

На правах рукописи



Емельянова Татьяна Алексеевна

**Параметрический синтез многоконтурных систем автоматического
управления**

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники
и систем управления»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ НИ ТПУ)

Научный руководитель – доктор технических наук профессор
Гончаров Валерий Иванович

Официальные оппоненты: Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительной техники
Юго-Западного государственного
университета (г. Курск)

Куцый Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизированных
систем Иркутского национального
исследовательского технического
университета

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится « 6 » июня 2019 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.03, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу:
г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте:
<http://www.tusur.ru/ru/science/education/dissertations/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зыков Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Управление многими объектами осуществляется системами автоматического управления (САУ), которые содержат более одного контура управления. Применение таких систем, образующих класс многоконтурных САУ, возникает в связи с необходимостью достижения высоких показателей по точности и качеству работы. Задачи создания и эксплуатации многоконтурных САУ и их элементов являются важными как с теоретической точки зрения, так и в силу многочисленных технических приложений. Уровень требований к качеству управления постоянно увеличивается, отражая все возрастающие запросы технологий производства и их технических решений. В этом смысле задачи создания многоконтурных систем управления являются важными и актуальными, так как высокие показатели качества управления достигаются именно на таких структурах. В то же время создание систем управления этого класса оказывается значительно более сложным по сравнению с одноконтурными, так как синтез их основных элементов – регуляторов – переходит из класса линейных уравнений синтеза к нелинейным со всеми их характерными трудностями.

Для решения рассматриваемых сложных задач расчета указанных элементов систем управления используются различные способы упрощения нелинейных уравнений синтеза. В настоящее время основной из них заключается в переходе к какому-либо линейным приближениям. Наиболее распространен последовательный расчет контуров, начиная с внутреннего (backstepping - англ), что позволяет заменить процедуру решения нелинейного уравнения синтеза приближенным решением последовательности линейных уравнений. Основным недостатком такой расчетной схемы связан с появлением дополнительного источника погрешности. Он возникает из-за необходимости распределения свойств эталонной, желаемой системы по каждому контуру в отдельности. Но такой переход может быть выполнен только приближенно. По этой причине в получаемом решении будут присутствовать два источника погрешности. Первый является следствием принципиальной особенности задач синтеза – они решаются приближенно. Второй определен отмеченным этапом декомпозиции желаемых свойств систем управления. Поэтому общая погрешность синтеза САУ в конечном итоге оказывается больше, чем минимально достижимая. По этой причине поиск путей получения решений, свободных от погрешностей декомпозиции заданных свойств желаемой САУ по контурам, представляет собой актуальную и перспективную для теории и практики задачу.

Аспектам синтеза элементов и устройств многоконтурных систем управления посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных авторов, отражающие многообразие подходов, вызванное, прежде всего, сложностью задачи и попытками использования разнообразных возможностей. Значительные результаты по развитию аналитических и численных методов получили Ротач В.Я., Огурок И.А., Вишнякова Ю.Н., Попов В.И., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Егупов Н.Д., Ким Д.П., Дядик В.Ф., Кулаков Г.Т., Kessler С., Broughton S.A., Bryan K., McMullen M., Vrancic D., Strmenic S., Hanus R., Vilius

A.G., Rik De Doncker, Duco W.J. Pulle, Andre Veltman, Leonhard W., Barnes M. и другие.

Целью работы является разработка и исследование численного метода параметрического синтеза регуляторов стационарных линейных многоконтурных систем управления.

Задачи исследования. Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих теоретических и практических задач:

1. Постановка задачи синтеза регуляторов многоконтурных систем управления численным методом.

2. Исследование обусловленности уравнений синтеза многоконтурных систем управления в зависимости от числа неизвестных коэффициентов регуляторов и особенностей объектов управления.

3. Получение и исследование регуляризованного по методу Тихонова уравнения синтеза САУ.

4. Разработка подхода и исследование регуляризирующих свойств метода нелинейного программирования в задачах синтеза регуляторов многоконтурных систем управления.

5. Применение численного метода синтеза САУ, инструментов регуляризации и нелинейного программирования для расчета регуляторов двухконтурной системы управления температурой химического реактора в установке синтеза высокотемпературного пластика.

Объектом исследования являются регуляторы многоконтурных линеаризованных стационарных систем автоматического управления.

Предмет исследования – численный метод параметрического синтеза регуляторов многоконтурных систем управления, обусловленность уравнений синтеза САУ и поиск путей их регуляризации.

Методы исследования. Для достижения сформулированной цели и связанных с ней задач в работе использованы методы теории автоматического управления, операционного и интегрального исчисления, вещественный интерполяционный метод, методы решения систем линейных и нелинейных уравнений, метод регуляризации Тихонова, методы нелинейного программирования и компьютерного моделирования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается обоснованностью выбранных методов, адекватностью используемых математических моделей, результатами компьютерного моделирования, сравнительным анализом полученных результатов, а также сопоставлением их с известными результатами.

Научная новизна работы:

1. Выполнено исследование обусловленности уравнений синтеза многоконтурных систему управления в зависимости от особенностей объектов управления САУ. Установлено, что системы управления объектами, имеющие запаздывание, распределенные параметры или неминимально-фазовые особенности, характеризуются существенным ухудшением условий синтеза регуляторов, в том числе обусловленностью.

2. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию численных решений уравнений синтеза регуляторов систем управления, результаты которых подтвердили возможность использования принятого численного метода для получения регуляторов многоконтурных систем управления без принятия специальных мер по регуляризации уравнения при вычислении до двух/трех неизвестных коэффициентов, входящих в уравнение мультипликативно.

3. Предложен способ улучшения обусловленности уравнения синтеза систем управления за счет его регуляризации, что обеспечивает увеличение примерно вдвое количество вычисляемых коэффициентов регуляторов.

4. Исследованы возможности метода нелинейного программирования с позиций регуляризации уравнения синтеза регуляторов многоконтурных систем управления, получены положительные результаты, позволяющие увеличивать число неизвестных коэффициентов, а также вводить дополнительные ограничения на искомые параметры.

Соответствие специальности определяется ее направлением на «...совершенствование и создание принципиально новых элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, включая разработку научных основ физических и технических принципов создания указанных элементов и устройств». Диссертационные исследования соответствуют специальности 05.13.05 по следующим пунктам:

П. 1 «Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления. По п.1 специальности рассмотрено влияние особенностей объектов управления на свойства уравнений синтеза регуляторов многоконтурных систем управления. Установлено, что усложнение объектов управления особенностями - транспортным запаздыванием, распределенными в пространстве параметрами, неминимально-фазовыми свойствами, а также усложнение структуры самой системы управления, приводит к существенному ухудшению свойств уравнений синтеза регуляторов.

П. 2 «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик». В соответствии с п.2 специальности выполнен выбор критериев для оценивания вариантов синтезированных регуляторов.

П.3 «Разработка принципиально новых методов анализа и синтеза элементов и устройств вычислительной техники и систем управления с целью улучшения их технических характеристик». По п.3 специальности разработан метод параметрического синтеза многоконтурных системы управления, проведено исследование путей получения численных решений уравнений синтеза регуляторов, предложены способы повышения точности расчетов на основе улучшения обусловленности уравнения синтеза за счет регуляризации по Тихонову и на основе нелинейного программирования.

П.4 «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования

элементов и устройств вычислительной техники и систем управления». По п. 4 предложенные в работе способы и методы получения регуляризованных решений уравнений синтеза позволяют повысить робастность системы управления и надежность ее работы.

Практическая ценность результатов работы.

Практическая ценность работы заключается в разработке метода для решения задач синтеза регуляторов многоконтурных САУ, позволяющих выполнять расчет регуляторов с определением до четырех–шести неизвестных коэффициентов регуляторов различных контуров системы управления. Разработанные методы синтеза регуляторов позволяют повысить точность расчета САУ и, следовательно, повысить точность их работы и САУ в целом, а также их качество и робастность. Еще одно важное практическое применение результатов состоит в возможности использованием разработанных инструментов совместно с существующими методами синтеза САУ в рамках двухэтапной процедуры. На первом этапе известными методами получают решение, которое затем уточняется предложенным способом в отношении наиболее важных коэффициентов регуляторов.

Реализация результатов работы. Решения, приведенные в диссертации, были получены в результате проведения научно-исследовательских работ, основная часть которых выполнялась на базе Кибернетического центра при Национальном исследовательском Томском политехническом университете. Результаты работы использованы на кафедре систем управления и мехатроники ТПУ в разрабатываемой совместно с компанией «Fastech» (Республика Корея) системе настройки элементов и устройств систем управления одного класса электропривода, в учебном процессе при выполнении выпускных квалификационных работ и изучении студентами дисциплины «Компьютерное управление в мехатронике и робототехнике». Основная часть результатов передана в ООО «НПО ВЭСТ» для использования при проектировании систем теплоснабжения по моделям многоконтурных САУ.

Личный вклад автора. Все научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах, написанных и опубликованных в соавторстве, личный вклад состоит в следующем. В публикациях [1,5,7] автором определены способы решения задач синтеза регуляторов на основе вещественного интерполяционного метода с применением средств квадратичного программирования, выбраны методы исследования, получены и проанализированы основные результаты, а также даны рекомендации по улучшению синтеза за счет регуляризации. В работах [4,6,9] автором рассмотрены особенности синтеза регуляторов многоконтурных САУ на иллюстративных примерах, выполнены вычислительные эксперименты по определению влияния обусловленности задач синтеза многоконтурных САУ на качество решения. В публикациях [3,11] автору принадлежит постановка задачи, проведение вычислительных экспериментов по решению задач синтеза многоконтурных САУ методами нелинейного программирования и анализ результатов. В работах [8,10] автором представлены возможности методов регуляризации для синтеза регуляторов многоконтурных

САУ, выбраны методы регуляризации, предложены способы решения задач синтеза на основе этих методов, исследованы области сходимости.

Кроме того, автором самостоятельно постановлены задачи расчета параметров регуляторов системы управления температурой реактора синтеза высокотемпературного пластика, выполнены расчеты, обеспечившие получение заданных параметров, проведен анализ полученных результатов [2].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Численный метод синтеза САУ на основе вещественного интерполяционного метода при его распространении на системы с распространенными параметрами, с запаздыванием, а также на системы с большим числом неизвестных параметров в регуляторах сопровождается ухудшением условий решения уравнений синтеза из-за снижения обусловленности уравнения синтеза.

2. Усложнение структуры САУ за счет увеличения числа контуров приводит резкому ухудшению обусловленности уравнений синтеза, что вынуждает понижать размерность задач, т.е. уменьшать число искомым коэффициентов регуляторов.

3. Увеличения числа рассчитываемых коэффициентов регуляторов многоконтурных систем можно достичь регуляризацией уравнений синтеза. Это позволяет улучшить обусловленность уравнений и увеличить число устойчиво вычисляемых коэффициентов с достижением робастных свойств САУ по выбранным показателям качества.

4. Разработанный метод синтеза многоконтурных САУ на основе вещественного интерполяционного метода и нелинейного программирования обладает свойствами регуляризации, позволяя существенно увеличивать число искомым коэффициентов, а также вводить дополнительные ограничения на параметры системы.

5. Результаты расчета и математического моделирования системы автоматического управления температурой химического реактора, синтезирующего высокотемпературный пластик, показавшие возможность повышения точности работы системы управления реактора.

Апробация результатов работы. Результаты, представленные в работе, обсуждались на следующих конференциях и семинарах: XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». Томск, 2014 г.; International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 16-18 October, 2014, Tomsk; IV Русско-корейский научно-технический семинар. Томск, 2015; XII Международная научно-техническая конференция «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства». Ижевск, 2015 г.; The 28th International Conference on Systems Research, Informatics & Cybernetics, August 2nd, 2016 in Baden-Baden, Germany; Международная конференция «Когнитивная робототехника». Томск, 2016; Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016): International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation; V Всероссийская научно-практическая

конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника информатика в образовании, науке и производстве». Екатеринбург, 2016.

Публикация результатов работы. Основные результаты работы опубликованы в 11 печатных и электронных работах, из них 6 статей, 4 из которых в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus, две – в издании, рекомендованном ВАК РФ, 5 публикаций в материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 116 наименований. Общий объем диссертации составляет 159 страницы машинописного текста, из них 12 страниц списка литературы, 2 страницы – приложение. Основная часть диссертации иллюстрируется 27 рисунками и 18 таблицами.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, ставится цель, формируются задачи диссертационной работы, приводятся краткие комментарии к содержанию диссертации и сведения об апробации, публикациях и практическом использовании результатов проведенных научных исследований.

В первой главе рассматриваются особенности параметрического синтеза многоконтурных систем автоматического управления, структурная схема которых в общем виде представлена на рисунке 1.

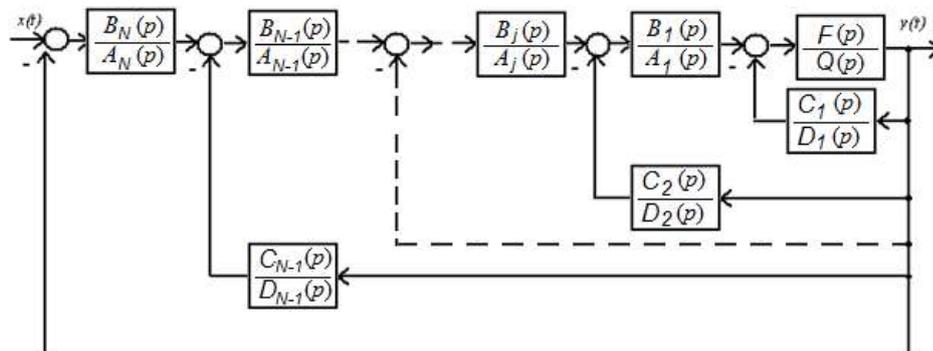


Рисунок 1 – Структурная схема многоконтурной САУ

Уравнение синтеза таких систем имеет вид

$$W_3^{\text{ж}}(p) = \frac{F(p) \cdot R[A_j(p), D_j(p)]}{S[A_j(p), D_j(p), F_j(p), Q_j(p)]}, j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где N – количество контуров синтезируемой САУ.

Для упрощения и конкретизации решения уравнения (1) задача ограничена трехконтурной системой, которая наиболее широко используется в системах повышенной точности. Однако даже в этой конфигурации САУ число неизвестных коэффициентов остается высоким, что не позволяет надеяться на их однозначное вычисление. С целью дополнительного упрощения задачи обратные связи выбраны жесткими. Структурная схема такой САУ показана на рисунке 2.

Регуляторы приняты в достаточно общей форме пропорционально-интегро-дифференциально структуры:

$$W_p(p) = K_P + K_D p + K_I \frac{1}{p} = \frac{K_D p^2 + K_P p + K_I}{p}.$$

Модели объектов управления представлены в виде передаточной функции:

$$W_O(p) = \frac{B_O(p)}{A_O(p)}.$$

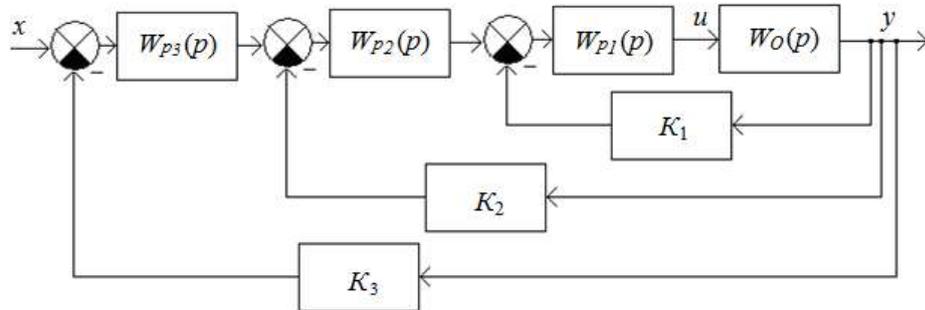


Рисунок 2 – Операторно-структурная схема трехконтурной САУ
Введенные обозначения приводят к развернутому уравнению синтеза:

$$\begin{aligned} W_3^*(p) \cong & \left\{ (K_{D3}p^2 + K_{P3}p + K_{I3}) \cdot (K_{D2}p^2 + K_{P2}p + K_{I2}) \times \right. \\ & \times (K_{D1}p^2 + K_{P1}p + K_{I1}) \cdot B_O(p) \} / \{ A_O \cdot p^3 + (K_{D1}p^2 + K_{P1}p + K_{I1}) \times \\ & \times B_O(p) \cdot K_1 \cdot p + (K_{D2}p^2 + K_{P2}p + K_{I2}) \cdot (K_{D1}p^2 + K_{P1}p + K_{I1}) \times \\ & \times B_O(p) \cdot K_2 + (K_{D3}p^2 + K_{P3}p + K_{I3}) \cdot (K_{D2}p^2 + K_{P2}p + K_{I2}) \times \\ & \times (K_{D1}p^2 + K_{P1}p + K_{I1}) \cdot B_O(p) \cdot K_3 \}. \end{aligned} \quad (2)$$

Видно, что уравнение является нелинейным. Это обстоятельство является главной особенностью задачи синтеза многоконтурных САУ.

Для решения подобных уравнений в большинстве случаев используется последовательный метод расчета регуляторов, как правило, направленный на поиск модального или симметричного оптимума. Несмотря на имеющиеся привлекательные свойства этого подхода – простота расчетов, возможность задания желаемые свойства каждого контура и др. – он не позволяет находить решения, оптимальные или близкие к ним в отношении всей САУ.

Известны подходы к синтезу многоконтурных САУ на основе частных случаев преобразования Лапласа $F(p) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt$. Их основное достоинство

– возможность расщепить уравнение синтеза (2) на систему уравнений в соответствии с числом неизвестных коэффициентов и привлечение численных методов их решения. Первый случай определен условием $\delta = 0$, при выполнении которого комплексная переменная p вырождается в мнимую: $p = j\omega$. Это

означает переход к преобразованию Фурье $F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$. Получаемые

модели вида $F(j\omega)$ обладают значительными возможностями и широко используются, объединенные общим термином «частотный метод». В то же время они имеют ограничения, которые создают определенные вычислительные

трудности. В частности, переход от уравнения (2) к системе уравнений связан с заменой моделей $F(j\omega)$ их дискретными представлениями $F(j\omega_i)$, $i=1,2,\dots,\eta$ путем выбора узлов дискретизации/интерполирования ω_i , $i=1,2,\dots,\eta$. В то же время известно, что для реализации вычислительных алгоритмов целесообразно обращение к функциям вещественной переменной ω , что требует получения формы $F(j\omega_i) = \text{Re } F(\omega_i) + \text{Im } F(\omega_i)$, $i=1,2,\dots,\eta$. Такой переход является вспомогательным по сути, но в то же время он оказывается объемным по вычислительным затратам, которые препятствуют широкому применению подхода, например, в самонастраивающихся системах, в задачах идентификации объектов управления и т.д.

Второй частный случай использует условие $\omega = 0$, когда комплексная переменная трансформируется в вещественную: $p = \delta + j\omega|_{\omega=0} = \delta$. Метод, известный как вещественный интерполяционный метод (ВИМ), приводит к функциям с вещественной переменной $F(\delta)$, $\delta \in [0, \infty]$ и их дискретному представлению $F(\delta_i)$, $\delta_i \in [0, \infty]$, $i=1,2,\dots,\eta$. В этом случае исключается вспомогательный этап выделения вещественной и мнимой частей, а преимущество вещественных моделей по числу операций на этапе предварительных преобразований оценивается более чем двукратным. Указанное преимущество послужило основанием для выбора этого метода для решения задач расчета многоконтурных САУ.

Во второй главе проведено исследование возможностей ВИМ при решении задач параметрического синтеза САУ различных классов, в том числе многоконтурных. За исходное уравнение синтеза САУ принято соотношение $W_3^{\text{ж}}(p) \cong W_3^c(p)$, в котором представлены передаточные функции желаемой $W_3^{\text{ж}}(p)$ и синтезированной $W_3^c(p)$ систем. Функции коррекции, включающие прямые корректирующие средства и обратные связи, входят в передаточную функцию $W_3^c(p)$, и потому она подлежат определению. Для решения задачи уравнение синтеза переводится в вещественную форму на основе ВИМ, что дает соотношение $W_3^{\text{ж}}(\delta) \cong W_3^c(\delta)$, $\delta \in [C, \infty]$, $C \geq 0$. Для выполнения численных расчетов по ВИМ необходимо перейти к дискретному варианту этого уравнения:

$$W_3^{\text{ж}}(\delta_i) \cong W_3^c(\delta_i), \delta_i \in [C, \infty], C \geq 0, i=1,2,\dots,\eta, \quad (3)$$

в нем дискретные функции $W(\delta_i)$, $i=1,2,\dots,\eta$ имеют смысл численных характеристик $\{W(\delta_i)\}$ соответствующей передаточной функции и динамической системы.

Несмотря на очевидные преимущества моделей в виде вещественных описаний, известны трудности их практического применения. Они вытекают прежде всего из известных особенностей некорректных задач, к которым относятся т.н. обратные задачи, в число которых входят задачи синтеза САУ. В численном варианте на основе ВИМ это проявляется в плохой обусловленности

уравнения синтеза. В частности, доказано^{1,2}, что две близкие функции $F_1(\delta)$ и $F_2(\delta)$ могут иметь сколь угодно сильно отличающиеся оригиналы $f_1(\delta)$ и $f_2(\delta)$.

По указанной причине рассматриваемый путь осложнен не только некорректностью задачи, но и нелинейным сочетанием искоемых коэффициентов. По этой причине в работе выполнены исследования обусловленности уравнений синтеза в зависимости от свойств объектов управления и классов САУ.

В качестве наиболее простого варианта, с которым сравниваются последующие, более сложные системы, сначала рассматривается САУ с минимально-фазовым объектом управления³, представленная на рисунке 2.

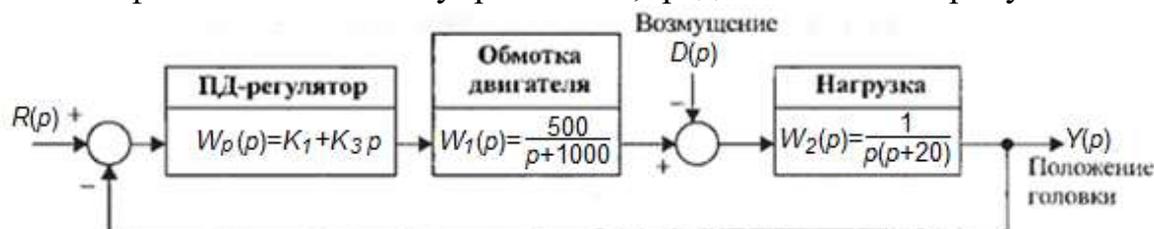


Рисунок 2 – Система управления положением считывающей головки с ПД-регулятором системы чтения информации с диска

Для этой САУ известно точное решение, которое позволяет провести сравнительный анализ синтезированной исследуемым методом известным результатом. Заданные показатели качества системы: перерегулирование σ_3 – менее 5%; время установления t_y – не более 250 мс. По этим данным составлено уравнение синтеза для разомкнутого состояния:

$$\frac{0,04p + 1}{3,307 \cdot 10^{-3} p^2 + 0,04p} \cong (K_1 + K_3 p) \cdot \frac{500}{p + 1000} \cdot \frac{1}{p(p + 20)}.$$

Численным методом получено решение, удовлетворяющие условиям задачи. Для определения основного результата задачи – обусловленности – используется число обусловленности по норме L2: $cond(A) = \|A\|_2 \cdot \|A^{-1}\|_2$,

$\|A\|_2 = \max_i \sqrt{\sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2}$. Искомое значение: $cond_2(A) = 13,605$. Оно показывает, что

уравнение достаточно хорошо обусловлено и численные расчеты при таком количестве неизвестных могут выполняться без заметных погрешностей.

Для проверки предположения о возможном ухудшении обусловленности уравнения при повышении порядка объекта управления и регулятора подобные же эксперименты выполнены для различных классов САУ. В первом из них

¹ Заикин П.Н. О численном решении обратной задачи операционного исчисления в действительной области// Журнал вычислительной математики и математической физики. №2, 1968. – С. 411-415.

² Вахитов Р.Ш. О применении операционного исчисления в действительной области// Автоматика и телемеханика, №11, 1991. – С. 24-32.

³ Дорф Р. Современные системы управления/ Р.Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002 – 832 с.;

объект системы управления кристаллизацией⁴ описывается передаточной функцией четвертого порядка, такой же порядок имеет регулятор. Исследуемый подход к синтезу САУ позволил получить решение, которое удовлетворяют заданию. Число обусловленности для этого случая: $cond2(A) = 8,819 \cdot 10^{20}$. Сравнение показывает резкое ухудшение обусловленности, что приводит к росту погрешности и проблемам в надежности вычислений. По крайней мере можно полагать, что для практических расчетов такой уровень обусловленности недостаточен.

Наиболее вероятная причина этого – применение регулятора повышенного порядка с увеличением числа неизвестных до девяти. Для проверки предположения степени полиномов регулятора были уменьшены на единицу каждая. Число обусловленности значительно возросло - до величины $cond2(A) = 4,311 \cdot 10^{10}$. Для уточнения и подтверждения результатов выполнены расчеты для варианта, в котором степени полиномов понижены еще на единицу. Результат для этого случая: $cond2(A) = 4,794 \cdot 10^5$. На основании этих расчетов можно сделать однозначный вывод: обусловленность уравнения явно зависит от числа искомых коэффициентов, она ухудшается с ростом количества неизвестных коэффициентов.

Следующий вариант усложнения задачи синтеза – рассмотрение класса неминимально-фазовых систем. Для исследования был выбран объект управления с передаточной функцией $W_O(p) = \frac{(p-1)}{(p+1)^2}$. В источнике, где рассмотрена задача синтеза системы управления таким объектом, приведены значения показателей качества, которым должна отвечать САУ. Получена система, удовлетворяющая этим требованиям, а число обусловленности этого случая: $cond2(A) = 13,605$. Очевидно, наличие неминимально-фазовой составляющей в модели объекта управления не оказывает решающего влияния на рассматриваемые свойства уравнения синтеза.

Последующие эксперименты связаны с рассмотрением систем управления с другими особенностями объекта управления или САУ в целом: объект управления имеет распределенные в пространстве параметры, транспортное запаздывание либо содержит два контура управления. Часть расчетов – числа обусловленности - приведены в таблице 1.

Таблица 1

№№ по п/п	Тип объекта управления	Число обусловленности $cond2(A)$
1.	Одноконтурная САУ с минимально-фазовым объектом управления второго порядка с регулятором первого порядка	13,605
2.	Одноконтурная САУ с неминимально-фазовым объектом управления с регулятором первого порядка	13,605

⁴Суздаль В.С., Епифанов Ю.М. Синтез регулятора пониженного порядка для управления кристаллизацией // Пробл. упр. и информатики. - 2012. - № 2. - С. 130-135

№№ по п/п	Тип объекта управления	Число обусловленности $\text{cond}_2(A)$
3.	Одноконтурная САУ с объектом управления с транспортным запаздыванием с регулятором первого порядка	254,82
4.	Одноконтурная САУ с объектом управления с распределенными параметрами с регулятором первого порядка	7170
5.	Одноконтурная САУ четвертого порядка с регулятором второго порядка	$4,794 \cdot 10^5$
6.	Двухконтурная САУ с двумя настраиваемыми параметрами в регуляторах	$1,532 \cdot 10^3$
7.	Двухконтурная САУ с шестью настраиваемыми параметрами в регуляторах	$4,2 \cdot 10^9$

По данным таблицы можно сделать несколько выводов:

1. Неминимально-фазовость объекта управления, возникающая за счет правых нулей его передаточной функции, не влияет на обусловленность уравнения синтеза.

2. Увеличение числа неизвестных коэффициентов, как и раньше, приводит к ухудшению обусловленности уравнения.

3. Переход к двухконтурной системе значительно ухудшает обусловленность уравнения. Можно дать приближенную оценку изменения, приняв за основу минимальную размерность задачи – два неизвестных коэффициента. При этом число обусловленности увеличивается примерно в пять раз. Эту величину можно принять как оценку снизу, так как повышение количества неизвестных приводит к нелинейному возрастанию числа обусловленности: в рассматриваемом варианте – примерно на порядок. Есть основания полагать, что такие изменения связаны с мультипликативностью определяемых коэффициентов. В более общем виде это заключение можно сформулировать как ухудшение обусловленности уравнения синтеза при усложнении структуры САУ за счет увеличения числа нелинейно входящих неизвестных коэффициентов.

4. Наличие трансцендентной составляющей в модели объекта управления также ухудшает обусловленность задачи. Такой же вывод можно спрогнозировать в отношении систем с распределенными параметрами, так как они имеют передаточные функции, которые содержат трансцендентные и иррациональные составляющие.

В проводимых исследованиях целевой является задача синтеза двухконтурной системы управления, так как она является, во-первых, наиболее сложной из рассматриваемых, и во-вторых, наиболее важной в практическом отношении и, наконец, она сводится к решению системы нелинейных уравнений, на котором встречаются препятствия, которые часто могут быть непреодолимыми. Поэтому дальнейшее рассмотрение задачи синтеза продолжается в направлении, позволяющем расширить возможности подхода.

С этой целью выбрана известная двухконтурная система управления токарным станком. Для нее составлено уравнение синтеза

$$W_p^{\text{ж}}(p) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot (p + 54) \cdot (p + 188) \cdot (p + 368) \cdot 4500}{p \cdot (p + 1085) \cdot (p + 60) \cdot (p + 108) + K_2 \cdot (p + 108) \cdot (p + 188) \cdot (p + 368) \cdot 4500}$$

с нелинейно входящими неизвестными коэффициентами K_1 и K_2 . Уравнение преобразовано в систему уравнений, которая решена методом Ньютона.

Полученное решение удовлетворяет требованиям задачи. Результаты показывают, что число обусловленности $\text{cond}2(A) = 1,532 \cdot 10^3$ возросло на два порядка по сравнению с одноконтурными структурами при том же числе неизвестных. Результаты, полученные при расширении эксперимента до шести неизвестных коэффициентов, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Количество неизвестных параметров, k	2	3	4	5	6
Число обусловленности, $\text{cond}2(A(k))$	$1,5 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^8$	$9,0 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^9$

Объяснение этих результатов состоит в том, что плохая обусловленность зависит от двух причин. Первая, которая уже была выявлена и подтверждена вычислительными экспериментами, – это увеличение числа неизвестных коэффициентов регулятора. Вторая объясняется формой взаимной связи неизвестных. Оказалось, что мультипликативная связь коэффициентов также приводит к ухудшению обусловленности соответствующих матриц уравнений синтеза, причем это влияние оказывается значительно более сильным.

Все это означает, что переход к расчету многоконтурных систем и, как следствие, получение в уравнении синтеза нелинейных связей коэффициентов, не только резко усугубляет условия решения задач синтеза, но приближает возможности метода к границе его практического применения. Анализ результатов позволил сделать и другие выводы.

1. Численный метод может быть использован для поиска двух неизвестных коэффициентов регуляторов многоконтурных систем, что является шагом вперед в отношении задачи синтеза регуляторов рассматриваемого класса систем.

2. Метод может быть полезен для уточнения значений коэффициентов, найденных другими методами. Этот вывод важен в практическом отношении, так как позволяет уточнять результаты синтеза САУ, полученные основным в настоящее время методом - путем последовательного синтеза контуров.

3. Для расширения числа неизвестных коэффициентов необходимо ослабить влияние некорректности задачи.

В третьей главе рассмотрены возможности улучшения метода параметрического синтеза многоконтурных САУ на основе ВИМ за счет регуляризации уравнения синтеза.

Некорректность задачи синтеза системы многоконтурной системы управления проявляется на этапе решения системы нелинейных уравнений, которое на основе метода Ньютона сводится к последовательности решения систем линейных алгебраических уравнений. Некорректность задачи связана с тем, что при малых значениях определителя матрицы Якоби задача не может быть

решена в силу появления операции деления на «ноль». Поэтому необходимо искусственно повысить значение определителя матрицы Якоби, что обеспечивает регуляризацию уравнения. В работе принята регуляризация по Тихонову. Для вычисления вектора невязок вместо уравнения $E = -R^{-1} \cdot F$ используется уравнение $E = -(R^T R + \lambda I)^{-1} \cdot (R^T F)$, где I – единичная матрица размерности $n \times n$, n – число неизвестных параметров, λ – параметр регуляризации. Для рассмотрения возможностей принятого пути исследована задача синтеза двухконтурной системы управления токарным станком.

Для получения условно корректной задачи поиск невязок преобразована в задачу минимизации. Выбор значения λ для рассматриваемой задачи осуществлен из соображений точности решения. Получена величина $\lambda = 10^{-6}$. Таким образом, рассматривается матрица вида

$$M(K_1, K_2) = R(K_1, K_2)^T R(K_1, K_2) + \lambda I, \quad (6)$$

где I – единичная матрица размерности 2×2 . Для рассматриваемого примера числа обусловленности для различного числа неизвестных параметров представлено в таблице 3.

Таблица 3

Количество неизвестных параметров, k	2	3	4	5	6
Число обусловленности, $\text{cond}_2(A(k))$	1,0	$8,5 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^5$	$8,7 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$

Попутно был получен еще один результат, который тоже оказался неожиданным. Он связан со сходимостью итерационной процедуры решения системы нелинейных уравнений методом Ньютона. Известно, что она часто не удовлетворяет условиям практических задач и это является его существенным ограничением. В данном случае регуляризация оказала благотворное влияние на эту сторону метода Ньютона – область сходимости в случае четырех неизвестных расширилась более чем в десять раз. Это означает, что использование регуляризации позволяет ослабить принципиальные трудности синтеза многоконтурных систем управления.

В четвертой главе рассматривается возможность повышения обусловленности уравнения синтеза регуляторов САУ за счет инструментов, не связанных с классическими методами регуляризации. Для поиска новых решений использован известный признак плохой обусловленности матриц – наличие в матрице элементов с очень большими и очень маленькими значениями. Отсюда следует предложение – нужно наложить ограничения на элементы матриц, входящих в уравнение синтеза. В общем случае это сложная и едва ли разрешимая задача, но можно выбрать частные случаи, оперирующие небольшим количеством элементов. В этом смысле представляют интерес ограничения, накладываемые на искомые переменные. С этой целью в работе рассмотрены возможности нелинейного программирования, которые позволяют это сделать.

Задачу синтеза в этом случае можно представить в виде совокупности нелинейной целевой функции $f(x)$ и линейных и нелинейных ограничений вида $c(x) < 0$, $seq(x) = 0$, где c – некоторая линейная функция, seq – нелинейная функция, x – искомые параметры. В диссертации рассмотрены два варианта - в пакет Excel с помощью надстройки Solver, а также функции `fmincon` пакета Optimization Toolbox среды Matlab. Для проверки их возможностей на численном примере использована система управления токарным станком, которая уже была привлечена к таким исследованиям в гл. 3. Минимизируемая функция задана в виде $f(x) = e_1^2 + e_2^2$, где e_1, e_2 – значения невязок уравнения синтеза. Поиск решения осуществлен итерационным способом – изменением значений узлов интерполирования с контролем значения минимизируемой функции.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

δ_1	δ_2	K_1	K_2	Значение минимизируемой функции	Время установления переходного процесса t_y , с	Перерегулирование σ , %
6000	10000	51,4179	54,9189	4,6166	0,181	0
6000	12000	514,7504	3,9434	0,0118	0,0358	0
6000	15000	1000	2,0	$4,0 \cdot 10^{-14}$	0,0205	0
6000	20000	996	2,0	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,0206	0

Из таблицы 4 видно, что вариант выбора узлов интерполирования, при котором достигнуто наименьшее значение минимизируемой функции, приводит к решению $\sigma = 0$ %, $t_y = 0,0205$ с, которое в наибольшей степени соответствует требованиям задачи. Для дальнейшей проверки количество неизвестных параметров было увеличено до четырех. Решения были получены, они приемлемы. Однако дальнейшее увеличение числа искомых коэффициентов привело к недопустимым вычислительным погрешностям из-за ухудшения обусловленности соответствующих матриц.

Был рассмотрен и второй вариант использования нелинейного программирования – в пакете Excel – и получено удовлетворительное решение для двух коэффициентов. Решение было получено также и при увеличении числа неизвестных до четырех. Но эта размерность, как и в предыдущем случае, оказалась предельной. В то же время по некоторым другим свойствам пакет Excel оказался предпочтительнее предыдущего.

По итогам проверки возможностей нелинейного программирования был сделан вывод о том, что его использование позволяет успешно решать задачи синтеза двухконтурных систем управления, если число неизвестных параметров не превышает четырех. Выявилось еще одно его положительное свойство – появляется возможность накладывать ограничения на переменные.

В пятой главе разработанный подход был использован для построения системы управления температурой водяной рубашки реактора, предназначенного для изготовления термостойкого пластика.

Технология создания такого пластика предусматривает получение исходного продукта в химическом реакторе, показанном на рисунке 3. Он состоит из двух ёмкостей, помещённых друг в друга. В первую из них загружаются исходные продукты для химической реакции, другая служит водяной рубашкой, которая используется для стабилизации температуры содержимого рабочей камеры. В рубашку поступают холодная и горячая вода, их поступление регулируется соответствующими устройствами.

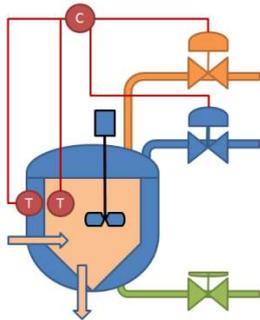


Рисунок 3 – Схема технологической установки

В работе рассмотрена основная часть задачи управления технологическим процессом – управление температурой в рабочей емкости. По регламенту температура содержимого в рабочей емкости должна быть равна 73°C. Отклонения от этого значения не должны превышать 7°C, так как даже кратковременное превышение может привести к затвердеванию смеси

изначительным потерям. Для решения задачи синтеза структурная схема САУ реактором представлена в виде системы, показанной на рисунке 4.

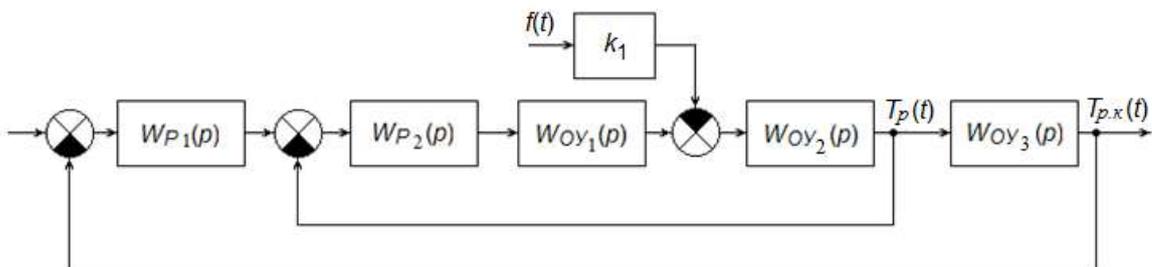


Рисунок 4 – Структурная схема двухконтурной системы автоматического управления химическим реактором

Получено уравнение синтеза этой системы:

$$\frac{1}{p} \left(W_3^{жс}(p) \right) / \left(\frac{5,9}{966p + 5,9} \cdot \frac{2474892p^2 + 16275p + 7,08}{6340673304p^3 + 59286422,16p^2 + 44516,736p + 8,496} \right) \times$$

$$\times \left(\left(K_3 + K_4 \frac{1}{p} \right) \frac{1423,5}{4,3p + 1} \left(K_1 + K_2 \frac{1}{p} \right) \right) + \frac{W_3^{жс}(p)}{\frac{5,9}{966p + 5,9} \cdot \left(K_1 + K_2 \frac{1}{p} \right)} + W_3^{жс}(p) - 1 =$$

$$= \frac{C \cdot k_1}{\left(K_3 + K_4 \frac{1}{p} \right) \cdot \frac{1423,5}{4,3p + 1} \cdot \left(K_1 + K_2 \frac{1}{p} \right)}$$

Решить уравнение, не прибегая к регуляризации, не удалось. Поэтому была использована регуляризация в сочетании с итерационным поиском решения. Полученный результат $t_y = 410,0$ с, $\sigma = 4,13\%$ удовлетворяет исходным требованиям. В то же время с целью поиска лучшего результата был привлечен метод нелинейного программирования. Поиск решения в среде Matlab привел к результату $t_y = 458,0$ с, $\sigma = 1,47\%$; в случае использования пакета Excel получены близкие результаты: $t_y = 458,0$ с, $\sigma = 1,52\%$. Эти решения соответствуют требованиям технологического процесса. Выбор будет сделан разработчиками с учетом других, сопутствующих условий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выдвинута и подтверждена гипотеза о влиянии особенностей объектов управления на обусловленность численной формы уравнения синтеза для классов САУ: неминимально-фазовых, с запаздыванием, с распределенными параметрами, многоконтурных. Результаты эксперимента подтвердили существование такой зависимости, что позволяет предвидеть предельные возможности метода в соответствии с особенностями объектов управления.

2. Выполнено исследование обусловленности матриц уравнения синтеза в зависимости от числа неизвестных коэффициентов регуляторов одноконтурной САУ, что позволяет определить допустимую сложность регулятора при использовании численного метода синтеза.

4. Разработан новый подход и два метода синтеза многоконтурных САУ, расширяющие возможности применяемого численного метода: на основе метода регуляризации Тихонова и метода нелинейного программирования. Это позволило практически вдвое увеличить размерность вектора определяемых коэффициентов регуляторов.

5. Разработан механизм решений, в наибольшей степени соответствующих предъявляемым к системе требованиям по качеству, что обеспечивает приближаться к наилучшим показателям.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК РФ

1. Воронин А.В., Щелканова Т.А. Применение квадратичного программирования при синтезе регуляторов вещественным интерполяционным методом // Известия ТПУ. – 2012. – №5. – С. 150-154.

2. Емельянова Т.А. Синтез двухконтурной системы управления химическим реактором численным методом с привлечением регуляризации / Емельянова Т.А., Гончаров В.И., Дементьев Ю.Н., Тутов И.А. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Том 20. – № 4. – С. 95-99.

Статьи, входящие в международную базу цитирования Scopus

3. Voronin A.V. Synthesis of multi-loop automatic control systems by the nonlinear programming method / A. V. Voronin, T. A. Emelyanova // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803: Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016): International Conference, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation: [proceedings]. –012179, 4 p.

4. Goncharov V.I. Design of multiple-loop automatic-control systems' regulators / Goncharov V.I., Rudnicki V.A., Emelyanova T.A. // Proceedings of The 28th International Conference on Systems Research, Informatics & Cybernetics. Analysis and Decision Making for Complex for Uncertain Systems. Volume IV – Baden-Baden, Germany. – 2016. – Pp. 5-9.

5. Goncharov, V.I.; Shchelkanova, T.A. The synthesis of multi-loop control systems [Electronic resource] // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): proceedings of the International Conference, Tomsk, 16-18 October, 2014 / National Research Tomsk Polytechnic University (TPU) ; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). — [S. l.]: IEEE, 2014. Доступ по договору с организацией-держателем ресурса. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1109/MEACS.2014.6986857>

6. Voronin, A.V. Synthesis of control system for an unstable object by real interpolation method [Electronic resource] / Voronin, A.V., Goncharov, V.I., Shchelkanova, T.A. // Advanced Materials Research [Electronic resource]: Scientific Journal. – 2014. – Vol. 905: Advances in Applied Materials and Electronics Engineering III. – P. 439-442. – Доступ по договору с организацией-держателем ресурса. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.905.439>

Статьи в других изданиях

7. Щелканова Т.А. Синтез многоконтурной системы управления электродвигателем // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», Томск, 12-14 ноября 2014 г. – Томск: Изд-во ТПУ. – Т. 1. - 431 с.

8. Emelyanova T. A. The need of regularization for the synthesis of multi-loop control systems / T. A. Emelyanova // Mechatronics: devices and control: proceedings of IV Russian-Korean scientific and technical seminar, 28-29 January 2015, Tomsk. — Томск: Изд-во ТПУ. – 2015. – С. 11-15.

9. Т.А. Емельянова, В.И. Гончаров. Повышение точности синтеза многоконтурных исполнительных систем роботов// Когнитивная робототехника: материалы Международной конференции, 7-10 Декабря 2016, Томск / Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ). — Томск: Изд-во ТГУ, 2016. – С. 87-93.

10. Емельянова Т.А., Гончаров В.И. Синтез многоконтурных систем автоматического управления с применением регуляризации // Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и

молодых учёных (ТИМ'2016) с международным участием. – Екатеринбург: УрФУ, 2016 - 304 с.

11. Emelyanova T.A. Non-linear programming in the synthesis of regulators [Electronic resource] / Emelyanova T.A., Voronin, A.V., Goncharov, V.I. // I International Forum “Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2015: Paper book of the International Forum IEET-2015. P. 68-63. – Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU. – 2016. – 208 p. – URL: <http://pribor21.istu.ru/proceedings/IEET-2015.pdf>.