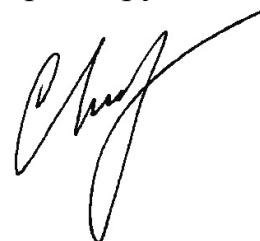


На правах рукописи



Ефимов Семён Викторович

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СТАЦИОНАРНЫХ И ИНТЕРВАЛЬНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИХ
ПОЛЮСОВ И НУЛЕЙ ОТ ПРЯМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(по отраслям: промышленность)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена на кафедре автоматики и компьютерных систем ГОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Гайворонский Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гончаров Валерий Иванович

кандидат технических наук, доцент
Шелестов Александр Андреевич

Ведущая организация: **Институт космических и
информационных технологий
Сибирского федерального
университета,
г. Красноярск**

Защита состоится 03 мая 2011 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при ГОУ ВПО Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, Институт кибернетики ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «01» апреля 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 212.269.06
кандидат технических наук, доцент

 М.А. Сонькин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной теории автоматического управления достаточно большое число публикаций посвящено анализу и синтезу систем управления с параметрами, заданными интервалами. Интерес к таким системам связан с тем, что в процессе эксплуатации любой системы автоматического управления (САУ) её параметры могут изменяться в определенных диапазонах в силу технологических факторов, изменения окружающих условий, износа оборудования, действия возмущений, погрешностей измерений и др. В связи с этим работы отечественных и зарубежных ученых направлены на решение таких задач, как исследование устойчивости систем управления с интервальными параметрами, определение их показателей качества, выбор структуры регулятора и определение его параметров, гарантирующих требуемое качество процессов функционирования. Для решения перечисленных задач используются различные подходы: алгебраические, частотные, корневые и др. Большую роль в решение поставленных задач на основе корневого подхода внесли такие ученые как Харитонов В.Л., Цыпкин Я.З., Неймарк Ю.И., Бесекерский В.А., Римский Г.В., Поляк Б.Т., Ackermann J., Desoer C., Arzelier, D., Barlett A.C., Bhattacharyya S.P. и др. Результаты их работ нашли отражение в различных учебниках, пособиях, монографиях и других публикациях.

Однако, наряду с решенными задачами, остается ряд актуальных проблем, которые требуют дополнительных исследований. Так, например, при анализе и синтезе интервальных САУ на основе корневого подхода не учитывается расположение их нулей на корневой плоскости. В свою очередь, нули системы оказывают существенное влияние на её динамику в процессе эксплуатации. Установлено, что проведение анализа и синтеза систем управления только по расположению их полюсов может привести не только к неточным, но даже к ошибочным результатам. Эта проблема не решена не только для интервальных, но и для стационарных САУ.

Данная диссертационная работа посвящена анализу и синтезу стационарных и интервальных САУ с учетом расположения нулей и полюсов систем на корневой плоскости. Для стационарных САУ решаются следующие задачи:

- идентификация линейных динамических объектов управления, позволяющая получить полюсы и нули их передаточных функций (ПФ);
- определение прямых показателей качества САУ: перерегулирования σ и времени регулирования t_p на основе расположения всех нулей и полюсов;
- синтез параметров регуляторов на основе корневого подхода, гарантирующих заданные прямые показатели качества σ и t_p .

Разработанный подход адаптирован для применения при синтезе регуляторов САУ с интервальными параметрами, обеспечивающих желаемые прямые показатели качества.

Целью работы является разработка подхода к параметрическому синтезу регулятора для интервальной САУ, позволяющего расположением её нулей и полюсов обеспечивать заданные прямые показатели качества при любых вариациях интервальных параметров.

Для достижения указанной цели решены следующие **задачи**:

- разработка подхода к идентификации линейного динамического объекта управления на основе полученных аналитических зависимостей характеристик переходного процесса от расположения нулей и полюсов;
- разработка подхода к анализу стационарной САУ, позволяющего определять прямые показатели качества на основе расположения всех нулей и полюсов системы;
- разработка подхода к параметрическому синтезу регулятора стационарной САУ на основе такого расположения нулей и полюсов, которое обеспечивает требуемые прямые показатели качества – перерегулирование и время регулирования;
- обобщение результатов, полученных на основе расположения нулей и полюсов стационарной системы, с целью их применения к параметрическому синтезу регулятора интервальной САУ, обеспечивающего заданные прямые показатели качества.

Методы исследования. Для достижения сформулированной цели и связанных с нею задач в работе использованы методы операционного исчисления, теории автоматического управления, численного решения систем нелинейных уравнений. Для экспериментальных исследований анализируемых и синтезируемых систем, моделей управления и режимов их работы использовались программные средства Matlab и MathCad.

Научная новизна. Диссертационная работа направлена на исследования в области анализа и синтеза стационарных и интервальных САУ на основе корневого подхода с учетом не только всех полюсов, но и нулей системы. При этом получены следующие новые научные результаты:

- соотношения, связывающие прямые показатели качества переходного процесса: перерегулирование и время регулирования со значениями нулей, полюсов и множителя ПФ системы;
- соотношения, связывающие полюсы и нули САУ со значениями её выходного сигнала в заданные моменты времени при единичном ступенчатом входном воздействии;
- методика идентификации линейных динамических объектов управления на основе зависимости характеристик переходного процесса от расположения нулей и полюсов;
- методика анализа стационарных САУ, позволяющая по расположению их нулей и полюсов определять прямые показатели качества;

– методики параметрического синтеза ПИД-регулятора, позволяющие расположением всех полюсов и нулей системы обеспечивать заданные прямые показатели качества стационарных САУ;

– методика параметрического синтеза ПИД-регулятора для САУ с интервальными параметрами, обеспечивающая заданные прямые показатели качества расположением их нулей и полюсов.

Практическая ценность. Разработанные методики идентификации линейных динамических объектов и анализа стационарных САУ могут применяться для получения ПФ объектов управления и точного определения прямых показателей качества систем управления на основе расположения их нулей и полюсов. Применение разработанных методик параметрического синтеза регуляторов стационарных и интервальных САУ позволяет получать настройки регуляторов, обеспечивающие функционирование систем с заданными прямыми показателями качества (перерегулированием и временем регулирования). Разработанные методики анализа и синтеза стационарных и интервальных САУ программно реализованы в среде Matlab.

Внедрение работы. Разработанные в диссертационной работе методики использованы при решении задач управления синхронным двигателем переменного тока с постоянными магнитами компании ОАО «ТЭМЗ» имени В.В. Вахрушева, г. Томск. Результаты исследований и разработок, описанных в диссертационной работе, использованы в учебном процессе кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики Томского политехнического университета.

Практическое применение результатов диссертационных исследований подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

IV Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», г. Томск, 2006;

XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2006;

V Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», г. Томск, 2007;

IV Всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии», г. Томск, 2009;

X научно-практическая конференция «Средства и системы автоматизации: проблемы и решения», г. Томск, 2009;

Automation, Control, and Information Technology – Control, Diagnostics, and Automation (ACIT-CDA 2010) г. Новосибирск, 2010;

XVII международная конференция по автоматическому управлению. «Автоматика», г. Харьков, 2010;

IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», г. Томск, 2011;

XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2011.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа содержит 157 страниц машинописного текста, 50 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 132 наименований.

Личный вклад автора. Автором поставлена задача идентификации линейного динамического объекта, получены соотношения, связывающие прямые показатели качества переходного процесса при ступенчатом воздействии на объект с его нулями и полюсами. На основе полученных соотношений, разработан подход и методика идентификации линейного динамического объекта на основе характеристик переходного процесса.

Разработан подход и методика анализа стационарной системы САУ, заключающаяся в определении прямых показателей качества по расположению её нулей и полюсов.

Поставлена задача параметрического синтеза ПИД-регулятора для стационарной и интервальной САУ. На основе поставленных задач разработаны подходы и методики, позволяющие определять настроечные коэффициенты ПИД-регулятора, путем расположения их нулей и полюсов.

На защиту выносятся следующие положения:

- методика расчета ПФ линейных динамических объектов управления на основе зависимости характеристик переходного процесса от расположения нулей и полюсов;

- методика определения прямых показателей качества стационарных САУ на основе расположения их нулей и полюсов;

- методики вычисления настроечных коэффициентов ПИД-регулятора, основанные на расположении всех полюсов и нулей ПФ системы и позволяющие обеспечивать заданные прямые показатели качества стационарных САУ;

- методика расчета настроечных коэффициентов ПИД-регулятора для САУ с интервальными параметрами, гарантирующая заданные прямые показатели качества расположением нулей и полюсов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность решаемых задач диссертационного исследования, дана общая характеристика работы, сформулированы основные положения.

В первой главе рассмотрены распространенные методы идентификации линейных объектов управления. Произведен сравнительный анализ существующих методов идентификации, выявлены их основные достоинства и недостатки. Разработан подход и методика идентификации линейного динамического объекта управления на основе зависимости характеристик переходного процесса от расположения его нулей и полюсов при ступенчатом воздействии на вход объекта. Рассмотрены числовые примеры.

Идея разработанного подхода к идентификации линейного динамического объекта заключается в получении набора соотношений, связывающих прямые показатели качества, определенные по кривой переходного процесса, с предполагаемыми нулями, полюсами и множителем ПФ идентифицируемого объекта. Полученный набор соотношений объединяется в систему уравнений, решением которой определяются искомые нули, полюсы и множитель ПФ объекта. Особенность такого подхода состоит в том, что в основе полученных соотношений лежат зависимости, связывающие прямые показатели качества со всеми нулями и полюсами идентифицируемого объекта.

Согласно реакции объекта управления на единичное ступенчатое воздействие выделяются ключевые точки переходного процесса, определяющие прямые показатели качества (рис. 1).

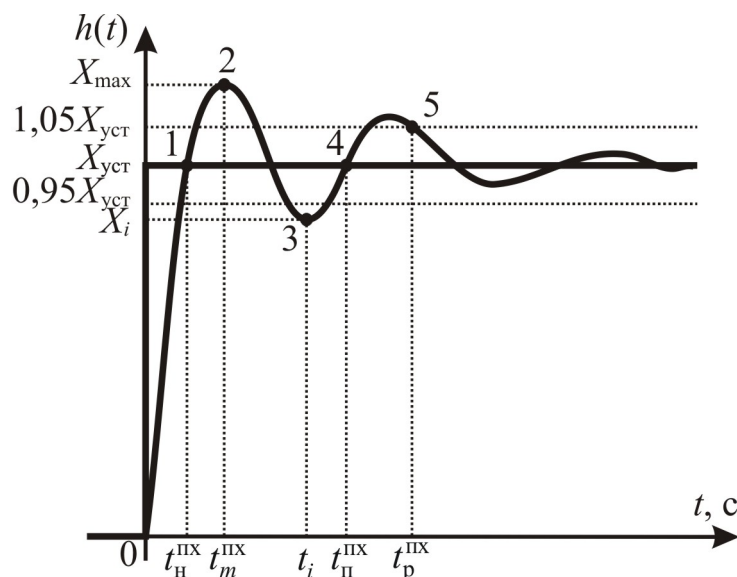


Рис. 1 – Реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие

Значения ключевых точек рис. 1 связываются с нулями, полюсами и множителем ПФ идентифицируемого объекта.

Получена зависимость для определения значения перерегулирования (точка 2, рис. 1):

$$\sigma^{\text{пх}} = \frac{2A_1 \frac{\omega_1}{\omega_0} \exp \left[\frac{\delta_1}{\omega_1} \left(\pi + \sum_3^n \varphi_k - \sum_1^m \Phi_j \right) \right] + \sum_3^m B_k e^{s_k t_m}}{X_{\text{уст}}}, \quad (1)$$

где $W(s) = \frac{G(s)}{H(s)} = \frac{k \prod_{j=1}^m (s - N_j)}{\prod_{i=1}^n (s - s_i)}$ – ПФ объекта; k – множитель ПФ объекта;

$s_{1,2} = \delta_1 \pm \omega_1 j$ – доминирующие полюсы; φ_k и $\Phi_j \in [-\pi; \pi]$ – углы, образованные доминирующим полюсом s_1 , другим полюсом или соответственно нулем системы и положительным направлением оси абсцисс корневой плоскости;

$\omega_0 = \sqrt{\delta_1^2 + \omega_1^2}$; $A_1 = \left| \frac{G(s_1)}{s_1 H'(s_1)} \right|$; $B_k = \left| \frac{G(s_k)}{s_k H'(s_k)} \right|$; $t_m = \frac{1}{\omega_1} \left(\pi + \sum_3^n \varphi_k - \sum_1^m \Phi_j \right)$ – время

достижения максимума; $X_{\text{уст}}$ – установившееся значение. Все компоненты зависимости (1) выражаются через нули, полюсы и множитель ПФ объекта, следовательно, зависимость (1) сводится к (2):

$$f(\delta_1, \omega_1, s_3 \dots s_n, N_1 \dots N_m, k) = \sigma^{\text{пх}}, \quad (2)$$

Зависимость (2) связывает перерегулирование $\sigma^{\text{пх}}$, вычисленное по кривой переходной характеристики, с заданными полюсами $s_1, s_2 \dots s_n$, нулями $N_1, N_2 \dots N_m$ и постоянным множителем k ПФ идентифицируемого объекта.

Реакция системы на единичное ступенчатое воздействие, описывается формулой Хевисайда:

$$h(t) = \frac{G(0)}{H(0)} + \frac{\prod_{i=1}^n |s_i|}{\prod_{j=1}^m |N_j|} \sum_{k=1}^n \frac{\prod_{j=1}^m (s_k - N_j)}{s_k \prod_{i=1, i \neq k}^n (s_k - s_i)} e^{s_k t}, \quad (3)$$

где s_k и N_j – полюсы и нули объекта. Тогда в момент времени достижения максимума $t_m^{\text{пх}}$ выходной сигнал достигает максимального значения X_{max} (точка 2, рис. 1), а следовательно (3) примет вид:

$$h(t_m^{\text{пх}}, \delta_1, \omega_1, s_3 \dots s_n, N_1 \dots N_m, k) = X_{\text{max}}. \quad (4)$$

По аналогии с (4) в момент времени $t_p^{\text{пх}}$ (время регулирования) на основе формулы Хевисайда можно записать

$$h(t_p^{\text{пх}}, \delta_1, \omega_1, s_3 \dots s_n, N_1 \dots N_m, k) = X_{\text{уст}} \pm 0,05 X_{\text{уст}}, \quad (5)$$

а для времени нарастания $t_H^{\text{пх}}$:

$$h(t_H^{\text{пх}}, \delta_1, \omega_1, s_3 \dots s_n, N_1 \dots N_m, k) = X_{\text{уст}}. \quad (6)$$

Очевидно, что для множителя ПФ идентифицируемого объекта справедливо:

$$\left| \frac{k \prod_{i=1}^m N_i}{(\delta_1^2 + \omega_1^2) \prod_{j=1}^n s_j} \right| = X_{\text{уст}}. \quad (7)$$

Помимо основных соотношений связывающих перерегулирование и временные показатели качества с нулями и полюсами можно задать ряд дополнительных соотношений, которые накладывают ограничения на искомое решение. Дополнительные соотношения позволяют задать желаемый вид нулей и полюсов – для комплексно-сопряженных

$$\begin{cases} \operatorname{Re} N_k = \operatorname{Re} N_{k+1}, \\ \operatorname{Im} N_k = -\operatorname{Im} N_{k+1}, \end{cases} \quad (8)$$

а для действительного нуля или полюса справедливо

$$\begin{cases} \operatorname{Im} N_j = 0, \\ \operatorname{Im} s_i = 0. \end{cases} \quad (9)$$

А также описать точки экстремума, перегиба или выходные значения реакции объекта при единичном ступенчатом воздействии через его нули и полюсы:

$$\frac{dh(t_m^{\text{нх}}, \delta_1, \omega_1, s_3 \dots s_n, N_1 \dots N_m, k)}{dt} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{d^2 h(t_{\text{п}}^{\text{нх}}, \delta_1, \omega_1, s_3 \dots s_n, N_1 \dots N_m, k)}{dt^2} = 0, \quad (11)$$

$$h(t_i, \delta_1, \omega_1, s_3 \dots s_n, N_1 \dots N_m) = X_i. \quad (12)$$

Зависимости (2), (4)–(12) объединяются в систему уравнений, численное решение которой даёт значения нулей $N_1 \dots N_m$, полюсов $s_{1,2} = \delta_1 \pm \omega_1 j$, $s_3 \dots s_n$ и множителя ПФ объекта k на основе определенных по кривой переходной характеристики прямых показателей качества.

Оценка точности полученной ПФ идентифицируемого объекта производится по относительной погрешности отклонения реакции ПФ от реакции объекта.

Во второй главе рассмотрены методы анализа стационарных САУ и методы параметрического синтеза ПИД-регулятора для функционирования САУ. Выявлены достоинства и недостатки существующих подходов к анализу и параметрическому синтезу ПИД-регулятора. Показана необходимость при анализе и синтезе САУ определять доминирующие полюсы. Разработан подход и методика анализа САУ, заключающаяся в определении прямых показателей качества (перерегулирования и времени регулирования) по расположению нулей и полюсов анализируемой САУ. Разработан подход и методики (с заданием и без задания доминирующих полюсов) параметрического синтеза ПИД-регулятора, гарантирующие функционирование САУ с заданными прямыми показателями качества путем расположения нулей и полюсов

синтезируемой САУ. Рассмотрены числовые примеры анализа САУ и параметрического синтеза ПИД-регулятора.

В основе разработанного подхода к определению прямых показателей качества САУ по расположению её нулей и полюсов лежит ряд процедур:

1 определение доминирующих полюсов САУ на основе критерия ε -доминирования;

2 вычисление амплитуд составляющих переходного процесса от действия каждого из полюсов на основании выражения $A_i = \left| \frac{G(s_i)}{s_i H'(s_i)} \right|$, где $W(s) = \frac{G(s)}{H(s)}$;

3 вычисление углов Φ_j , образованных доминирующим полюсом, нулями системы и положительным направлением действительной оси и углов φ_i , образованных доминирующим полюсом, другими полюсами системы и положительным направлением действительной оси (рис. 2);

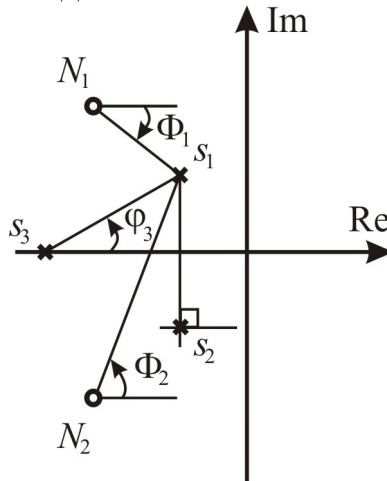


Рис. 2 – Расположение углов, определяемых нулями и полюсами

4 вычисление значения перерегулирования САУ, полученного на основании (2);

5 вычисление времени регулирования по полученному выражению

$$\sum_{k=1}^n A_k e^{s_k t_p} = 0,05 \quad (13)$$

с учетом приближенного значения t_p , полученного по выражениям

$$t_p = \frac{3 + \ln(A_1)}{\operatorname{Re}(s_1)} \text{ или } t_p = \frac{3 + \ln(2A_1)}{\operatorname{Re}(s_1)} \text{ (согласно виду доминирующих полюсов).}$$

Подход к параметрическому синтезу ПИД-регулятора с ПФ $W_P(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}} s = \frac{k(s - N_{\text{П1}})(s - N_{\text{П2}})}{s}$, в которой k_{Π} , $k_{\text{И}}$ и $k_{\text{Д}}$ – настроечные коэффициенты регулятора, $N_{\text{П1,П2}} = x \pm yj$ – нули регулятора, k – множитель ПФ регулятора, заключается в размещении нулей ПФ ПИД-регулятора так, чтобы расположение полюсов и нулей замкнутой синтезируемой САУ обеспечило заданные прямые показатели качества: перерегулирование и время

регулирования. Для решения задачи параметрического синтеза ПИД-регулятора необходимо получить набор соотношений, связывающий значения доминирующих полюсов и нулей регулятора с заданными прямыми показателями качества. Совместное решение набора полученных соотношений даёт значения нулей ПФ ПИД-регулятора и её множителя, на основании которых вычисляются настроечные коэффициенты k_P , k_I и k_D ПИД-регулятора.

В основе разработанного подхода к параметрическому синтезу ПИД-регулятора лежит получение соотношений:

- зависимости $k_P(\delta_1, \omega_1, x, y)$ множителя k_P ПФ ПИД-регулятора от значений действительной x и мнимой y частей нулей ПИД-регулятора и координат доминирующего полюса δ_1 и ω_1 ;
- уравнения фаз в виде соотношения, в котором углы, образованные доминирующим полюсом, нулями и полюсами разомкнутой системы, выражены через искомые значения действительной и мнимой частей нулей ПИД-регулятора x и y и переменные δ_1 и ω_1 ;
- зависимости заданного перерегулирования σ от переменных δ_1 , ω_1 , x и y ;
- зависимости заданного времени регулирования от параметров δ_1 , ω_1 , x и y .

Полученные соотношения объединяются в систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} k_P(\delta_1, \omega_1, x, y) = \frac{\sqrt{\delta_1^2 + \omega_1^2}}{k \sqrt{(x - \delta_1)^2 + (y - \omega_1)^2} \sqrt{(x - \delta_1)^2 + (-y - \omega_1)^2}} \times \\ \times \frac{\prod_{i=1}^m \sqrt{(\operatorname{Re} s_{Oy_i} - \delta_1)^2 + (\operatorname{Im} s_{Oy_i} - \omega_1)^2}}{\prod_{j=1}^n \sqrt{(\operatorname{Re} N_{Oy_j} - \delta_1)^2 + (\operatorname{Im} N_{Oy_j} - \omega_1)^2}}, \\ f(\delta_1, \omega_1, x, y) \mp (2\nu + 1)\pi = 0, \\ \sigma = f(\delta_1, \omega_1, x, y), \\ h(\delta_1, \omega_1, x, y) = 1 \pm 0,05, \end{array} \right. \quad (14)$$

численным решением которой являются множитель ПФ ПИД-регулятора k_P и нули $N_{P1, P2}$. Согласно значениям параметров регулятора k_P и $N_{P1, P2}$ вычисляются настроечные коэффициенты ПИД-регулятора k_P , k_I и k_D .

В третьей главе приведен аналитический обзор существующих методов анализа и синтеза систем управления с интервально-неопределенными параметрами. Показаны достоинства и недостатки существующих подходов к анализу и синтезу систем с интервальными параметрами. Разработан подход к параметрическому синтезу ПИД-регулятора на основе расположения нулей и полюсов интервальной САУ, гарантирующий её функционирование с заданными прямыми показателями качества.

В основу разработанного подхода положены результаты, полученные в главе 2: процедура определения доминирующих полюсов, соотношения,

связывающие прямые показатели качества с нулями и полюсами САУ, соотношения, связывающие множитель k_p ПФ ПИД-регулятора со значениями действительной и мнимой частей нулей ПИД-регулятора и координат доминирующих полюсов.

На основе разработанного подхода реализована методика синтеза параметров ПИД-регулятора, гарантирующая для интервальной САУ заданные прямые показатели качества. Исходными данными для проведения синтеза являются ПФ объекта управления с интервальными параметрами и заданные прямые показатели качества: перерегулирование и время регулирования.

1. На основании заданного интервального объекта управления формируются 2^n вершинных ПФ, где n – количество интервальных параметров объекта управления.

2. Задается постоянный множитель ПФ ПИД-регулятора $k_p = \text{const}$.

3. Для каждого вершинного объекта строится кривая $y(x)$ расположения нулей ПИД-регулятора согласно заданному значению перерегулирования (рис. 3).

4. На основании проведенного анализа строится кусочная кривая 1 (рис. 5) расположения нулей ПИД-регулятора, гарантирующая заданное перерегулирование для любых вариаций параметров объекта управления в заданных интервалах.

5. Для каждого вершинного объекта строится кривая $y(x)$ расположения нулей ПИД-регулятора согласно заданному значению времени регулирования (рис. 4).

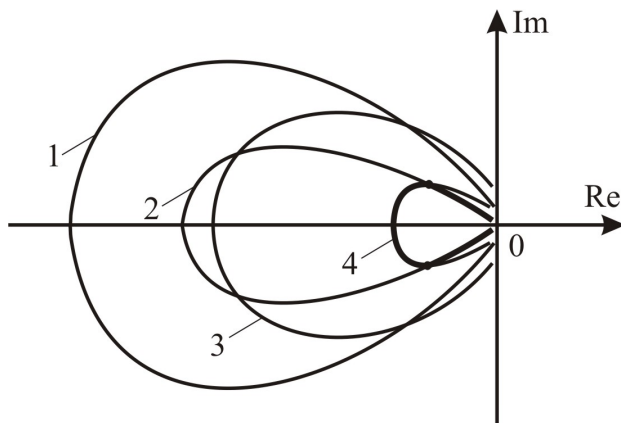


Рис. 3 – Кривые расположения нулей ПИД-регуляторов 1–4 для вершинных объектов при заданном перерегулировании

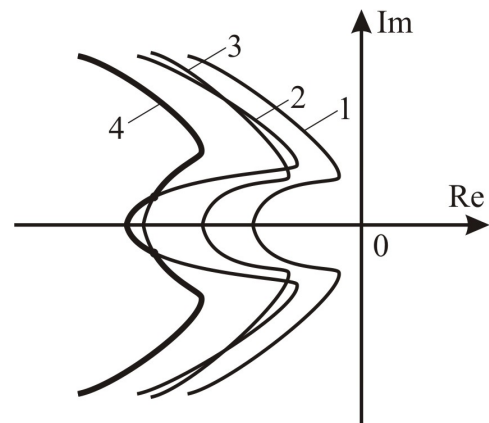


Рис. 4 – Кривые расположения нулей ПИД-регуляторов 1–4 для вершинных объектов при заданном времени регулирования

6. На основании проведенного анализа строится кусочная кривая 2 (рис. 5) расположения нулей ПИД-регулятора, гарантирующая заданное время регулирования для любых вариаций параметров объекта управления в заданных интервалах.

7. Определяется пересечение кривых, построенных в пунктах 4 и 6, и находятся параметры нулей ПИД-регулятора y и x (рис. 5).

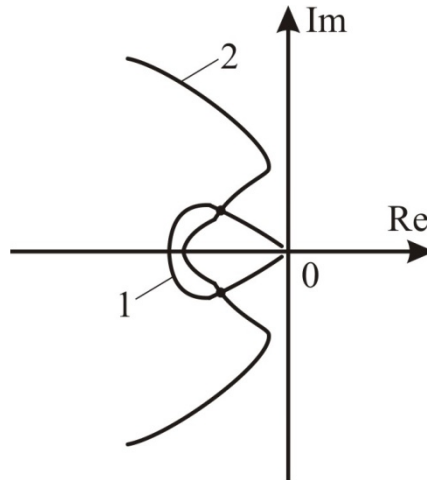


Рис. 5 – Определение параметров y и x ПИД-регулятора

8. Вычисление настроечных коэффициентов ПИД-регулятора k_p , k_i , k_d на основании значений параметров k_p , x и y .

В четвертой главе рассмотрено применение разработанных подходов к идентификации объекта управления и параметрическому синтезу ПИД-регулятора системы с интервальными параметрами, используемых при проектировании САУ на базе синхронного двигателя переменного тока с постоянными магнитами ЗЭП1-Б300.50 У1. Произведена идентификация контура тока системы управления. Рассчитана ПФ механической части системы с учетом изменяющегося момента инерции. Произведен параметрический синтез ПИД-регулятора для контура скорости системы управления согласно заданным прямым показателям качества.

Рассматриваемая система управления на базе синхронного двигателя переменного тока с постоянными магнитами ЗЭП1-Б300.50 У1 реализована по принципу подчиненного управления. Она является трехконтурной системой и включает в себя контуры тока, скорости и положения. При этом каждый контур содержит свой регулятор. Структурная схема системы представлена на рис. 6.

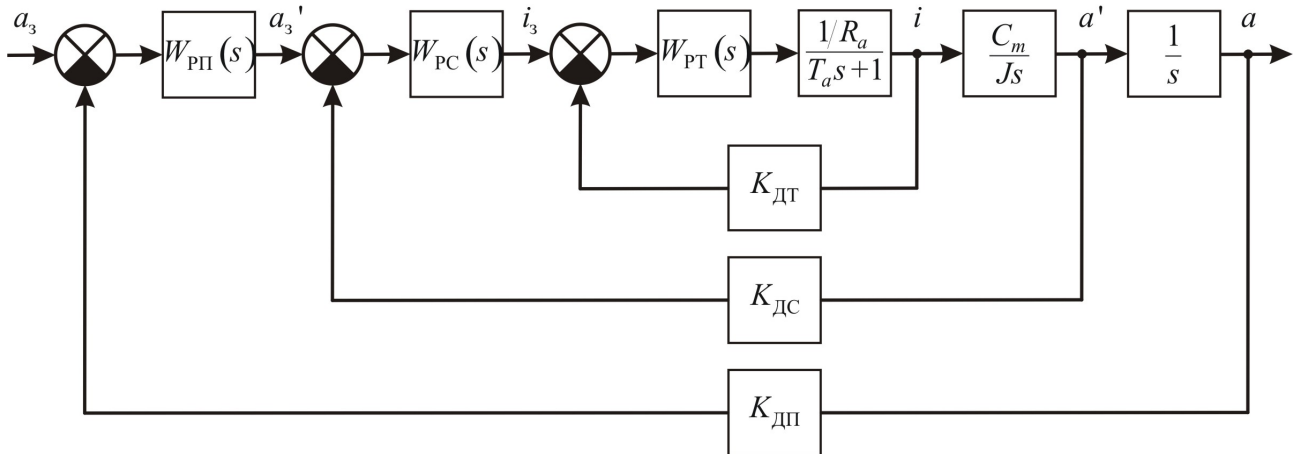
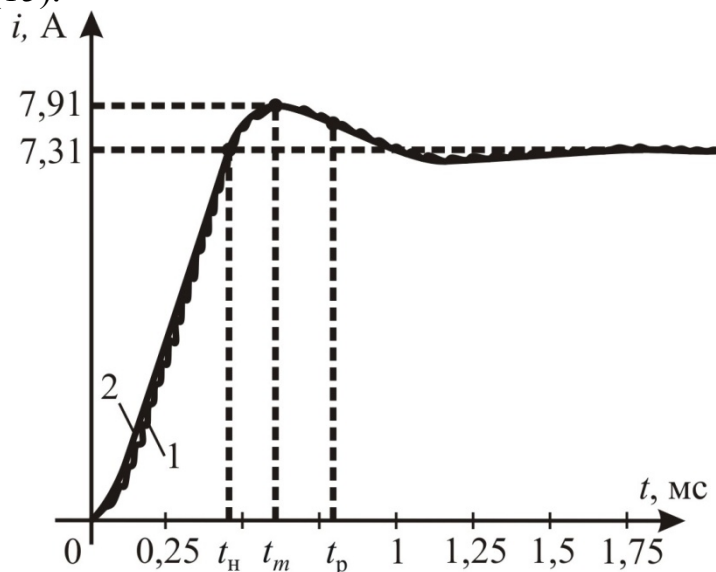


Рис. 6 – Структурная схема системы

В рассматриваемой системе управления решена задача идентификации контура тока, получена его ПФ

$$W_{KT}(s) = \frac{s + 4,073 \cdot 10^7}{s^2 + 7,946 \cdot 10^3 s + 4,073 \cdot 10^7} \quad (15)$$

Результаты идентификации отражает рис. 7, на котором показаны реакции на ступенчатое воздействие $i_3 = 7,31$ А: 1 – контура тока, 2 – его полученной ПФ (15).

Рис. 7 – Переходный процесс в контуре тока при $i_3 = 7,31$ А

Относительная погрешность проведенной идентификации составила 6,24 %, и является вполне приемлемым результатом.

С учетом энергетических характеристик синхронного двигателя переменного тока и возможных вариаций момента инерции рассчитана интервальная ПФ механической части объекта управления контура скорости. Таким образом, интервальная ПФ объекта управления (электрическая и механическая составляющие) контура скорости системы управления на базе

синхронного двигателя переменного тока с постоянными магнитами имеет следующий вид:

$$W_{\text{КС}}(s) = W_{\text{КТ}}(s) \cdot W_{\text{МС}}(s) = \frac{[8,436 \cdot 10^3; 8,436 \cdot 10^4](s + 4,073 \cdot 10^7)}{(s^2 + 7,946 \cdot 10^3 s + 4,073 \cdot 10^7)s} \quad (16)$$

Параметрический синтез ПИД-регулятора контура скорости осуществлен с учетом предъявляемых требований к качеству его функционирования: перерегулирование $\sigma \leq 20\%$, время регулирования $t_p \leq 80$ мс при любых вариациях момента инерции в заданных интервалах.

Для каждой из вершинных ПФ объекта управления, определяемого интервальной ПФ (16), построены кривые расположения нулей ПИД-регулятора, обеспечивающие заданное перерегулирование, при фиксированном параметре $k_p = 5 \cdot 10^{-5}$, и сформирована из них кусочная кривая 1 расположения нулей ПИД-регулятора, гарантирующая заданное перерегулирование для любых вариаций момента инерции J объекта управления в заданных интервалах. Аналогичным образом, для заданного времени регулирования построена кусочная кривая 2 расположения нулей ПИД-регулятора, сформированная из кривых для каждой из вершинной ПФ объекта. На рис. 8 представлены кусочные кривые расположения нулей ПИД-регулятора для заданных значений перерегулирования и времени регулирования, обеспечивающие искомое решение.

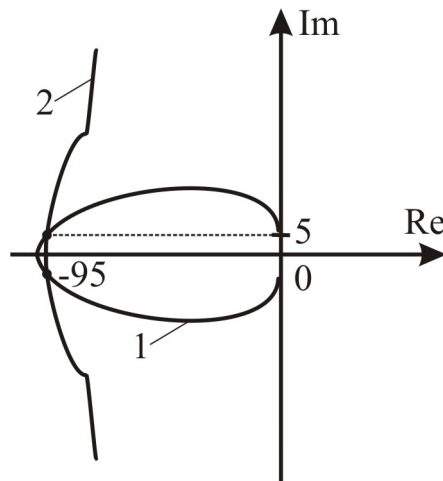


Рис. 8 – Определение параметров ПИД-регулятора: 1 – кривая для заданного перерегулирования, 2 – кривая для заданного времени регулирования

Согласно рис. 8 значения нулей ПИД-регулятора $N_{p1,p2} = -95 \pm 5j$. Следовательно, настроечные коэффициенты ПИД-регулятора составляют: $k_{\text{П}} = 0,01$, $k_{\text{И}} = 0,46$, $k_{\text{Д}} = 5 \cdot 10^{-5}$.

На рис. 9 приведены графики переходных характеристик контура скорости при различной нагрузке.

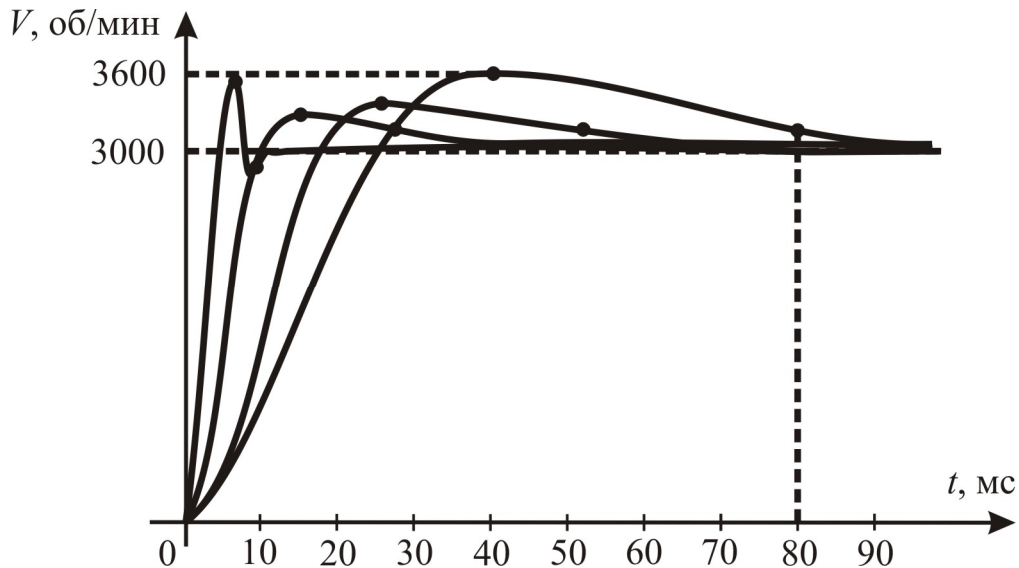


Рис. 9 – Переходные характеристики контура скорости при различной нагрузке

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что найденные настроечные коэффициенты k_{Π} , $k_{\text{И}}$ и $k_{\text{Д}}$ обеспечивают допустимое качество переходных процессов в контуре скорости при изменяющемся в заданных пределах моменте инерции.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Представленная диссертационная работа описывает результаты исследований, направленных на разработку методов и алгоритмов анализа и синтеза стационарных и интервальных систем управления на основе зависимости их нулей и полюсов от прямых показателей качества систем. Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем.

1. Получены соотношения, связывающие прямые показатели качества переходного процесса σ и t_p со значениями нулей, полюсов и множителя ПФ системы.

2. Получены соотношения, связывающие полюсы и нули САУ со значениями выходного сигнала в заданные моменты времени t_i при единичном ступенчатом входном воздействии.

3. Предложен подход к идентификации линейных динамических объектов управления и его методика на основе характеристик переходного процесса.

4. Показана необходимость определения доминирующих полюсов системы и учета расположения всех её полюсов и нулей на комплексной плоскости.

5. Разработан подход к анализу САУ и методика на его основе, позволяющая по расположению нулей и полюсов систем определять их прямые показатели качества.

6. Получены соотношения, определяющие расположение доминирующих полюсов, при котором обеспечиваются заданные прямые показатели качества системы.

7. Разработан подход к параметрическому синтезу ПИД-регулятора, обеспечивающий заданные прямые показатели качества стационарной САУ на основании расположения всех её полюсов и нулей. На основании данного подхода предложены методики синтеза параметров ПИД-регулятора с заданием и без задания доминирующих полюсов.

8. Разработан подход и методика на его основе для решения задачи параметрического синтеза регулятора систем с интервальными параметрами.

9. Рассмотрены вопросы практической реализации алгоритмов идентификации объекта управления и синтеза параметров ПИД-регулятора на примере управления синхронным двигателем переменного тока с постоянными магнитами 3ЭП1-Б300.50 У1. Результаты экспериментов показали эффективность и практическую значимость предложенных методик.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ефимов С.В., Замятин С.В., Аникин А.С. Решение задачи размещения корней интервального полинома с полилинейной неопределенностью // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 248-249
2. Ефимов С.В., Замятин С.В., Аникин А.С. Исследование интервальных полиномов на основе свойств критерия Рауса // Современные техника и технологии: XII международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых – Томск, 2006. – С. 61–63.
3. Ефимов С.В., Замятин С.В. Определение настроек регулятора для обеспечения требуемого качества систем с интервальными параметрами // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск – 2007. – С. 294-296.
4. Ефимов С.В., Гайворонский С.А., Замятин С.В., Суходоев М.С. Определение желаемой области расположения доминирующих полюсов замкнутой системы с учетом её нулей // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 57–61.
5. Ефимов С.В., Гайворонский С.А., Замятин С.В. Анализ прямых показателей качества систем автоматического управления на основе расположения их корней // Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых – Томск, 2009. – С. 133–136.
6. Ефимов С.В. Оценка прямых показателей качества систем автоматического управления с учетом расположения их нулей и полюсов

// Средства и системы автоматизации: проблемы и решения. Материалы X научно-практической конференции Элеси. – Томск – 2009. – С. 133-136.

7. Efimov S.V., Zamyatin S.V., Gayvoronskiy S.A. Direct quality indices analysis of automation system based on their roots location // Automation, Control, and Information Technology – Control, Diagnostics, and Automation (ACIT-CDA 2010) – Novosibirsk, – 2010. – P. 78–80.
8. Ефимов С.В., Гайворонский С.А. Синтез робастной системы управления положением буксируемого подводного аппарата // 17 международная конференция по автоматическому управлению. Автоматика – Харьков, 2010. – С. 38–40.
9. Ефимов С.В., Гайворонский С.А., Замятин С.В. Задачи корневого анализа и синтеза систем автоматического управления // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 16–20.
10. Ефимов С.В., Коновалов В.И., Кочегурова Е.А., Курганов В.В., Бурмантов Д.Г. Система автоматического регулирования давления азота в емкости для хранения катализаторного комплекса с двумя управляющими воздействиями // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 137–141.
11. Ефимов С.В., Гайворонский С.А., Замятин С.В. Синтез ПИД-регулятора с учетом расположения нулей и полюсов системы автоматического регулирования // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. -№5. – С. 102–107.
12. Ефимов С.В., Гайворонский С.А., Замятин С.В. Структурно-параметрическая идентификация объекта управления на основе характеристик переходного процесса // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. -№5. – С. 107–112.