

М 383321

НА ДОГ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ОМОРОВ ТУРАТБЕК ТУРСУНБЕКОВИЧ

МЕТОД СИНТЕЗА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ
ПРЯМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И ПРИНЦИПА
МИНИМАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ

Специальность 05.13.02 - Теория систем,
теория автоматического регулирования и
управления и системный анализ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре "Системы автоматического управления"
МВТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор БИРЮКОВ В.Ф.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ПОПОВ В.И.
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
КОЗЛОВ В.С.

Ведущая организация - Центральный научно-исследовательский
институт комплексной автоматизации

Защита диссертации состоится " 28 " декабря 1981 г.
на заседании Специализированного Совета К 053.15.12 по
технической кибернетике и аут
МВТУ им. Н.Э.Баумана по аут
Бауманская ул., д. 5.

Справки по телефону 267

Отзывы в 2-х экз. с подп
высылать по указанному а

С диссертацией можно озн

Автореферат разослан 5

Ученый секретарь Специал
Совета

К.Т.Н., доцент

Подписано к печати 27.1
Объем 1 п.л. Тираж 100
Бесплатно

Ротапринт типографии МВТ

М 383 321

Актуальность работы. В решениях XXVI съезда КПСС намечена широкая программа повышения эффективности общественного производства на основе достижений научно-технического прогресса. В успешном её осуществлении важная роль принадлежит системам автоматического управления (САУ) техническими объектами и технологическими процессами, разработка которых связана с решением ряда важных научных проблем.

Актуальность диссертационной работы вызвана следующими причинами.

Многие линейные объекты управления представляют собой многоконтурные системы, имеющие сложные структурные схемы. Они могут обладать такими особенностями, как неустойчивость и неминимальнофазовость. Некоторые функционально необходимые элементы таких систем часто могут выбираться из заданного семейства. Желательно, чтобы их выбор осуществлялся совместно с корректирующим устройством (регулятором) с целью достижения наилучшего качества функционирования системы в целом. Такая ситуация часто возникает при проектировании САУ летательными аппаратами, электроприводами металлорежущих станков, бумагоделательных машин, прокатных станов, агрегатов и машин многих технологических процессов.

При синтезе корректирующих устройств для указанных объектов, называемых в дальнейшем обобщенными объектами управления, необходимо учитывать кроме качества управляемого динамического процесса целый комплекс требований и ограничений. Например, простота технической реализации синтезируемого регулятора, ограничения на параметры и переменные (координаты) системы. В рассматриваемых условиях синтез корректирующего устройства для обобщенного объекта управления с помощью известных методов бывает затруднителен либо неэффективен.

Целью работы является обоснование и разработка единого метода синтеза корректирующих устройств для широкого класса линейных стационарных обобщенных объектов управления, позволяющего обеспечить требуемые прямые показатели качества динамического процесса по управляемой координате с учетом простоты технической реализации искомого решения, ограничений на параметры и переменные системы.



Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использованы методы математического программирования, интегральных преобразований и математический аппарат общей теории систем.

Научная новизна. В работе предложен новый метод синтеза корректирующих устройств для широкого класса минимальнофазовых, неустойчивых и неминимальнофазовых обобщенных объектов управления, имеющих сколь угодно сложные структурные схемы. Предложен способ сведения векторного критерия качества системы к скалярному путем введения и аналитического описания семейства желаемых динамических процессов. Исследованы и установлены важнейшие свойства критерия и на их основе предложена методика его минимизации. Разработаны алгоритм параметрического синтеза асимптотически устойчивой линейной стационарной системы и процедура построения переходного процесса, которые необходимы для реализации алгоритма синтеза САУ по предлагаемому методу.

Практическая ценность. Разработанный в работе метод синтеза используется при проектировании систем управления промышленных электроприводов. На его основе можно синтезировать высокоточные САУ различными техническими объектами и технологическими процессами, обладающие заданными первичными показателями качества переходного процесса.

Реализация результатов работы. Материалы диссертационной работы были использованы при выполнении кафедрой "Системы автоматического управления" МВТУ им. Н.Э.Баумана научно-исследовательских работ по госбюджетной теме.

Результаты диссертации внедрены в Центральном научно-исследовательском институте систем управления, а также используются в ВНИИ "Электропривод" при расчете систем автоматического управления промышленными электроприводами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

-II Всесоюзном симпозиуме "Теория нестационарных систем управления" (г.Севастополь, сентябрь, 1979 г.);

-II Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение АСУ ТП" (г.Ташкент, сентябрь, 1980 г.);

-Республиканской научно-технической конференции "Состояние

и перспективы развития технических наук в Киргизии" (г.Фрунзе, январь, 1980 г.);

-IV научно-технической конференции "Приборостроение" (МВТУ, январь, 1980 г.);

-Московской школе-семинаре молодых ученых "Алгоритмизация и программирование задач управления" (МВТУ, июнь, 1981 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, перечень 4-х из которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы в 126 наименований и трех приложений. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста и содержит 12 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматриваются следующие вопросы: выбор критерия качества САУ, постановка задачи синтеза корректирующего устройства минимальной сложности для обобщенного объекта управления, обзор методов синтеза с точки зрения их использования для решения поставленной задачи. Обсуждаются также вопросы, связанные с заданием желаемых динамических (переходных) процессов.

Для оценки работоспособности синтезируемой системы используется векторный критерий качества, предложенный профессором В.В.Солодовниковым в 1939-41 годах. Согласно этому критерию система обладает требуемым качеством, если переходный процесс $h(t)$ по управляемому выходу, вызванный единичным ступенчатым входным воздействием, принадлежит области допустимых значений. Границы допустимой области определяются максимально возможными значениями времени регулирования T , перерегулирования δ и статической ошибки δ .

В работе вместо переходного процесса рассматривается ошибка регулирования

$$\varepsilon(t) = g(t) - x(t), \quad t \geq 0,$$

где $g(t)$ - входное задающее (управляющее) воздействие, $x(t)$ - фактический закон изменения управляемой координаты. В качестве входного управляющего воздействия $g(t)$ используется полиномиальное воздействие с заданными коэффициентами и порядком

$$g(t) = \sum_{z=0}^n g_z t^z, \quad t \geq 0. \quad (I)$$

Геометрическая интерпретация выбранного критерия качества системы показана на рис. I.

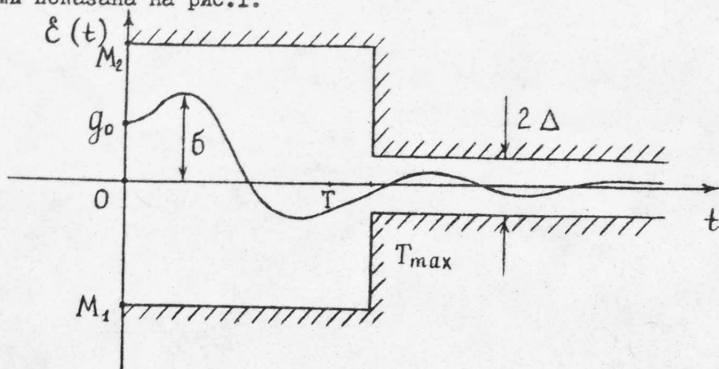


Рис. I.

Границы допустимой области для ошибки регулирования задаются числами M_1 , M_2 и Δ , определяемыми техническими требованиями на проектируемую САУ.

Выборанный критерий качества системы, основанный на допустимости динамического процесса $\xi(t)$, допускает неоднозначное решение задачи синтеза, т.е. заданные условия качества могут быть достигнуты множеством корректирующих устройств, имеющих различные степени сложности. В работе для обеспечения компромисса между сложностью системы и её качеством используется принцип минимальной сложности, предложенный и разработанный В.В.Солодовниковым и развитый В.Ф.Бирюковым. В качестве меры сложности корректирующего устройства выбраны порядки полиномов знаменателя n_z и числителя m_z его передаточной функции $W_k(s)$. Согласно этому принципу задача синтеза решается на основе шкалы сложности первого или второго типа, которая строится по выбранному признаку сложности: порядки n_k и m_k . Шкала $N = \{V_k\}$, $k = 1, 2, \dots, \mu$, образуется из подклассов передаточных функций $W_k(r^k, s) \in V_k$, $k = 1, 2, \dots, \mu$, корректирующих устройств, заданных с точностью до варьируемых коэффициентов их полиномов знаменателей

и числителей $\gamma_1^K, \gamma_2^K, \dots, \gamma_{\nu_K}^K$, которые и являются компонентами вектор-параметра γ^K . Подмножества V_K формируются по правилу: малым значениям K соответствуют более простые корректирующие устройства (меньшие значения порядков n_K и m_K), и при увеличении K возрастает сложность составляющих его элементов. Подклассы $W_K(\gamma^K, s) \in V_K$ задаются так, чтобы обеспечить статизм или необходимый астатизм замкнутой системы, желаемую разность порядков n_K и m_K . Определяются ограничения на компоненты каждого вектор-параметра γ^K , гарантирующие техническую реализуемость соответствующих передаточных функций корректирующих устройств. При этом допустимая область задается в виде параллелепипеда

$$\Gamma_K = \left\{ \gamma^K \in R^{\nu_K} : \gamma_{\min}^K \leq \gamma^K \leq \gamma_{\max}^K \right\}, \quad (2)$$

где векторы $\gamma_{\min}^K$ и $\gamma_{\max}^K$ составлены соответственно из нижних и верхних границ интервалов варьирования компонентов γ^K .

Обобщенный объект управления рассматривается как система произвольной структуры, состоящая из неизменяемой и изменяемой частей. Изменяемую часть составляют динамические элементы (звенья), некоторые или все параметры передаточных функций которых подлежат определению совместно с корректирующим устройством. Они образуют вектор-параметр λ обобщенного объекта и для них задано, как и для γ^K , допустимое подмножество

$$L = \left\{ \lambda \in R^u : \lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max} \right\}. \quad (3)$$

Задача синтеза ставится следующим образом. Заданы

- обобщенный объект управления, имеющий, быть может, особенности типа неустойчивость и неминимальнофазовость, а также подмножество L , определяемое выражением (3);
- входное задающее воздействие $g(t)$ в виде полинома (I);
- место включения корректирующего устройства, которое является произвольным в структуре замкнутой системы регулирования.

Далее предполагается, что построена некоторая шкала сложности $N = \{V_K\}$, $K = 1, 2, \dots, \mu$, состоящая из подклассов передаточных функций $W_K(\gamma^K, s) \in V_K$, $K = 1, 2, \dots, \mu$, корректирующих устройств.

Требуется определить передаточную функцию $W_k(\gamma^k, s)$ корректирующего устройства минимальной сложности и вектор-параметр Λ обобщенного объекта так, чтобы ошибка регулирования $\varepsilon(t)$ удовлетворяла векторному критерию качества, а именно, обладала требуемыми прямыми показателями качества: временем регулирования T , перерегулированием β и статической ошибкой δ .

В случае, когда входное воздействие представляет ступенчатый сигнал ($g(t) = 1(t)$) можно дополнительно потребовать, чтобы некоторые переменные (физические или обобщенные координаты) системы удовлетворяли ограничению вида

$$|x_i(t)| \leq X_{i\max}, \quad i = 1, 2, \dots, \ell, \quad (4)$$

где $X_{i\max}$ — максимально допустимое значение переменной $x_i(t)$.

В соответствии с постановкой задачи в обзоре литературы проводится анализ существующих методов синтеза корректирующего устройства линейной стационарной системы, таких, как: частотные методы, метод стандартных коэффициентов, методы корневых годографов, метод неравенств, а также методы приближения на основе степенных рядов изображений и характеристик мнимых частот. Результаты анализа показывают, что области их применимости ограничены, а единого метода, эффективно решающего наиболее широкий класс задач, к которой относится поставленная выше задача, в настоящее время не существует. Действительно, частотные методы, в том числе находящий широкое применение в инженерной практике метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик В.В.Солодовникова, разработаны для минимальнофазовых объектов управления. Методы стандартных коэффициентов, нормированных передаточных функций, а также методы приближения, предложенные в работах В.С.Кулебакина, В.А.Боднера, Н.И.Соколова, И.А.Огурка, Л.П.Смольникова и др., требуют для синтеза достаточное число варьируемых параметров, что может привести к усложнению искомого корректирующего устройства. В них ограничения на параметры и переменные системы не учитываются. Метод неравенств, предложенный В.Закианом, в принципе позволяет учесть указанные ограничения, однако он является недостаточно разработанным.

Из изложенного вытекает необходимость в разработке нового метода, решающего поставленную задачу синтеза.

В связи с тем, что используемый подход основан на концепции допустимости ошибки регулирования или переходного процесса, обсуждаются способы формирования желаемых динамических процессов. С целью обеспечения наилучших показателей функционирования системы в целом и эффективного ограничения сложности синтезируемого корректирующего устройства предлагается задавать не один желаемый (допустимый) динамический процесс, а некоторое их семейство E . Множество E состоит из всех динамических процессов $\xi(t)$, графические изображения которых не выходят из области допустимых значений, показанной на рис.1. Его элементы зададим в виде линейной комбинации экспоненциальных функций

$$\xi(\beta, t) = \sum_{z=0}^{\tilde{N}} \beta_z e^{-z\alpha t}, \quad t \geq 0,$$

где вектор $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{\tilde{N}})$, а β_0 задается априори: $\beta_0 = 0$, если система астатическая и $\beta_0 = \delta$, если она имеет статическую ошибку, равную δ .

Подмножество E_1 в E определяется выражением

$$E_1 = \left\{ \xi(\beta, t) : \xi(\beta, t) = \sum_{z=0}^{\tilde{N}} \beta_z e^{-z\alpha t}, \quad \beta \in B \right\},$$

где подмножество $B \subset R^{\tilde{N}}$ определяет некоторые ограничения на компоненты вектора β , обеспечивающие допустимость процесса $\xi(\beta, t)$, т.е. принадлежность его E . Описание B дается в следующей главе.

Глава 2 посвящена решению задачи синтеза корректирующего устройства, сформулированной в предыдущей главе.

Рассматривается система, состоящая из обобщенного объекта и корректирующего устройства с передаточной функцией

$W_K(\chi^K, S) \in V_K \quad (1 \leq K \leq \mu)$. Вводится разность

$$\theta_K(q^K, \beta, t) = \xi_K(q^K, t) - \xi(\beta, t),$$

где $\xi_K(q^K, t)$ — фактическая ошибка регулирования, вызванная входным воздействием $g(t)$, $\xi(\beta, t)$ — допустимая ошибка регулирования ($\beta \in B$), а вектор q^K состоит из варьируемых параметров системы, т.е. $q^K = [\chi^K]$. Функция

$\theta_K(q^K, \beta, t)$ обладает тем свойством, что начальное ($t = 0$) и конечное ($t = \infty$) её значения тождественно равны нулю,

что достигается выбором вектор-параметра q^k из области асимптотической устойчивости Q_k и соответствующим построением допустимого динамического процесса $\xi(\beta, t)$. Вводится норма

$$I_k(q^k, \beta) = \sup_{t > 0} |\theta_k(q^k, \beta, t)|. \quad (5)$$

Верхняя оценка $I_k(q^k, \beta)$ определяется на основе следующего утверждения.

Утверждение I. Для функционала $I_k(q^k, \beta)$, $q^k \in Q_k$, $\beta \in B$, имеет место оценка

$$I_k(q^k, \beta) \leq J_k(q^k, \beta) = [4 F_0(q^k, \beta) \cdot F_1(q^k, \beta)]^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

где

$$F_0(q^k, \beta) = \int_0^{\infty} \theta_k^2(q^k, \beta, t) dt, \quad (7)$$

$$F_1(q^k, \beta) = \int_0^{\infty} \left[\frac{d \theta_k(q^k, \beta, t)}{dt} \right]^2 dt. \quad (8)$$

На основе функции $J_k(q^k, \beta)$ можно решать задачу синтеза системы регулирования, обладающей требуемыми первичными показателями качества ошибки регулирования. Действительно, если при $q^k \in Q_k$ и $\beta \in B$ выполняется неравенство

$$J_k(q^k, \beta) \leq \varepsilon, \quad (9)$$

где ε — малое положительное число, то корректирующее устройство с передаточной функцией $W_k(\gamma^k, s)$ и вектор-параметр λ обобщенного объекта обеспечивают заданное качество системы, т.к. при этом фактическая ошибка регулирования $\xi_k(q^k, t)$ и желаемый динамический процесс $\xi(\beta, t)$ совпадают с точностью ε . Следовательно скалярную функцию $J_k(q^k, \beta)$ можно использовать в качестве критерия качества системы регулирования. Она отражает и динамические свойства системы, включающей в свой состав объект управления и корректирующее устройство, и её желаемое поведение в переходном процессе.

В общем случае для произвольных $q^k \in Q_k$ и $\beta \in B$ соотношение (9) может и не выполняться. Поэтому синтез осуществляется путем решения задачи глобальной минимизации

$$\inf_{\substack{q^k \in \tilde{Q}_k \\ \beta \in B}} J_k(q^k, \beta) = J_k(\tilde{q}^k, \tilde{\beta}), \quad (10)$$

где подмножество $\tilde{Q}_k = Q_k \cap \bar{Q}_k$ q^k , а $\bar{Q}_k$ определяет ограничения на компоненты вектора q^k :

$$\bar{Q}_k = \left\{ q^k \in R^{C_k} : q_{\min}^k \leq q^k \leq q_{\max}^k \right\}. \quad (11)$$

Таким образом, процедура синтеза корректирующего устройства минимальной сложности состоит из следующих этапов:

1. Построение шкалы сложности $N = \{V_k\}$, $k = 1, 2, \dots, \mu$, с учетом требуемого астатизма замкнутой системы.

2. Задание семейства желаемых динамических процессов $\xi(\beta, t)$, т.е. подмножества B .

3. Формирование критерия качества $J_k(q^k, \beta)$ соответствующего выбранному подклассу передаточных функций $W_k(q^k, s) \in V_k$.

4. Решение экстремальной задачи (10), по результатам которого делается вывод относительно разрешимости задачи синтеза путем проверки условия требуемого качества (9) аналогично тому, как это было сделано выше. В случае, если передаточная функция $W_k(\tilde{q}^k, s)$ и вектор $\tilde{\lambda} \in L$ не обеспечивают нужного качества системы (неравенство (9) не выполняется) необходимо усложнение первоначально выбранного типа корректирующего устройства и решение новой задачи минимизации (10), теперь уже с использованием целевой функции $J_{k+1}(q^{k+1}, \beta)$, и т.д. При этом либо для некоторого $k = \mu_0 \leq \mu$ будет найдено решение задачи синтеза, либо его не существует. Во втором случае необходимо ослаблять требования на качество замкнутой системы (расширять первоначальное множество допустимых динамических процессов

$\xi(\beta, t)$), чтобы существовало решение относительно рассматриваемой шкалы сложности, либо переходить к продолжению шкалы (дальнейшему усложнению передаточных функций корректиру-

ших устройств) и последующему решению новых задач минимизации. Описание подмножества B осуществляется на основе следующего утверждения.

Утверждение 2. Для того, чтобы динамический процесс $\xi(\beta, t) \in E$, достаточно выполнения линейных неравенств:

$$\begin{aligned} \sum_{z=1}^{\tilde{N}} C_{\tilde{N}-z}^{i-z} e^{-\alpha T_{\max}} \beta_z &\leq C_{\tilde{N}}^i \Delta, \\ -\sum_{z=0}^i C_{\tilde{N}-z}^{i-z} \beta_z &\leq C_{\tilde{N}}^i M_1, \\ \sum_{z=0}^i C_{\tilde{N}-z}^{i-z} \beta_z &\leq C_{\tilde{N}}^i M_2, \end{aligned} \quad (I2)$$

где

$$C_{\tilde{N}}^i = \frac{\tilde{N}!}{i! (\tilde{N}-i)!}, \quad i = 1, 2, \dots, \tilde{N}.$$

Таким образом, подмножество B является выпуклым.

Рассматривается вычислительный аспект функции $J_K(q^K, \beta)$. Получены явные формулы в зависимости от компонентов векторов q^K и β .

С целью эффективного решения задачи минимизации (10) исследуются и устанавливаются важнейшие свойства критерия качества $J_K(q^K, \beta)$. В частности справедливы следующие свойства.

1. При фиксированном $\beta \in B$ стационарные точки функции по вектору q^K достигаются строго внутри области устойчивости Q_K и всякое приближение изображающей точки к границе устойчивости штрафует её чрезмерно большими значениями.

2. Функции $F_0(q^K, \beta)$ и $F_1(q^K, \beta)$, определяемые выражениями (7) и (8), при фиксированном векторе $q^K \in Q_K$ представляют собой квадратические формы с положительно определенными матрицами, т.е. они являются выпуклыми функциями.

3. При фиксированном $q^K \in Q_K$ и выполнении условия

$$\sum_{z=1}^{\tilde{N}} \beta_z = q_0 \quad (I3)$$

минимизация функции $F_0(q^K, \beta)$ эквивалентна минимизации

$F_1(q^K, \beta)$, что соответствует минимизации целевой функции $J_K(q^K, \beta)$.

Рассмотренные свойства критерия качества $J_K(q^K, \beta)$ позволяют строить эффективный способ его минимизации, при кото-

ром сначала фиксируется вектор $q^k \in Q_k$ и решается задача квадратического программирования

$$\inf_{\beta \in B} F_0(q^k, \beta) = \inf_{\beta \in B} (c_0 - b^T \beta + \beta^T A_0 \beta) \quad (14)$$

с положительно определенной матрицей A_0 , где вектор b и число c_0 определяются заданным вектором q^k , T - обозначает операцию транспонирования. Далее фиксируется вектор $\tilde{\beta} \in B$, являющийся решением задачи (14), и решается задача минимизации по вектору q^k :

$$\inf_{q^k \in \tilde{Q}_k} J_k(q^k, \tilde{\beta}) = J_k(\tilde{q}^k, \tilde{\beta}). \quad (15)$$

Здесь следует отметить, что задача (15) с учетом первого свойства целевой функции $J_k(q^k, \beta)$ и структурных особенностей подмножества $\tilde{Q}_k$ с помощью известных приемов легко сводится к задаче без ограничений. Таким образом, общая задача нелинейного программирования (10) с нелинейными ограничениями, каковыми являются условия асимптотической устойчивости замкнутой системы по вектору q^k , сведена к более простым задачам минимизации (14) и (15). При их решении могут быть применены эффективные алгоритмы глобальной минимизации (модификации метода Ньютона, метод Вольфа, метод сопряженных градиентов, метод массивной точки и др.),

Глава 3 посвящена задаче параметрического синтеза асимптотически устойчивой линейной стационарной системы. Решение указанной задачи необходимо для задания начального допустимого вектора $q^k \in Q_k$ при решении задачи минимизации целевой функции $J_k(q^k, \beta)$. При этом синтез осуществляется на основе формулируемого ниже достаточного критерия устойчивости замкнутой системы. Пусть задано характеристическое уравнение

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0. \quad (16)$$

Путем конформного преобразования

$$S = \frac{Z+1}{Z-1} \quad (17)$$

отобразим левую полуплоскость комплексной переменной S во внутренность единичного круга, расположенного в комплексной плоскости Z . Подставив S из (17) в (16), получим новое алгебраическое уравнение

$$\hat{a}_0 z^n + \hat{a}_1 z^{n-1} + \dots + \hat{a}_{n-1} z + \hat{a}_n = 0 \quad (18)$$

того же порядка, где коэффициенты уравнения (18) определяются через коэффициенты исходного уравнения (16).

Утверждение 3. Для устойчивости замкнутой системы, имеющей характеристическое уравнение (16), достаточно выполнения неравенства

$$\sum_{i=1}^n |\hat{a}_i| \leq |\hat{a}_0|. \quad (19)$$

Нетрудно показать, что при задании передаточной функции $W_K(\gamma, s)$ в классе рациональных дробей для любой схемы включения корректирующего устройства с объектом управления (вектор $\mathcal{A}$ считаем постоянным) компоненты вектора γ^K входят линейно в выражения для коэффициентов $\hat{a}_i = \hat{a}_i(\gamma^K)$,

$i = 1, 2, \dots, n$, уравнения (18). Тогда неравенство (19) эквивалентно системе линейных неравенств, разрешимость которой можно проверить используя методы, развитые в теории линейных неравенств. В случае неразрешимости указанной системы задача определения вектора γ^K , принадлежащего области асимптотической устойчивости замкнутой системы, сводится к задаче линейного программирования, целевая функция и ограничения которой формируются на основе этой же системы. При этом показано, что минимизация целевой функции по вектору γ^K эквивалентна минимизации спектрального радиуса сопровождающей матрицы уравнения (18). Таким образом, в результате решения задачи минимизации получается наименьшее значение спектрального радиуса круга с центром в начале координат, в которой расположены все корни уравнения (18). В силу того, что в качестве оценки указанного радиуса используется его верхняя оценка, в конце процедуры

минимизации целесообразным является анализ устойчивости замкнутой системы в найденной точке, используя необходимые и достаточные условия устойчивости. В случае неустойчивости рассматриваемой системы необходимо усложнение первоначально выбранного корректирующего устройства, например, путем увеличения порядков полиномов числителя и знаменателя и размерности вектора γ^k его передаточной функции $W_k(\gamma^k, s)$.

Кратко рассматривается вопрос о грубости систем. Отмечается, что предлагаемый метод синтеза корректирующего устройства основывается на использовании полной модели системы управления. При этом трудности, связанные с возможными сокращениями множителей передаточных функций (проблема вырожденности) не возникают. Система груба в смысле устойчивости, если синтезированное корректирующее устройство обеспечивает ей достаточную степень устойчивости. Показано, что последняя может быть достигнута простым способом, например, путем выбора параметра α в выражении для желаемого динамического процесса $\xi(\beta, t)$, удовлетворяющего условию $\alpha > \eta$, где η — заданная степень устойчивости замкнутой системы.

В главе 4 рассматриваются некоторые обобщения разработанного метода синтеза, а также практическая часть диссертационной работы.

Рассмотрена процедура синтеза системы стабилизации, находящейся под воздействием ступенчатого возмущения и стационарных случайных процессов, заданных спектральными плотностями. Синтез осуществляется путем обеспечения первичных показателей качества переходного процесса, вызванного ступенчатым возмущением, и ограничения дисперсии случайного процесса, обусловленного воздействием приложенных стационарных помех. При этом вся процедура синтеза сохраняется.

Далее рассматриваются вопросы, связанные с учетом ограничений на переменные системы регулирования. При этом предполагается, что на входе системы действует ступенчатое задающее воздействие или ступенчатое возмущение. Заданные ограничения учитываются при формировании допустимого подмножества

$$\bar{Q}_k = \{q^k \in R^{c_k} : P_i(q^k) \leq X_{i, \max}, i=1, 2, \dots, \ell\}, \quad (20)$$

где оценки $P_i(q^k)$ для максимального отклонения переменных $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, \ell$, определяются на основе утверждения I ($\beta \equiv 0$ - нулевой вектор) или других формул, предложенных в работе. Для проверки того, что пусто или не пусто подмножество $\bar{Q}_k$ целесообразно использовать соответствующую стратегию принципа сложности, реализация которой осуществляется путем последовательной минимизации функций $P_1(q^k)$, $P_2(q^k)$, ..., $P_\ell(q^k)$ на основе методов нелинейного программирования.

При реализации алгоритма синтеза корректирующего устройства в случае не выполнения требуемого условия (9) качества системы для обоснованного перехода от одного (более простого) элемента шкалы сложности к другому (более сложному) может возникнуть необходимость в оценке фактических показателей переходного процесса (ошибки регулирования). В связи с этим разработана процедура его построения, основанная на свойствах критерия качества $J_k(q^k, \beta)$. При этом фактический переходный процесс $h(t)$, вызванный единичным ступенчатым входным воздействием ($g(t) = 1(t)$), аппроксимируется выражением

$$h_N(\beta, t) = \sum_{z=0}^N \beta_z e^{-z\alpha t}, \quad t \geq 0.$$

В случае астатической системы ($\beta_0 = 1$), имеющей передаточную функцию $\Phi(S)$, коэффициенты $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ определяются на основе решения системы линейных уравнений

$$A \bar{\beta} = -\bar{b}, \quad (2I)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & \frac{3}{4} & \dots & \frac{\tilde{N}}{\tilde{N}+1} & \frac{1}{2\alpha} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{4} & \frac{3}{5} & \dots & \frac{\tilde{N}}{\tilde{N}+2} & \frac{1}{4\alpha} \\ \frac{1}{4} & \frac{2}{5} & \frac{3}{6} & \dots & \frac{\tilde{N}}{\tilde{N}+3} & \frac{1}{6\alpha} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\tilde{N}+1} & \frac{2}{\tilde{N}+2} & \frac{3}{\tilde{N}+3} & \dots & \frac{\tilde{N}}{2\tilde{N}} & \frac{1}{2\tilde{N}\alpha} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{b} = (\Phi(\alpha), \Phi(2\alpha), \dots, \Phi(\tilde{N}\alpha), 1)^T,$$

$$\bar{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, \beta_{N+1})^T.$$

Первые $\tilde{N}$ компонентов вектора $\bar{\beta}$ представляют собой искомые коэффициенты. Параметр $\alpha > 0$ целесообразно задавать приближенно равным степени устойчивости замкнутой системы, а $\tilde{N}$ — исходя из заданной точности аппроксимации фактического переходного процесса $h(t)$ функцией $h_{\tilde{N}}(\beta, t)$, определяемой оценкой (6). Для заданных $\tilde{N}$ и α матрица A является постоянной и её обратную матрицу A^{-1} можно вычислить раз и навсегда. Тогда решение системы (2I) можно записать в явной форме:

$$\bar{\beta} = -A^{-1} \bar{b}.$$

На основе разработанного метода синтезированы корректирующие устройства минимальной сложности системы управления промышленного электропривода, обеспечивающие требуемые первичные показатели качества переходного процесса, что подтверждает его эффективность. Полученные при этом практические результаты позволяют значительно улучшить условия функционирования электро-механической системы и повысить качество выпускаемой продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Предложен способ сведения векторного критерия качества САУ к скалярному.
2. Предложено параметрическое описание семейства динамических процессов, удовлетворяющих заданным первичным показателям качества.
3. Исследованы и установлены важные свойства скалярного критерия качества и на их основе построена методика его минимизации на допустимых множествах параметров системы и желаемого динамического процесса.
4. Разработан метод синтеза корректирующего устройства минимальной сложности для обобщенного объекта управления, позволяющий обеспечить требуемые первичные показатели качества системы регулирования с учетом ограничений на параметры и переменные системы.

5. Предложен алгоритм параметрического синтеза асимптотически устойчивой линейной стационарной системы.

6. Разработана процедура построения переходного процесса, основанная на свойствах скалярного критерия качества, которая реализуется путем решения системы линейных алгебраических уравнений.

Результаты по параметрическому синтезу устойчивых систем и построению переходного процесса необходимы для реализации процедуры синтеза предлагаемого метода, но и могут представлять самостоятельный интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков В.Ф., Оморов Т.Т. О синтезе стационарных корректирующих устройств для нестационарных объектов управления. II Всесоюзный симпозиум "Теория нестационарных систем управления". Тезисы докладов, Севастополь, 1979, с.88-89.

2. Бирюков В.Ф., Оморов Т.Т. Об одном подходе к разработке алгоритмического обеспечения системы автоматизированного проектирования. Республиканская научно-техническая конференция "Состояние и перспективы развития технических наук в Киргизии". Тезисы докладов, секция "Техническая кибернетика", Фрунзе, 1980, с.74.

3. Бирюков В.Ф., Оморов Т.Т., Матвеева Л.В. Новый метод синтеза регуляторов нижних уровней иерархии в АСУ ТП. II Всесоюзная межвузовская научно-техническая конференция "Математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение АСУ ТП". Тезисы докладов, секция I, Ташкент, 1980, с.31-32.

4. Бирюков В.Ф., Оморов Т.Т. Синтез корректирующего устройства на основе концепции допустимости и принципа минимальной сложности. Труды Фрунзенского политехнического института, Системы управления движением, Фрунзе, 1981, с.6-17.