

На правах рукописи



КОЗЫРЬ Андрей Владимирович

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ
РЕЛЕЙНЫХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (промышленность).

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула - 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Феофилов Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Филимонов Николай Борисович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени М.В.
Ломоносова», профессор.

Никаноров Борис Александрович
кандидат технических наук, АО
"Конструкторское бюро приборостроения
им. академика А.Г. Шипунова", г. Тула,
начальник сектора.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)».

Защита диссертации состоится «19» ноября 2019 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, (12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 и на сайте http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Kozyr_AV/

Автореферат разослан «24» сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Соколова
Марина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Одним из важных направлений развития современной нелинейной теории автоматического управления является разработка методов анализа и синтеза автоколебательных систем. Исследованию таких систем посвящено большое количество работ таких ученых, как А. А. Андронов, Я.З. Цыпкин, Е.П. Попов, Н.В. Фалдин, К.Ж. Astrom, А. Megretski. Разработаны точные методы анализа периодических движений в таких системах, как с линейным, так и нелинейным объектом управления (ОУ), предложены критерии их устойчивости, рассмотрены методы линеаризации систем по полезному сигналу, методы анализа чувствительности и сформулирован алгоритм синтеза. Однако существующие подходы в основном были ориентированы на проектирование релейных систем, работающих в непрерывном времени.

В настоящее время большинство систем управления реализуются в цифровом виде. Кроме того, в промышленности массово происходит процесс модернизации устаревших изделий и переход на новую элементную базу к цифровым системам управления. Это обусловлено возможностью просто реализовывать сложные законы управления, кроме того, по сравнению с аналоговым вариантом значительно повышается надежность систем, появляется большая гибкость в настройке, и улучшаются массо-габаритные показатели. Однако введение цифрового регулятора в контур управления приводит к дискретизации сигналов как по времени, так и по уровню, что является существенным недостатком таких систем. В конструкторских бюро и на предприятиях существует большая потребность в прикладных методах, которые бы позволяли осуществлять анализ и проводить синтез релейных систем с цифровым управлением. Исследованию нелинейных цифровых систем посвящены работы Я.З. Цыпкина, Ю.С. Попкова, Е. Jury, R.E. Kalman, W.L. Nelson. Как показывает анализ литературы, целостной теории для таких систем не существует, есть только отдельные результаты, построенные на различных подходах. Таким образом, исследование процессов, протекающих в цифровых релейных системах управления (PCY), и разработка методики синтеза таких систем является **актуальной** задачей.

Цель работы.

Целью является разработка прикладных методов анализа, синтеза и оптимизации релейных систем с цифровым управлением, и их применение для создания систем управления воздушно-динамических приводов и следящих гидравлических приводов.

Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач.

1. Разработать точные методы выделения всех возможных периодических движений и определения их параметров в релейных системах с цифровым управлением. Методы должны позволять анализировать системы с двух- и трёхпозиционными релейными элементами, как с устойчивыми, так и с неустойчивыми линейными и кусочно-линейными объектами управления, учитывая дискретизацию сигналов по времени и уровню.

2. Провести анализ и определить условия возникновения хаотических колебаний в релейных системах с дискретизацией по времени. Разработать метод выделения области фазового пространства, в которой присутствуют такие колебания. Метод должен позволять определять зависимость размеров указанной области от параметров дискретизации.

3. Разработать методы анализа устойчивости периодических движений в цифровых релейных системах управления. Методы должны гарантировать устойчивость периодических движений в некоторой области фазового пространства, то есть давать условия полуглобальной устойчивости указанных систем.

4. На основе предложенных методов анализа для указанных выше типов релейных элементов и классов объектов управления разработать методику синтеза релейных систем с цифровым управлением, позволяющую учитывать влияние дискретизации на параметры процессов в следящих релейных системах и проводить оптимизацию по различным критериям.

5. Синтезировать релейные законы управления для пневматического привода и гидравлического следящего привода с учетом цифровой реализации системы управления, и на этих примерах подтвердить работоспособность и эффективность предлагаемых методов и методик.

Объект исследования: релейные следящие системы с цифровым управлением.

Предмет исследования: процессы в релейных системах управления при их цифровой реализации.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы использовались классические методы линейной и цифровой теории автоматического управления, методы теории матриц, матричных уравнений, теории устойчивости, второй метод Ляпунова, методы конечномерной оптимизации, метод фазового годографа. Все предложенные алгоритмы анализа и синтеза системы управления были реализованы в системе MatLab.

Положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной

В диссертационном исследовании разработаны новые аналитические и численные методы исследования периодических движений в релейных системах цифровым управлением.

1. Методы определения всех возможных симметричных периодических движений в цифровых системах с двух и трехпозиционными релейными элементами и линейными (кусочно-линейными) объектами управления;

2. Локальный метод оценки устойчивости каждого предельного цикла, существующего в цифровой РСУ. Предложенный метод основан на решении системы матричных неравенств и позволяет выделить область притяжения для каждого цикла;

3. Практический критерий устойчивости движений в цифровой релейной системе. Подход основан на втором методе Ляпунова и позволяет определить

то, что траектория движения автономной системы будет с течением времени сходиться к локальному множеству предельных циклов;

4. Методика синтеза релейной следящей системы с цифровым управлением, которая сводится к выбору структуры и численной оптимизации параметров линейных корректирующих устройств. В отличие от известных методов синтеза РСУ в предложенном алгоритме уже на этапе параметрической оптимизации учитывается влияние цифровой реализации;

5. Результаты синтеза цифровой РСУ воздушно-динамическим приводом, результаты синтеза цифровой РСУ для автономного гидравлического привода.

Практическая ценность работы состоит в следующем.

На основании проведенных исследований разработан эффективный алгоритм синтеза автоколебательных следящих систем управления с цифровой реализацией. Предложенный подход был применен для синтеза воздушно-динамического привода, а также полученные результаты использовались для разработки системы управления автономным гидроприводом. Отдельные результаты исследования использованы в учебном процессе ТулГУ и имеют практическое внедрение в АО "Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова".

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов анализа и синтеза РСУ. Представленные в работе результаты расширяют метод фазового годографа на класс цифровых релейных систем, что позволяет на основе единого подхода проектировать такие системы. Полученные результаты использовались при выполнении гранта РФФИ №18-08-01141 по теме «Прикладные методы анализа, синтеза и оптимизации релейных систем с цифровым управлением», а также в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (№ 2.3121.2017 / РСН).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и отдельные её части докладывались на: Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии», г. Воронеж, 2015; XII международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления, г. Липецк, 2017; Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии», г. Воронеж, 2017; Научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами», Москва, МОКБ «Марс», 2017; Юбилейной XX конференции молодых ученых "Навигация и управление движением" 2018г. Санкт-Петербург, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Конференции "Информационные технологии в управлении" (ИТУ-2018) 2018г. Санкт-Петербург, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии», г. Воронеж, 2019; XIII Всероссийском совещании по проблемам управления (ВСПУ-2019) 2019г. Россия, Москва, Институт проблем управления

РАН; The tenth international conference on Swarm intelligence (ICSI-2019), Chiang Mai, Thailand, 2019.

Публикации

По результатам исследования опубликовано 12 статей, в том числе 8 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка используемой литературы из 115 наименований; общий объем –162 страницы машинописного текста, включая 106 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность решаемой задачи, её практическая и теоретическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, дано краткое изложение основных разделов работы.

В первой главе рассматривается область приложений автоколебательных РСУ. Проведен системный анализ существующих методов анализа и синтеза следящих РСУ. В большинстве работ рассматриваются вопросы анализа периодических движений в релейных системах с линейным объектом управления. Объект управления (ОУ) часто содержит различного рода нелинейности, что затрудняет анализ периодических движений и приводит к необходимости проводить линеаризацию таких систем по полезному сигналу. Показано, что наиболее эффективным методом исследования таких систем является метод фазового годографа, разработанный на кафедре САУ Тульского государственного университета. Центральным понятием метода является фазовый годограф (ФГ) релейной системы. Он характеризует частотные свойства объекта управления и служит универсальным инструментом, как на этапе анализа, так и на этапе синтеза РСУ. В рамках данного подхода разработаны методы анализа периодических движений, оценки устойчивости, линеаризации по полезному сигналу. Однако такие методы были ориентированы на синтез непрерывных систем управления и не учитывали дискретной реализации корректирующих устройств.

Рассматривается общая структура РСУ с цифровым управлением (рис.1(а)).

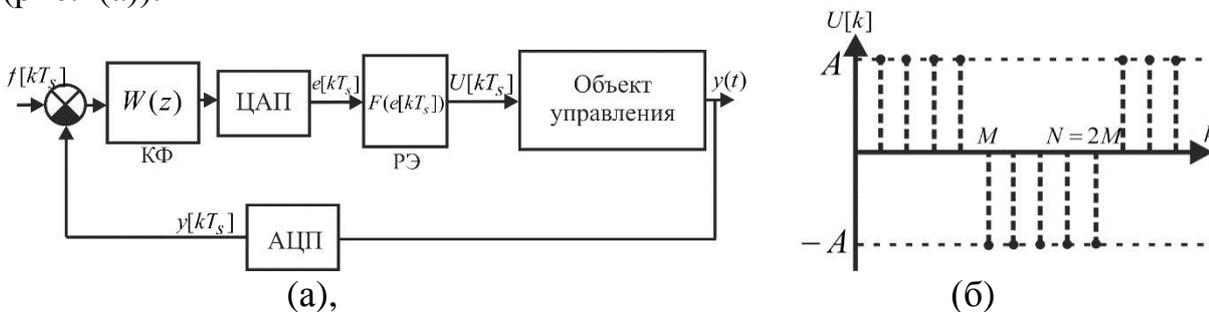


Рис.1.(а) РСУ с цифровым управлением, (б) управляющий сигнал двухпозиционного РЭ

Показано, что цифровая реализация закона управления приводит к существенным количественным и качественным изменениям периодических

движений в РСУ даже при сравнительно высокой частоте дискретизации в автономной системе, как с двухпозиционным РЭ, так и с трехпозиционным РЭ.

Сделаны выводы об актуальности продолжения исследования такого класса систем и разработки для них алгоритмов синтеза систем управления, позволяющих на этапе оптимизации параметров регулятора учитывать цифровую реализацию корректирующих устройств.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию периодических процессов, протекающих в цифровых РСУ. Показано, что дискретизация сигналов по времени в случае устойчивого ОУ приводит к возникновению множества вложенных предельных циклов, соответствующих каждому периодическому движению в непрерывной системе. Разработаны два метода исследования периодических движений цифровых РСУ: во временной и в частотной области для цифровых РСУ с двух и трехпозиционным РЭ.

Рассматриваются РСУ (рис.1) с ОУ, представленным некоторой передаточной функцией $W_{OY}(p) = C(pI - A)^{-1}B$, где A, B, C – матрицы, задающие ОУ в пространстве состояний. Сначала рассматривается РСУ с двухпозиционным РЭ. В цифровых РСУ период автоколебаний всегда будет кратен периоду дискретизации T_s в отличие от непрерывных систем. Далее предполагается, что в системе существует симметричный предельный цикл с периодом $N = 2M$, $N \in \mathbb{N}$, при этом сигнал на выходе РЭ представлен на рис.1(б). В периодическом режиме выходной сигнал реле можно представить в виде решетчатой функции

$$\begin{cases} U[k] = A, npi k = 1 + mN, 2 + mN, \dots, M + mN, \\ U[k] = -A, npi k = M + 1 + mN, \dots, N + mN. \end{cases} \quad m = 0, 1, \dots \quad (1)$$

Такой сигнал можно разложить в дискретный ряд Фурье $U[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n e^{jn\omega_0 k}$,

$\omega_0 = \frac{2\pi}{N}$, $C_n = \left(1 - (-1)^n\right) \frac{je^{-j\pi n/N}}{\sin(\pi n/N)}$, $j = \sqrt{-1}$. Сигнал на выходе непрерывной

части при входном сигнале (1) можно определить как

$$y[kT_s] = \frac{j}{N} \sum_{n=1}^N \left(1 - (-1)^{-1}\right) W_{OY}(e^{jn\omega_0}) \frac{je^{-j\pi n/N}}{\sin(\pi n/N)} e^{2jnk/N}.$$

Исходя из симметрии периодического движения $y[0] = -y[MT_s]$,

$$y[M] = \frac{-1}{M} \sum_{n=1}^M \frac{\left(1 - (-1)^n\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2M}n\right)} \operatorname{Im} \left(W_{OY} \left(e^{\frac{jn\pi}{M}} \right) e^{-j\pi n(M-0.5)/M} \right). \quad (2)$$

Выражение (2) задает компоненту дискретного ФГ, соответствующую выходной координате системы (R -характеристику). Таким образом, в работе вводится понятие дискретного фазового годографа по аналогии с непрерывным случаем. Фазовый годограф дискретной релейной системы есть вектор-

функция, $\mathbf{x}^*[M], M = 1, 2, \dots$, которая задает вектор состояния системы в момент переключения релейного элемента с $-A$ на $+A$.

Условие переключения РЭ в цифровой системе также отличается от непрерывного случая (т.к. РЭ переключается только в дискретные моменты времени)

$$\begin{cases} y^*[M] \geq -b, \\ y^*[M-1] < -b. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, для определения всех возможных симметричных периодических движений предлагается задаться вектором значений полупериода $M = 0, \dots, M_{\max}$ и проверять выполнение условия (3). Дискретизация по времени приводит к запаздыванию $\tau = [0, T_s]$ моментов переключения РЭ. С учетом этого R -характеристика (2) дискретной релейной системы будет иметь вид

$$y^*[M, \tau] = \frac{-1}{M} \sum_{n=1}^M \frac{(1 - (-1)^n)}{\sin(\pi n / 2M)} \operatorname{Im} \left(W_{Oy} (e^{jn\omega_0}) e^{-jn\omega_0\tau} e^{-j\pi n(M-0.5)/M} \right). \quad (4)$$

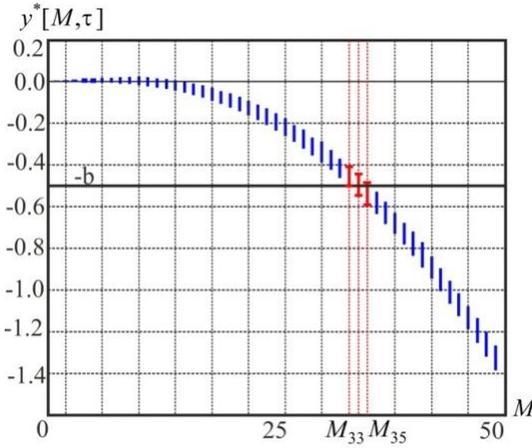


Рис.2 Дискретный ФГ

Проверку выполнения условия (3) можно проводить графически рис.2, для этого необходимо задать вектор значений $M = 1, 2, \dots$, и для каждого значения вычислить (4). Как видно из рис.2 дискретизация приводит к тому, что в цифровой РСУ может установиться несколько устойчивых предельных циклов.

В работе предлагается метод построения ФГ во временной области. Представим ОУ в пространстве состояний

$$\begin{cases} \mathbf{x}[(k+1)T_s] = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}[kT_s] + \mathbf{\Psi}U[k] = \mathbf{F}(\mathbf{x}, U, k), \\ y[kT_s] = \mathbf{C}\mathbf{x}[kT_s], \end{cases} \quad (5)$$

где матрицы $\mathbf{\Phi} = e^{\mathbf{A}T_s}$, $\mathbf{\Psi} = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}t} dt \mathbf{B}$. Исходя из условий симметричности периодического решения, можно получить

$$\mathbf{x}^*[0+M] = -\mathbf{x}^*[0] = \mathbf{\Phi}^M \mathbf{x}^*[0] - (\mathbf{\Phi} - \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{\Phi}^M - \mathbf{I}) \mathbf{\Psi} \mathbf{A},$$

\mathbf{I} — единичная матрица размерностью $n \times n$.

Движение системы на полупериоде определяется как

$$\mathbf{x}^*[M-1] = \mathbf{\Phi}^M \mathbf{x}^*[k] - (\mathbf{\Phi} - \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{\Phi}^M - \mathbf{I}) \mathbf{\Psi} \mathbf{A}, k = 0 \dots M. \quad (6)$$

Для определения всех возможных периодических движений необходимо проверить выполнение условий (3), исходя из того, что $y^*[M] = \mathbf{C}\mathbf{x}^*[M]$.

Учитывая запаздывание, можно получить дискретный ФГ

$$\mathbf{C}\mathbf{x}^*(T_0, \tau) = \mathbf{C}\mathbf{x}^*(T_0) \cdot \tau + \mathbf{C} \cdot (1 - \tau) \cdot \mathbf{\Phi}^{-1} \mathbf{x}^*(T_0) = -b, 0 < \tau < 1, \quad (8)$$

где T_0 – полупериод автоколебаний в непрерывной системе.

Аналогичным образом определяются периодические движения в РСУ с трехпозиционным управляющим РЭ, только рассматриваются условия переключения релейного элемента с (0) на (+A) и с (+A) на (0). Состояние дискретной системы, при котором реле переключится с (0) на +A, определится как $\mathbf{x}^*[M, L] = (\mathbf{I} + \Phi^M)^{-1} \Phi^M (\Phi^{-(M-L)} - \mathbf{I})(\Phi - \mathbf{I})^{-1} \Psi \mathbf{A}$, а переключение с +A на (0) как $\mathbf{x}^{**}[M, L] = -\Phi^{-N} \cdot \mathbf{x}^*[M, L]$. Условия существования симметричного периодического процесса в трехпозиционной релейной системе можно представить в следующем виде

$$\begin{cases} \mathbf{C}\mathbf{x}^*(M, L) < -b, \mathbf{C}\mathbf{x}^*(M-1, L) \geq -b, \mathbf{C}\mathbf{x}^{**}(M, L-1) < -\lambda b, \\ \mathbf{C}\mathbf{x}^{**}(M, L-1) \geq -\lambda b. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда алгоритм поиска симметричных периодических движений в трехпозиционной релейной системе можно записать следующим образом.

1. Задается вектор значений возможного полупериода автоколебаний M ;
2. Задается вектор параметра скважности сигнала $L = 1..M$;
3. Если выполняется условие (9), то в цифровой РСУ возможны периодические движения с параметрами управляющего сигнала M, L .

В непрерывном случае строится два годографа $\mathbf{C}\mathbf{x}^*(T_0, \gamma), \mathbf{C}\mathbf{x}^{**}(T_0, \tau)$, и графически определяется точка пересечения, которая задает два параметра – полупериод автоколебаний T и параметр скважности γ рис.3 (а). В дискретном случае необходимо построить семейство годографов в зависимости от запаздывания $\mathbf{C}\mathbf{x}^*(T_0, \gamma, \tau)$ и $\mathbf{C}\mathbf{x}^{**}(T, \gamma, \tau), 0 < \tau < 1$, далее определяется область R возможных автоколебаний рис.4(б).

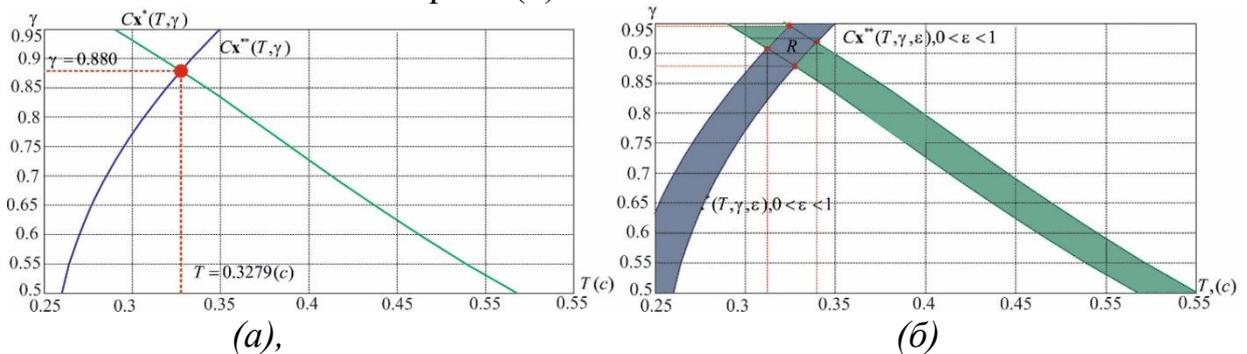


Рис.3 Определение параметров возможных автоколебаний (а) – непрерывной системе, (б) – цифровой РСУ

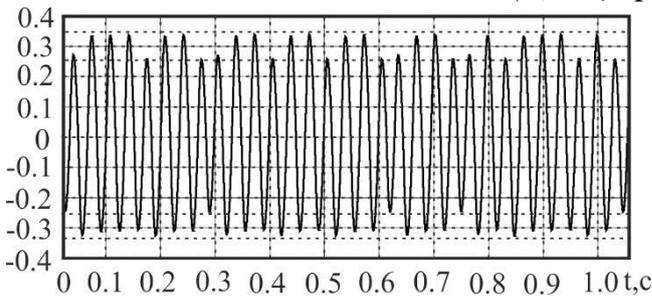


Рис. 4

Как видно из примера на рис. 3 в непрерывной системе возможен единственный симметричный периодический режим с параметрами $T_0 = 0.3279(c), \gamma = 0.88$, в то время,

как в системе с тем же ОУ и дискретизацией с периодом $T_s = 0.02(c)$ могут

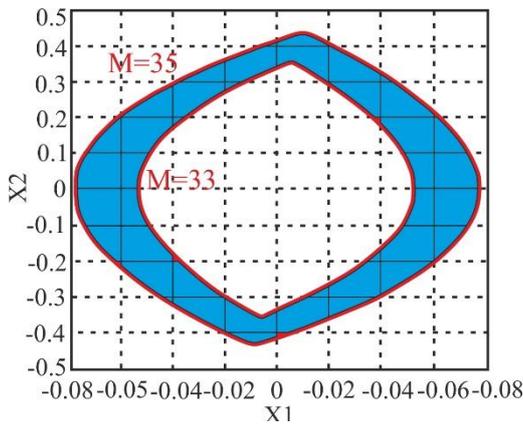


Рис. 5

установиться 3 периодических режима, которые принадлежат области R : 1. $M = 33, L = 29$; 2. $M = 34, L = 30$; 3. $M = 34, L = 31$.

Далее показано, что в случае, если ОУ является неустойчивым, то в автономной цифровой РСУ возникают микро-хаотические колебания. Качественный вид таких движений показан на рис.4 для релейной системы с двухпозиционным реле и неустойчивым ОУ, заданным в виде (6). В работе показано, что в

случае неустойчивого объекта в цифровой РСУ, используя дискретный ФГ, можно выделить несколько возможных предельных циклов (рис.2). В силу того, что управляющее воздействие на РЭ подается только в дискретные моменты времени, между тактами квантования РСУ фактически является разомкнутой, вследствие чего в цифровой РСУ с неустойчивым ОУ происходит «биение» между возможными предельными циклами, и устанавливаются микрохаотические колебания. Такие колебания существуют в некоторой ΔS области вокруг предельного цикла, соответствующего непрерывной системе, размер которой зависит от периода дискретизации. На рис.5 приведен фазовый портрет цифровой РСУ с неустойчивым ОУ, в которой устанавливаются микрохаотические колебания. Показано, что диапазон микрохаотических колебаний находится между минимальным и максимальным предельными циклами, определенными с помощью дискретного ФГ (рис.5). Таким образом, разработанный метод определения всех возможных автоколебаний в цифровых РСУ позволяет выделить область микрохаотических колебаний и связать ее размер с периодом дискретизации. Для примера (рис.4,5) период микрохаотических колебания находится в интервале $M = 33...35$.

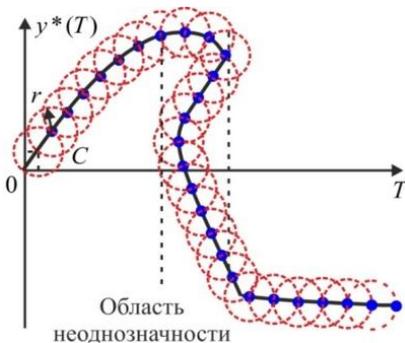


Рис. 6

Разработаны методы определения периодических движений в релейных системах с кусочно-линейными объектами управления и цифровым регулятором. Такие объекты очень широко распространены на практике. Практически любая техническая система содержит звенья с насыщением или механическими упорами. Известной особенностью здесь является то, что в этом случае фазовый годограф имеет диапазон, в котором он является неоднозначной вектор-

функцией. Значит, могут существовать колебания одной частоты, но разные по

форме. Известные методы построения ФГ основаны на численном решении основного уравнения годографа $\mathbf{x}^*(T_0) + \mathbf{F}(\mathbf{x}^*(T_0), A, T_0) = 0$. Далее, задается вектор значений полупериода T_0 , на каждом из которых численно решается уравнение ФГ, функция \mathbf{F} – задает динамику ОУ. Такой подход не позволяет выделить все ветви неоднозначности. Для построения ФГ с областями неоднозначности в работе предлагается использовать *сферический алгоритм* продолжения решения по параметру. В качестве параметра выступает полупериод автоколебаний T_0 . Основная идея данного алгоритма состоит в том, что решение уравнения фазового годографа ищется на n -мерной сфере, причем полупериод T считается также неизвестной величиной, которая находится на сфере радиусом r_n . Для того, чтобы определить все ветви неоднозначности ФГ необходимо численно решать систему уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{x}^*(T_0) + \mathbf{F}(\mathbf{x}^*(T), A, T_0) = 0, \mathbf{x}^* = (x_1, x_2, \dots, x_n), \\ (x_1^* - C_1)^2 + (x_2^* - C_1)^2 + \dots + (x_n^* - C_1)^2 + (T_0 - C_{n+1})^2 - r = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Результат решения системы (10) показан на рис.6. Предложенный подход позволяет численно выделить ветви неоднозначности ФГ. Далее, периодические движения определяются аналогичным образом, исходя из условий (3) или (9).

В **третьей главе** рассматриваются вопросы устойчивости периодических движений в цифровых РСУ. Предлагается два метода, которые позволяют оценить устойчивость автоколебаний "в большом", т.е. выделить область притяжения предельных циклов. Первый метод позволяет оценить устойчивость каждого из возможных в дискретной системе предельных циклов и определяет соответствующую область притяжения. Рассмотрим РСУ с ОУ, заданным в виде (6). Допустим, что в ней возможно существование нескольких вложенных симметричных предельных циклов $\mathbf{x}^*[MnT_s], n=1, 2, \dots$, причем полупериод M каждого предельного цикла отличается на один такт. Далее, рассмотрим любое из возможных периодических движений, возмущенное малым начальным отклонением $\Delta \mathbf{x}$. Отличительной особенностью цифровых РСУ от непрерывных является то, что релейный элемент переключается только в моменты времени кратные целому значению T_s . Возмущение в начальных условиях $\Delta \mathbf{x}$ может не приводить к изменению момента переключения РЭ, тогда $\Delta M = 0$. То есть возмущенное $\tilde{y}(t)$ и невозмущенное $y(t)$ периодические движения пересекают поверхность переключения $S = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n: \mathbf{C}\mathbf{x} = -b\}$ внутри интервала выборки $t_1 \wedge t_1^* \in ([M-1], M)T_s$. Таким образом, возмущение $\Delta \mathbf{x}$ не приводит к изменению момента переключения РЭ, и возмущенная траектория с течением времени будет сходиться к предельному циклу M , то есть $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\mathbf{x}}[k] - \mathbf{x}[k]) = \lim_{k \rightarrow \infty} \Phi^M \Delta \mathbf{x}[k]$. Для каждого предельного цикла \mathbf{x}_M^* в цифровой РСУ можно определить области возмущений $\Delta \in \mathbb{R}^n$ так, что каждое решение с начальными условиями $\tilde{\mathbf{x}}_M^* = \mathbf{x}_M^* + \Delta$ будет асимптотически

сходиться к предельному циклу с полупериодом M . Локальную область устойчивости каждого предельного цикла $\Delta \in \mathbf{D}$ можно определить из условий переключения РЭ, численно решив систему матричных неравенств

$$\mathbf{D} = \begin{cases} (-1)^i \mathbf{C}^T \cdot \Phi^M \Phi_M^i \Delta + b - \mathbf{C}^T \mathbf{x}_M^* \leq 0, \mathbf{C}^T (\mathbf{x}_N^* + \Delta) \geq b, \text{ если } U = A, \\ (-1)^{i+1} \mathbf{C}^T \cdot \Phi^{(M+1)} \Phi_M^i \Delta - \Phi^{-1} (\mathbf{x}_M^* - \Psi \mathbf{C}) < 0, \mathbf{C}^T (\mathbf{x}_N^* + \Delta) > -b, \text{ если } U = -A. \end{cases}$$

На рис.7 приведен фазовый портрет цифровой РСУ, показано, что в системе возможны три предельных цикла с периодом повторения N ; $\xi_1(N=6)$, $\xi_2(N=8)$, $\xi_3(N=10)$. Для каждого предельного цикла существуют области притяжения \mathbf{D} . Показано, что такие области являются несвязанными и для каждого цикла имеют различные размеры.

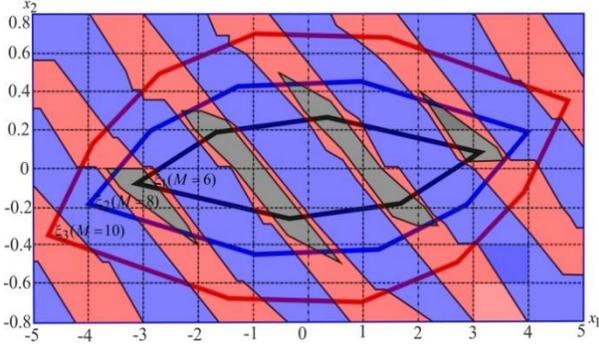


Рис. 7

критерий $R\varepsilon$ – асимптотической устойчивости, который позволяет оценить область устойчивости локального множества предельных циклов. Цифровая РСУ с ОУ (6) называется $R\varepsilon$ – асимптотически устойчивой, если существуют некоторые заданные $\varepsilon > 0$ и $R > \varepsilon > 0$ такие, что любое решение $\mathbf{x}[k]$ с начальными условиями, находящимися внутри сферы $\mathbf{x}[0] \in \mathbf{B}(0, R)$, будет асимптотически сходиться в шар $\mathbf{B}(0, \varepsilon)$, то есть

$\mathbf{x}[k] \rightarrow \mathbf{B}(0, \varepsilon)$, при $k \rightarrow \infty$. Пусть начальное условие, соответствующее предельному циклу, в начальный момент времени получило некоторое конечное возмущение Δ . Считаем, что возмущение Δ является достаточно большим, что приводит к смещению момента переключения релейного элемента. Таким образом, траектория системы окажется внутри слоя поверхности переключения

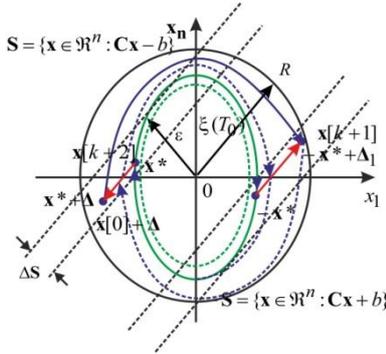


Рис.8

ΔS в момент времени $k = M_{\max}$, причем $\mathbf{x}^*[M_{\max}] + \Delta = -\mathbf{x}^* - \Delta_1$, как показано на рис.8.

Дискретное отображение $\Delta_1 = T[k, M_{\max}] \Delta$ определяется как

$$T[k, M_{\max}] = \begin{pmatrix} O[k] \mathbf{C} \\ \mathbf{C} O[k] \end{pmatrix} \Phi^k, \quad (6)$$

$$O[k] = \Phi^k \mathbf{x}^* - \Phi^{M_{\max}} \mathbf{x}^* - (\Phi - \mathbf{I})^{-1} (\Phi^k - \mathbf{I}) \Psi U_{\text{рел}} + (\Phi - \mathbf{I})^{-1} (\Phi^{M_{\max}} - \mathbf{I}) \Psi U_{\text{рел}}.$$

Для доказательства того, что полученное нелинейное отображение сжимается, потребуем, чтобы в каждой точке k существовала положительно определенная матрица Ляпунова \mathbf{P} , и выполнялось условие

$$\mathbf{P} - \mathbf{T}[k, M_{\max}]^T \mathbf{P} \mathbf{T}[k, M_{\max}] > 0.$$

Данный критерий является достаточным условием устойчивости периодических движений в цифровой РСУ.

В **четвертой главе** разрабатывается методика синтеза цифровой системы управления РСУ, учитывающая дискретную реализацию на этапе оптимизации параметров регулятора. Показаны ее достоинства по сравнению с существующими методами. Разрабатываемый в работе алгоритм синтеза РСУ состоит из нескольких основных этапов. Сначала задаются параметры цифрового контроллера, частота дискретизации, разрядность. На следующем этапе, исходя из анализа дискретного ФГ, выбирается структура корректирующих устройств. Основным показателем качества для следящих РСУ, как правило, является фазовое запаздывание, поэтому за критерий оптимизации принят $Q = \max_{0 \leq \omega \leq \omega_{\max}} |\arg \varphi(j\omega)|$, который оперативно вычисляется на

основе известных методов линеаризации с учетом дискретизации. Параметрический синтез выполняется с помощью конечномерной оптимизации. В качестве ограничений на параметры корректирующих устройств выступает устойчивость периодических движений в цифровой РСУ и физическая реализуемость фильтра. В качестве алгоритма оптимизации в работе реализован метод роя частиц (PSO). Такой метод позволяет использовать параллельные вычисления, что существенно ускоряет процедуру синтеза. На последнем этапе проводится численное моделирование синтезированной системы управления, оценивается влияние дискретизации по уровню на качество процессов управления. Для иллюстрации на рис.9 приведены ФЧХ привода, синтезированного с помощью предлагаемого алгоритма и с помощью метода ФГ без учета дискретизации. Из рисунка видно,

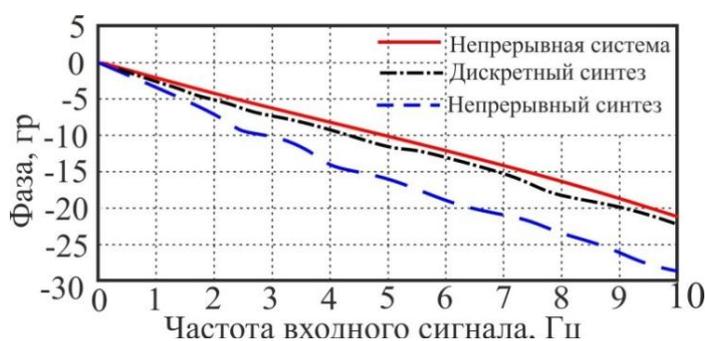


Рис.9

что учет дискретизации позволяет уменьшить максимальное фазовое запаздывание на 18,5%.

На основе предложенных теоретических методов проведен синтез двух регуляторов для технических систем: воздушно-динамического привода и автономного гидравлического привода (АГП). Структурная схема первого типа привода показана на рис.10, где $f[kT]$ — входной сигнал, α — угол поворота распределителя (механически ограничен α_m), M — скорость носителя, δ — угол поворота руля (механически ограничен δ_m),

$$W_1(z) = \bar{Z} \left\{ K_3(M) \left(\frac{T_{\phi 1} p + 1}{T_{\phi 2} p + 1} \right) \right\}, \quad W_2(z) = K_2 \frac{0.09148z - 0.09347}{z^2 - 1.78z + 0.786} \Big|_{z=e^{T_s p}}$$

Параметры привода являются нестационарными и сильно зависят от скорости носителя M .

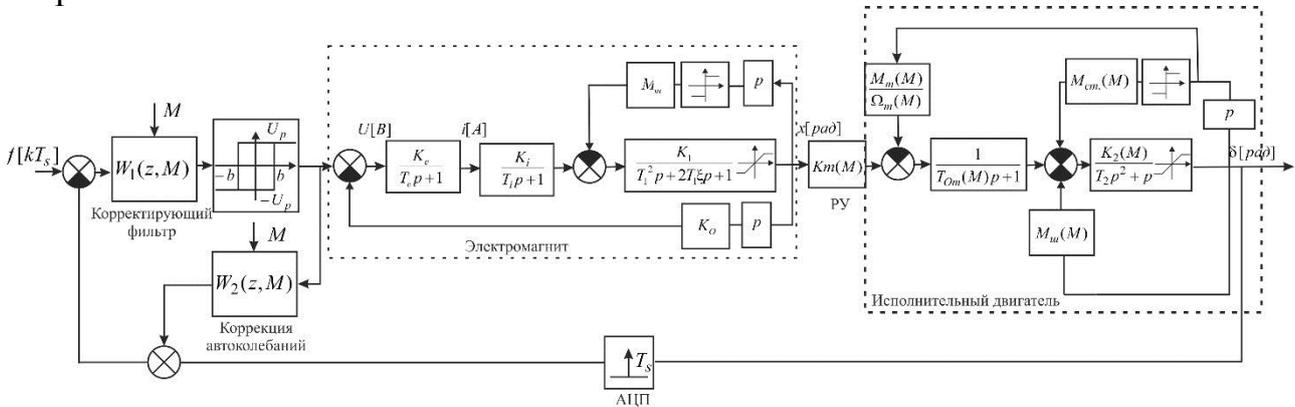


Рис.10 Структурная схема ВДРП

В работе предполагается, что в каждый момент времени доступна для измерения скорость носителя, исходя из которой в процессе функционирования привода будет происходить табличная адаптация параметров корректирующих устройств. В работе проводился параметрический синтез для 4-х типовых режимов работы привода в зависимости от скорости носителя $M = [0.4, 0.8, 1.4, 1.8]$. Для каждого режима, используя разработанный алгоритм, был проведен синтез корректирующих устройств. Закон управления реализуется на десяти разрядном цифровом контроллере с частотой дискретизации $f_s = 5 \text{ кГц}$. Желаемая частота автоколебаний $f_a = 200 \text{ Гц}$. После оптимизации были получены зависимости параметров корректирующих устройств от скорости $K_2(M), K_3(M), T_{\phi 1}(M), T_{\phi 2}(M)$. В результате синтеза системы управления привода на всех режимах работы максимальный фазовый сдвиг не превышает значения 32° . Цифровая реализация автоколебательной РСУ позволяет непрерывно изменять параметры корректирующих устройств, что обеспечивает наилучшие показатели точности работы систем на всех режимах работы.

В главе также рассматривается синтез цифровой автоколебательной системы управления для автономного гидропривода (АРГП). Была получена его упрощенная линеаризованная модель. Алгоритм управления реализуется на цифровом контроллере. Разработана экспериментальная установка для отработки цифровой системы управления АРГ. Стенд состоит из гидропривода и механической системы нагружения, эмитирующей шарнирную нагрузку. В качестве обратных связей использовались сигналы с потенциометрического датчика перемещения штока цилиндра и сигналы с датчиков давления. В результате синтеза цифровой РСУ ФЧХ привода в диапазоне частот $f = [0 \dots 15] \text{ Гц}$ не превышает -30° , что является достаточно высоким показателем для такого класса систем с автоколебательным управлением.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработаны точные методы определения всех возможных симметричных периодических движений в релейных системах, работающих в дискретном времени. Методы применимы к системам с двухпозиционным и трехпозиционным РЭ и основаны на предложенном понятии дискретного ФГ.
2. Предложен численный метод построения фазового годографа с областями неоднозначности, что позволяет анализировать периодические режимы в цифровых РСУ с кусочно-линейным ОУ.
3. Предложен подход к определению диапазона возможных хаотических колебаний, возникающих в цифровых релейных системах с неустойчивым ОУ.
4. Разработаны два метода анализа устойчивости периодических движений в релейных системах с цифровым управлением. Первый метод исследует устойчивость каждого из возможных предельных циклов и выделяет области их притяжения в фазовом пространстве. Второй метод позволяет оценить сходимость периодических движений в определенную область фазового пространства и является удобным для использования в инженерной практике условием устойчивости периодических движений в цифровых РСУ.
5. Разработан метод оптимизации параметров корректирующих устройств для цифровых автоколебательных следящих систем. Он позволяет учитывать влияние дискретной реализации на параметры синтезированной системы на этапе оптимизации параметров регулятора.
6. Проведен синтез цифровой системы управления автоколебательным воздушно-динамическим рулевым приводом. Предложена цифровая автоколебательная система управления для автономного гидравлического рулевого привода. Даны практические рекомендации для синтеза цифровых автоколебательных следящих систем.

Публикации по теме диссертации

1. Козырь, А. В. Устойчивость периодических движений в системах управления с ШИМ–регулятором / А. В. Козырь, С. В. Феофилов, А. В. Гусев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 2. – С. 71-79.
2. Козырь, А. В. Об одном методе линеаризации систем управления, работающих в режиме ШИМ / А. В. Козырь, Н. В. Фалдин, С. В. Феофилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 12. – Ч. 4 – С. 54-61.
3. Козырь, А. В. Синтез системы управления воздушно-динамического рулевого привода, работающего в режиме ШИМ / А. В. Козырь, С. В. Феофилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 12. – Ч. 4. – С. 105-113.
4. Козырь, А. В. Периодические колебания в дискретных релейных системах управления / А. В. Козырь, С. В. Феофилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 12. – Ч. 3. – С. 61–71.
5. Козырь, А. В. Современное состояние и перспективы развития теории релейных систем автоматического управления / А. В. Козырь, С. В. Феофилов // «Мехатроника, автоматизация, управление». – 2017. – №9 С. 589—596. DOI: 10.17587/mau.18.589-596.
6. Козырь, А. В. Анализ периодических движений в цифровых автоколебательных системах управления / А. В. Козырь, С. В. Феофилов //

«Мехатроника, автоматизация, управление». – 2018. – №9 С. 587—594 DOI: 10.17587/mau.19.587-594.

7. Козырь, А. В. Периодические процессы в релейных автоколебательных системах с цифровым управлением / А. В. Козырь, С. В. Феофилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018.– Вып. 12. – С. 135–147.

8. Козырь, А. В. Периодические движения в релейных системах с кусочно-линейным объектом управления и цифровым регулятором / А. В. Козырь, С. В. Феофилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018.– Вып. 11. – С. 189–200.

9. Козырь, А. В. Синтез релейной системы управления воздушно-динамическим рулевым приводом / А. В. Козырь, С. В. Феофилов // Сборник докладов X-й Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов», Москва, МАИ, 26 июня 2015г. – МАИ.– 2015.– С.230-235.

10. Козырь, А. В. Периодические колебания в релейно-импульсных системах управления / А. В. Козырь, С. В. Феофилов //Материалы XII международной научно-практической конференции, «Современные сложные системы управления» 25-27 октября 2017г., г. Липецк. Вып. 2.– Ч.2.– 2017, – С.138-142

11. Козырь, А. В. Проектирование цифровой системы управления автоколебательным рулевым приводом летательного аппарата / А. В. Козырь, С. В. Феофилов // Тезисы докладов научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами (Москва, 31 октября – 2 ноября 2017 г.)».– М.: МОКБ «Марс», 2017. – С.73-75.

12. Козырь, А. В. Особенности автоколебаний и режима слежения в релейно-импульсных системах управления / А. В. Козырь, С. В. Феофилов //Материалы XVIII-й международной научно-методической конференции "Информатика: проблемы, методология, технологии 08-09 февраля 2018г.– Воронеж. – С. 258-264.

13. Kozyr, A. Parameters optimization of relay self-oscillations sampled data controller based on particle swarm optimization/A. Kozyr, S.V. Feofilov, E.V. Larkin // Advances in Swarm Intelligence. ICSI 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11655. P.106-117. Springer, Cham. 2019.