойств, так и поведения, что имеет важное значение для понимания законов функционирования этих классов МСУ.

Особый интерес вызывает изучение динамических свойств и поведения интеллектуальных многоуровневых МСУ сложными объектами РФП, направленное на сохранение устойчивости и эффективности функционирования МСУ в целом в различных жизненных ситуациях.

Таким образом, развивая полученные результаты, для человечества открывается возможность познания динамических свойств новых классов сложных систем и прикладного использования научных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сочетание математических моделей МСУ объектами РФП с их физическим содержанием открывает возможность объективного изучения и понимания реального мира и происходящих в нём процессов.

2. Показаны актуальность, востребованность и необходимость решения проблемы совершенствования физико-математических методов исследования (анализа) и проектирования (синтеза) МСУ сложными объектами РФП. Успешное решение этой проблемы имеет важное народно-хозяйственное значение не только для науки и образования, но и для прикладных областей знаний, для укрепления обороноспособности страны.

Физико-математический подход к анализу функционирования сложных МСУ РФП позволяет:

- решать задачи самоорганизации отдельных систем в составе МСУ;
- раскрыть как причины поведения отдельных систем при сложившихся отношениях, так и устранить конфликты между ними;
- формировать реакцию МСУ на внешнее воздействие;

– изменять структуру систем и отношение между ними для достижения устойчивости МСУ;

– перенести исследования физических свойств МСУ объектами РФП на исследования с помощью их математических моделей, адекватно отражающих реальные свойства физических МСУ;

– повышать эффективность исследований и практического применения полученных результатов.

3. Изучение динамических свойств МСУ сложными объектами РФП целесообразно осуществлять по двум направлениям.

В первом направлении анализ свойств МСУ осуществляется на основе её декомпозиции на отдельные САУ и множество связей между ними.

Во втором направлении синтез свойств МСУ осуществляется на основе её композиции из отдельных САУ и множества различных связей между ними.

Оба направления позволяют эффективно изучать и проектировать динамические свойства МСУ сложными объектами РФП.

4. Различные формы оценки (критерии) глобальной устойчивости МСУ сложными объектами РФП позволяют расширить фронт исследований.

5. Цель дальнейших исследований должна быть направлена, во-первых, на изучение и теоретическое обобщение динамических свойств существующего многообразия МСУ сложными объектами РФП, во-вторых, на практическое применение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Зубов Н. Е., Рябченко В. Н. Оптимальная стабилизация бокового движения летательного аппарата декомпозиционным методом модального синтеза // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24. № 8. С. 433–439. DOI 10.17587/mau.24.433-439. EDN PHKBDQ. [[Zubov N. E., Ryabchenko V. N. "Optimization of stabilization of the lateral motion of an aircraft using the decomposition method of modal synthesis" // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2023;24(8):433-439. (In Russian).]]
2. Баженов С. Г., Козьяйчев А. Н., Королев В. С. Частотные методы анализа устойчивости самолета с многосвязной системой управления // Проблемы управления. 2020. № 2. С. 20–27. [[Bazhenov S. G., Kozyaychev A. N., Korolyov V. S. "Stability analysis of airplane with MIMO control system based on frequency methods" // Control Sciences. 2020. No. 2, pp. 20–27. (In Russian).]]
3. Антипин А. Ф., Антипина Е. В. Многомерный многосвязный нечеткий интервально-логический регулятор // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25. № 2. С. 72–78. DOI 10.17587/mau.25.72-78. EDN QFFLTU. [[Antipin A. F., Antipina E. V. "Multidimensional multi-connected fuzzy interval-logic controller" // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2024;25(2):72-78. (In Russian).]]
4. Карабутов Н. Н. Об идентификации взаимосвязанных систем // Russian Technological Journal. 2024. Т. 12. № 5. С. 63–76. DOI 10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76. EDN OIBKMA. [[Karabutov N. N. "On identification of interconnected systems" // Russ. Technol. J. 2024;12(5):63-76. DOI 10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76. EDN OIBKMA. (In Russian).]]
5. Паршева Е. А. Модифицированный алгоритм адаптации высокого порядка для децентрализованного управления многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию // Проблемы управления. 2008. № 3. С. 37–43. [[Parsheva E. A. // Control Sciences. 2008. No. 3, pp. 37–43. (In Russian).]]
6. Макарова Е. А., Габдуллина Э. Р., Юсупов М. М., Камаева Р. Р. Структура и динамические модели управляемого взаимодействия секторов домохозяйств и государственных учреждений // СИИТ. 2024. Т. 6. № 1(16). С. 67–76. EDN TWYQFA. [[E. A. Makarova, E. R. Gabdullina, M. M. Yusupov, R. R. Kamaeva, "Structure and dynamic models of controlled interaction sectors of households and government agencies" // SIIT. 2024. Vol. 6, No. 1(16), pp. 67-76. (In Russian).]]
7. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд-во научной литературы Н. Ф. Бочкаревой, 2006. 720 с. [[Bukov V. N. Nesting Systems. Analytical Approach to the Analysis and Synthesis of Matrix Systems. Kaluga: Publishing house of scientific literature N. F. Bochkareva, 2006. (In Russian).]]
8. Ким Д. П. Теория автоматического управления. М.: Физматлит, 2007. Т. 2: Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 440 с. EDN: QMROVT. [[Kim D. P. Theory of Automatic Control. Moscow: Fizmatlit, 2007. Vol. 2: Multidimensional, Nonlinear, Optimal and Adaptive Systems. (In Russian).]]
9. Поляк Б. Т., Хлебников М. В., Рапопорт Л. Б. Математическая теория автоматического управления. М.: Ленанд, 2019. 504 с. [[Polyak B. T., Khlebnikov M. V., Rapoport L. B. Mathematical Theory of Automatic Control. Moscow: Lenand, 2019. (In Russian).]]
10. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с. [[Handbook on the Theory of Automatic Control / Ed. A. A. Krasovskiy. Moscow: Nauka, 1987. (In Russian).]]

11. Мееров М. В. Системы многосвязного регулирования. М.: Наука, 1965. 384 с. [[Meerov M. V. Multiply Connected Control Systems. Moscow: Nauka, 1965. (In Russian).]]
12. Морозовский В. Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970. 288 с. [[Morozovsky V. T. Multiconnected Automatic Control Systems. Moscow: Energy, 1970. (In Russian).]]
13. Соболев О. С. Методы исследования линейных многосвязных систем. М.: Энергоиздат, 1985. 120 с. EDN YZHFKN. [[Sobolev O. S. Methods for Studying Linear Multiply Connected Systems. Moscow: Energoizdat, 1985. (In Russian).]]
14. Рей У. Х. Методы управления технологическими процессами М.: Мир, 1983. 368 с. [[Ray W. H. Technological Process Control Methods. Moscow: Mir, 1983. (In Russian).]]
15. Петров Б. Н. О построении и преобразовании структурных схем // Изв. АН СССР. ОТН. 1945. № 12. С. 1146–1162. [[Petrov B. N. // Izv. AN SSSR. OTN. 1945. No. 12, pp. 1146–1162. (In Russian).]]
16. Петров Б. Н., Черкасов Б. А., Ильясов Б. Г., Куликов Г. Г. Частотный метод анализа и синтеза многомерных систем автоматического регулирования // Доклады АН СССР. 1979. Т. 247. № 2. С. 304–307. [[Petrov B. N., Cherkasov B. A., Ilyasov B. G., Kulikov G. G. "Frequency method of analysis and synthesis of multidimensional automatic control systems" // Reports of the USSR Academy of Sciences. 1979. V. 247, No. 2, pp. 304–307. (In Russian).]]
17. Проектирование систем автоматического управления газотурбинных двигателей. Нормальные и нештатные режимы / Под ред. акад. Б. П. Петрова. М.: Машиностроение, 1981. 400 с. [[Design of Automatic Control Systems for Gas Turbine Engines. Normal and Abnormal Regimes / Ed. B. P. Petrov. Moscow: Mechanical Engineering, 1981. (In Russian).]]
18. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А. А. Шевяков, Т. С. Мартыанова, В. Ю. Рутковский, Б. Г. Ильясов и др.; под общ. ред. А. А. Шевякова и Т. С. Мартыановой. М.: Машиностроение, 1989. 256 с. [[Optimization of Multidimensional Control Systems for Gas Turbine Engines of Aircraft / A. A. Shevyakov, T. S. Martyanova, V. Yu. Rutkovsky, B. G. Ilyasov et al. Moscow: Machine Building, 1989. (In Russian).]]
19. Основы теории многосвязных систем автоматического управления летательными аппаратами. Уч. пос. / С. Ф. Бабак, В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов и др. Под ред. М. Н. Красильщикова. М. Изд-во МАИ, 1995. 288 с. [[Fundamentals of the Theory of Multi-Connected Automatic Control Systems for Aircraft. Textbook allowance / S. F. Babak, V. I. Vasiliev, B. G. Ilyasov, et al. Moscow: MAI Publishing House, 1995. (In Russian).]]
20. Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С. Исследование устойчивости одноптипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами // Автоматика и телемеханика. 1995. № 8. С. 82–90. [[Ilyasov B. G., Kabal'nov Yu. S. "The stability study of multi-connected automatic control systems with holonomic connections between sub-systems" // Automation and Remote Control. 1995. No. 8, pp. 82–90. (In Russian).]]
21. Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А. Анализ устойчивости динамических систем, представленных в полиномиальной векторно-матричной форме // Известия РАН. Теория и системы управления. 2018. № 2. С. 3–10. DOI 10.7868/S0002338818020014. EDN YWSLXE. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A. "Stability analysis of dynamic systems in the polynomial vector-matrix representation" // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2018. Vol. 57, No. 2, pp. 171-178. EDN XXPYEX. DOI 10.1134/S1064230718020090. (In Russian).]]
22. Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А. Системный подход к исследованию многосвязных систем автоматического управления на основе частотных методов // Автоматика и телемеханика. 2013. № 3. С. 173–191. EDN OMDPZO. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A. "A systems approach to studying multiconnected automated control systems based on frequency methods" // Automation and Remote Control. 2013. Vol. 74, No. 3, pp. 456-470. DOI 10.1134/S0005117913030107. EDN RFCMOJ. (In Russian).]]
23. Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А., Халикова Е. А. Анализ запасов устойчивости гомогенных многосвязных систем управления // Изв. РАН. ТиСУ. 2009. № 4. С. 4–12. EDN: KPTIWF. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A., Khalikova E. A. "Analyzing stability margins of homogeneous MIMO control systems" // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2009. Vol. 48, No. 4, pp. 502-510. DOI 10.1134/S1064230709040029. EDN MWYUGF. (In Russian).]]
24. Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А., Елизарова А. В. Исследование многосвязной системы управления с запаздыванием методом декомпозиции // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3–2. С. 177–181. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A., Elizarova A. V. // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2019. No. 3-2, pp. 177–181. (In Russian).]]
25. Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А., Елизарова А. В. Исследование устойчивости цифровой многосвязной системы автоматического управления // Математическая теория управления и ее приложения (МТУиП-2020): Мат-лы конференции, Санкт-Петербург, 7–8 октября 2020 года. СПб.: Электроприбор, 2020. С. 80–82. EDN BITVQR. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A., Elizarova A. V. "Study of the stability of a digital multi-connected automatic control system" // Mathematical control theory and its applications : conference materials. St. Petersburg: "Electropribor", 2020, pp. 80-82. (In Russian).]]
26. Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А. Анализ устойчивости многосвязной системы управления при структурных изменениях // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. В 2-х т. Самара, 03–06 сентября 2019 года. Т. 1. Самара: Офорт, 2019. С. 300–303. EDN KJVVDF. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A. "Analysis of the stability of a multi-connected control system during structural changes" // Problems of Control and Modeling in Complex Systems: Proceedings of the XXI International Conference. Volume 1. Samara: "Ofort", 2019, pp. 300-303. (In Russian).]]
27. Ильясов Б. Г., Сайтова Г. А. Исследование периодических движений в одноптипных нелинейных многосвязных системах, представленных в полиномиальной векторно-матричной форме // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. № 2. С. 11–12. EDN UWFGQK. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A. "A study of periodic motions in homogeneous nonlinear multivariable systems written in the polynomial vector-matrix representation" // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2020. Vol. 59, No. 1. DOI 10.1134/S1064230719060078. EDN NTIDIW (In Russian).]]

28. Саитова Г. А. Построение областей устойчивого положения равновесия и устойчивых периодических движений нелинейной многосвязной системы // Естественные и технические науки. 2014. № 2(70). С. 211–214. EDN SBHZPX. [[Saitova G. A. "Construction of regions of stable equilibrium position and stable periodic motions of a nonlinear multiply connected system" // Natural and Technical Sciences. 2014. No. 2(70), pp. 211-214. (In Russian).]]
29. Ильясов Б. Г., Сабитов И. И. Применение логико-динамических регуляторов для управления многосвязными техническими объектами (на примере газотурбинного двигателя) // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 4. С. 121–132. DOI 10.7868/S0002338817040102. EDN ZBPXND. [[Ilyasov B. G., Sabitov I. I. // Izvestiya RAN. Theory and Control Systems. 2017. No. 4, pp. 121-132. (In Russian).]]
30. Ильясов Б. Г., Саитова Г. А., Халикова Е. А. Достаточное условие абсолютной устойчивости однотипных нелинейных многосвязных систем // Управление в технических системах (УТС-2010): Мат-лы конференции, Санкт-Петербург, 12–14 октября 2010 года. СПб.: Электроприбор, 2010. С. 235–238. EDN SXNFKZ. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A., Khalikova E. A. "Sufficient condition for absolute stability of the same type of nonlinear multiply connected systems" // Proc. of the Conf. "Control in Technical Systems", St. Petersburg: "Electropribor", 2010, pp. 235-238. EDN SXNFKZ. (In Russian).]]
31. Ильясов Б. Г., Мунасыпов Р. А., Саитова Г. А. и др. Анализ периодических движений в многосвязных системах с нечеткими регуляторами в сепаратных подсистемах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 8. С. 24–29. [[Ilyasov B. G., Munasyrov R. A., Saitova G. A. "Analysis of periodic movements in multiply connected means with fuzzy controllers in individual subsystems" // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2004. No. 8, pp. 24–29. (In Russian).]]
32. Ильясов Б. Г., Саитова Г. А., Назаров А. Ш. Об одном подходе к построению адаптивных многосвязных систем автоматического управления сложным динамическим объектом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 8. С. 13–20. EDN MTHIVV. [[Ilyasov B. G., Saitova G. A., Nazarov A. Sh. "About one approach to design of adaptive multivariable automatic control systems of composite dynamic object" // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2010. No. 8, pp. 13–20. (In Russian).]]

Поступила в редакцию 17 сентября 2024 г.

МЕТАДАННЫЕ / METADATA

Title: Physical and mathematical approach to the theory of multi-connected control systems.

Abstract: The article considers various scientific approaches to the study of properties (in particular, stability) of multivariate control systems (MCS), based on various models of their description. The necessity and efficiency of combining mathematical models of MCS with their physical content are shown, which opens new prospects in the study of real complex systems. A method for describing MCS through individual characteristics of ACS and elements of multidimensional connections between them is proposed, stability criteria for linear MCS with identical ACS, a stability criterion for the equilibrium state of the system, as well as a technology for finding parameters of periodic movements and assessing their stability for nonlinear MCS.

Key words: multivariate system, decomposition, frequency methods, linear system, nonlinear system.

Язык статьи / Language: Русский / Russian.

Об авторах / About the authors:

ИЛЬЯСОВ Барый Галеевич

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

Проф. каф. технической кибернетики. Дипл. инженер-электромеханик (Московский авиационный институт, 1962). Д-р техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (1983). Иссл. в обл. многосвязных систем управления сложн. объектами различной физической природы.

E-mail: ilyasov.bg@ugatu.su

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5642-0723>

URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=77495

IL'YASOV Baryy Galeevich

Ufa University of Science and Technology, Russia.

Prof., Department of Technical Cybernetics. Diploma in Electrical Engineering (Moscow Aviation Institute, 1962). Doctor of Technical Sciences in Systems Analysis, Management and Information Processing (1983). Research in the field of multi-connected control systems for complex objects of various physical natures.

E-mail: ilyasov.bg@ugatu.su

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5642-0723>

URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=77495

САИТОВА Гузель Асхатовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

Доцент каф. технической кибернетики. Дипл. инж.-системотехник (Уфимск. авиац. ин-т, 1986). Канд. техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2003). Иссл. в обл. многосвязных систем управления сложн. техн. объектами.

E-mail: saitova@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0550-4676>

URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=116963

SAITOVA Guzel Askhatovna

Ufa University of Science and Technology, Russia.

Assoc. Prof. of the Technical Cybernetics Dept. Dipl. Systems Engineer (Ufa Aviation Institute, 1986). Cand. Tech. Sciences in system analysis, management, and information processing. (Ufa State Aviation Technical University, 2003). Research in the field of multi-connected control systems for complex technical objects.

E-mail: saitova@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0550-4676>

URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=116963