

На правах рукописи



Михалевич Сергей Сергеевич

**ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПИД-
РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ, ИНТЕРВАЛЬНЫХ И
МНОГОСВЯЗНЫХ САУ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2015

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

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент,
Байдали Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Смагин Валерий Иванович**
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский
государственный университет», г. Томск,
профессор кафедры исследования операций

Дмитриев Вячеслав Михайлович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники», г. Томск, заведующий
кафедрой моделирования и системного
анализа

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
управления им. В. А. Трапезникова
Российской академии наук

Защита состоится «24» декабря 2015 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.269.14 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2, 10-й корпус, ауд. 332.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ расположенной по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/4060/worklist>.

Автореферат разослан «21» октября 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного
совета,



Жерин И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время теория автоматического управления охватывает широкий спектр задач, таких как структурный синтез систем автоматического управления, параметрический синтез регуляторов, идентификацию объектов управления, анализ качества и устойчивости систем.

Ввиду популяризации идеи оптимизации производств, в целях минимизации промышленных затрат и повышения производительности, очевидным направлением решения задач оптимизации является увеличение точности регулирования. В настоящее время существует ряд различных законов управления (основанные на законах нечеткой логики, моделей с предсказанием, классических законов управления и др.). Несмотря на высокое качество управления, современные методы в большинстве случаев, не находят широкого применения в производстве в виду сложности процесса настройки регуляторов, необходимости более тщательного изучения объектов управления, построения более точных математических моделей и производственных ограничений накладываемых на системы управления. Известно, что классические ПИ и ПИД-регуляторы составляют более 90 % всех промышленных регуляторов. По сравнению с другими типами регуляторов, ПИД-регуляторы обладают более широкими возможностями для настройки систем с большим транспортным запаздыванием, что характерно для производств атомной и химической промышленности в целом. На основании этого одним из актуальных направлений теории автоматического управления является параметрический синтез типовых ПИД-регуляторов.

С конца 40х годов прошлого века уделяется значительное внимание решению вопроса о поиске «золотой середины» между скоростью и точностью регулирования, а так же запасами устойчивости системы автоматического управления (САУ). Первые работы, посвященные разработке методов определения параметров настройки ПИД-регуляторов, в частности метод Циглера-Никольса, были основаны на некоторых универсальных правилах. В настоящее время такие методы получили широкую популярность при первоначальной настройке регуляторов, благодаря простоте и низким требованиям к точности идентификации обобщенного объекта управления. Но, несмотря на видимые преимущества данных методов, получаемые с их помощью переходные процессы в САУ, не являются оптимальными с точки зрения типовых прямых и косвенных показателей качества.

В действительности, задача параметрического синтеза ПИД-регуляторов не имеет единственного решения в силу требований, предъявляемых к конкретному производству. Так, например, для большого числа обобщенных объектов управления характерно проявление нелинейных свойств, обусловленных изменениями окружающих условий, действиями

возмущений, технологическими факторами, погрешностью измерений и т.д. Наличие нелинейности объектов управления затрудняет применение линейных законов управления. Задача описания нелинейного объекта управления может быть решена путем задания интервальных коэффициентов передаточной функции. В связи с этим синтезируемая система должна не только обеспечивать устойчивость во всем диапазоне варьирования параметров объекта управления, но и обеспечивать соответствие САУ технологическому регламенту.

Зачастую объект управления имеет несколько входных и выходных величин, оказывающих влияние друг на друга. Решению проблем управления такими объектами посвящено значительное количество как отечественных (наибольшее количество работ представлено Институтом проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук), так и зарубежных работ, в большинстве из которых, предлагается нахождение собственных законов управления для каждого объекта. Ввиду того, что количество САУ на одном производстве может достигать нескольких тысяч, такой подход нецелесообразен, поэтому в последние десятилетия появились работы, предполагающие использование типовых законов управления для объектов с несколькими входными и выходными параметрами.

В связи с этим, в современной теории автоматического управления определился ряд научных направлений для поиска параметров настройки ПИД-регуляторов. Целью которых является обеспечение заданных показателей качества и/или устойчивости САУ, в том числе с использованием оптимизационных подходов, поиск параметров ПИД-регуляторов для интервальных объектов управления и параметрический синтез типовых регуляторов для многосвязных САУ.

Диссертационные исследования были выполнены в рамках хоздоговора с ОАО «Высокотехнологическим научно-исследовательским институтом неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» по теме: «Разработка кода оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП)», а также поддержаны грантом на выполнение НИР с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках конкурса «Участник молодежного научно-технического конкурса» («УМНИК») по теме: «Создание программного обеспечения для разработки и моделирования систем управления».

Диссертационная работа посвящена анализу типовых установок химических производств как объектов управления, наиболее распространенных методов настройки ПИД-регуляторов, разработке частотного критерия для обеспечения минимального значения перерегулирования в системе и созданию на его основе методики параметрического синтеза ПИД-регулятора в стационарных САУ химическими установками [1, 2], обеспечивающего в системе заданный запас устойчивости по фазе и позволяющего изменять вид переходного процесса за счет изменения частоты среза. В работе предложен способ нахождения оптимального значения запаса устойчивости по фазе и частоты среза для

САУ с интервальными параметрами. Представленная в работе методика адаптирована для объектов с множеством входов/выходов (многосвязных объектов).

Целью работы является определение параметров настройки ПИД-регулятора для обеспечения минимального перерегулирования и времени регулирования в системе автоматического управления химическими установками.

Для достижения поставленной цели были решены **задачи**, а именно:

- проведен анализ типовых установок химических производств как технологических объектов управления;
- разработан частотный критерий, обеспечивающий минимальное значение перерегулирования в САУ для заданного запаса устойчивости по фазе на выбранной частоте среза;
- разработана методика настройки ПИД-регулятора для стационарной САУ химическими установками;
- определён оптимальный диапазон значений величин отношения постоянной времени обобщенного объекта управления к его запаздыванию;
- разработана методика поиска оптимальных значений (с точки зрения функции чувствительности и интегрального показателя качества) частоты среза и запаса устойчивости по фазе.
- разработана методика настройки ПИД-регуляторов для многосвязных САУ химическими установками.

Методология и методы исследования. Для достижения сформулированной цели и решения поставленных задач в работе использованы методы теории автоматического управления и численной оптимизации. Для экспериментальных исследований анализируемых и синтезируемых систем, а также моделей систем управления было использовано собственное, разработанное в ходе диссертационной работы, программное обеспечение, а также программное обеспечение в среде MATLAB.

Научная новизна. Диссертационная работа посвящена разработке методик настройки ПИД-регуляторов для стационарных, интервальных и многосвязных САУ, на основе частотного анализа. При этом получены следующие новые научные результаты:

- частотный критерий, выполнение которого обеспечивает минимальное значение перерегулирования в одноконтурной системе;
- методика параметрического синтеза ПИД-регулятора для стационарной САУ химическими установками, позволяющая обеспечить заданный запас устойчивости по фазе и предоставляющая возможность изменять скорость переходных процессов за счет изменения частоты среза;
- функционал, обеспечивающий нахождение оптимальных значений запаса устойчивости по фазе и частоту среза для САУ с интервальными параметрами;

– методика параметрического синтеза ПИД-регуляторов для многосвязных САУ химическими установками.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанные методики параметрического синтеза ПИД-регулятора могут быть использованы для получения настроек регуляторов в стационарных, интервальных и многосвязных САУ, обеспечивающих заданный запас устойчивости в системе. За счет изменения частоты среза инженер-проектировщик может добиться желаемых временных показателей качества. Разработанные методики синтеза ПИД-регуляторов реализованы в собственно разработанном программном обеспечении, предназначенном для структурного и параметрического синтеза САУ, а также в среде MATLAB.

Предлагаемые методики синтеза ПИД-регулятора в стационарных, интервальных и многосвязных САУ могут быть рекомендованы для применения научно-исследовательскими и проектными институтами, наладочными организациями.

Внедрение работы. Разработанные методики параметрического синтеза ПИД-регулятора встроены в успешно используемое в настоящее время программное средство [3, 4] для расчета значений параметров регуляторов в САУ технологических процессов в ООО «НПП Кавитон», г. Томск. Помимо этого, программное средство было использовано организацией ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» для параметрического синтеза САУ блоком центробежных экстракторов. Результаты исследований и разработок, представленных в диссертационной работе, использованы в учебном процессе кафедры «Электроники и автоматики физических установок (ЭАФУ)» Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Практическое применение результатов диссертационных исследований подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту:

– анализ типовых установок химических производств как технологических объектов управления, результатом которого является заключение о возможности описания объектов химических производств, как линейными моделями, так и линейными моделями с интервальными параметрами;

– критерий минимального значения перерегулирования в САУ, обеспечивающей заданный запас устойчивости по фазе на выбранной частоте среза;

– методика параметрического синтеза ПИД-регулятора для стационарной САУ химическими установками, на основе задания желаемых значений частоты среза и запаса устойчивости в системе;

- функционал, обеспечивающий поиск оптимальных (с точки зрения функции чувствительности и интегрального показателя качества) значений частоты среза и запаса устойчивости по фазе в интервальных системах;
- методика расчета параметров настройки ПИД-регуляторов для многосвязных САУ химическими установками.

Достоверность результатов подтверждается корректностью исходных математических положений и обоснованностью принятых допущений, а также успешным внедрением в учебный, научный и технологический процессы.

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

- VII Международная конференция «Автоматизированные информационные и управляющие системы 2012: от А до Я», г. Москва, 2012;
- XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2013;
- VIII Международная конференция «Автоматизированные информационные и управляющие системы 2012: от А до Я», г. Москва, 2013;
- Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки и образования», г. Тамбов, 2013;
- XII International Conference on Chemical & Process Engineering (ICheaP12), г. Милан, Италия, 2015.

По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, в том числе 10 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, одна статья в зарубежном журнале и одна в зарубежном высокорейтинговом журнале.

Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в общей постановке задач, в проведении аналитического обзора по теме диссертации, разработке и исследовании критериев и методов настройки ПИД регуляторов в стационарных, интервальных и многосвязных САУ, проведении экспериментальных исследований, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов, написании статей, докладов, формулировании научных положений, выносимых на защиту, и выводов. Личный вклад автора диссертации в получение результатов приведенных исследований и разработок составляет не менее 60 %.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Начало первой главы посвящено описанию работы нескольких типовых установок химической промышленности. Проведен анализ аппаратов и лабораторных стендов как объектов управления. Согласно проведенному анализу и литературному обзору, был сделан вывод о том, что переходные процессы, полученные на математических моделях объектов химической промышленности, составленных на основе электрохимической и диффузионной кинетики, массообмена и других физико-химических законов,

могут быть аппроксимированы, с достаточной для синтеза САУ точностью, передаточными функциями не выше третьего порядка с запаздыванием и интервально заданными параметрами.

Следующая часть главы посвящена критериям оценки качества управления и оценке запасов устойчивости системы, а также существующим методам настройки ПИД-регуляторов. Выявлены достоинства и недостатки существующих подходов к параметрическому синтезу ПИД-регуляторов.

Рассмотрены основные подходы к анализу САУ:

- по переходным характеристикам;
- по частотным характеристикам;
- по расположению нулей и полюсов передаточной функции замкнутой системы управления;
- по интегральным показателям.

Результатом анализа существующих характеристик САУ стал вывод о том, что частотные характеристики позволяют одновременно оценить устойчивость САУ и косвенно характеризовать качество переходных процессов. Они применимы для систем, содержащих запаздывание.

Помимо этого в первой главе рассмотрены наиболее распространенные методы синтеза параметров ПИД-регулятора:

- графические методы;
- аналитические методы;
- методы, основанные на правилах;
- оптимизационные методы.

Результатом литературного обзора стал вывод о том, что аналитические методы настройки ПИД-регуляторов не требуют построения сложных поверхностей и кривых для поиска параметров регуляторов [5], позволяют охватить широкий класс объектов управления. Но в настоящее время отсутствуют методы, позволяющие задавать требуемую устойчивость и скорость переходных процессов в системе.

Сделан вывод о необходимости разработки нового аналитического метода, обеспечивающего требуемые показатели качества и устойчивости в САУ, имеющего простое аналитическое решение, которое обеспечит широкое распространение в промышленности и охватит широкий класс объектов управления.

В качестве показателя устойчивости был выбран запас устойчивости по фазе, а в качестве показателя скорости переходных процессов в системе – частота среза.

Во второй главе приведена постановка задачи параметрического синтеза ПИД-регулятора. Структурная схема рассматриваемой в данном разделе системы показана на рисунке 1.

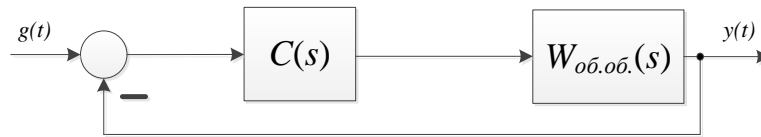


Рисунок 1 – Структурная схема рассматриваемой САУ: $C(s)$ – передаточная функция ПИД-регулятора; $W_{об.об.}(s)$ – передаточная функция обобщенного объекта управления

Входными данными для расчета параметров настройки регулятора являются передаточная функция обобщенного объекта управления (представляющая собой совокупность объекта управления, регулирующего органа, исполнительного механизма, датчика и т.д.), желаемый запас устойчивости по фазе в синтезируемой системе и частота среза. Таким образом, будет обеспечена возможность задания и коррекции одного из показателей устойчивости САУ, а также возможность изменения скорости реакции системы за счет изменения частоты среза.

Существует известная методика нахождения параметров настройки ПИД-регулятора при заданной передаточной функции обобщенного объекта, запаса устойчивости по фазе и частоты среза. Но она не применима для настройки ПИД-регулятора, ввиду наличия трех неизвестных и всего двух уравнений, которые напрямую следуют из определения запаса устойчивости по фазе. Поэтому встала необходимость в разработке дополнительного критерия [1].

Для решения этой задачи, был использован критерий оптимального модуля, который гласит, что САУ не имеет перерегулирования или оно минимально в том случае, когда амплитудно-частотная характеристика замкнутой САУ не имеет резонансного пика, а полоса пропускания системы при этом имеет максимальное значение. Метод настройки ПИД-регуляторов, снованный на данном критерии нашел широкое применение в промышленности за счет обеспечения в проектируемых системах малого значения перерегулирования и максимального быстродействия. Математически данные критерий можно представить в виде:

$$\frac{d^k}{d\omega^k} \left[\left| \frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)} \right| \right]_{\omega=0} = 0, \quad (1)$$

где $G(j\omega)$ – частотная передаточная функция разомкнутой САУ, $k=1, 2, \dots$.

Если представить частотную передаточную функцию разомкнутой системы в виде суммы действительной и мнимой частей:

$$G(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega), \quad (2)$$

и подставить ее в выражение (1), дополнив определением запаса устойчивости на частоте среза, то можно показать что критерий (1) может быть приведен к виду:

$$\frac{d \operatorname{Re}[G(j\omega)]}{d\omega_c} = 0. \quad (3)$$

Таким образом, согласно критерию оптимального модуля, для того, чтобы амплитудно-частотная характеристика замкнутой САУ не возрастала с увеличением частоты от нуля до частоты пропускания системы, необходимо, чтобы выполнялось условие (3).

Для получения аналитических зависимостей параметров настройки ПИД-регулятора как функций от параметров обобщенного объекта, запаса устойчивости по фазе и частоты среза представим обобщенный объект управления в виде:

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \Big|_{s=j\omega} = \frac{N_e(\omega) + j\omega N_o(\omega)}{D_e(\omega) + j\omega D_o(\omega)}. \quad (4)$$

где $N_e(\omega)$ и $D_e(\omega)$ – действительные части полиномов числителя и знаменателя передаточной функции; $N_o(\omega)$ и $D_o(\omega)$ – мнимые части полиномов числителя и знаменателя передаточной функции обобщенного объекта управления.

Частотная передаточная функция ПИД-регулятора выглядит следующим образом:

$$C(j\omega) = \left(K_1 + \frac{K_2}{j\omega} + K_3 \cdot j\omega \right). \quad (5)$$

Согласно определению, АФЧХ разомкнутой САУ на частоте среза ω_c проходит через точку $e^{j(-180^\circ + \varphi_m)}$, где φ_m – запас по фазе. Иначе говоря,

$$C(j\omega_c)P(j\omega_c) = e^{j(-180^\circ + \varphi_m)}. \quad (6)$$

Если аргумент функции $C(j\omega_c)$ обозначить через Θ , то согласно (6):

$$\Theta = \arg C(j\omega_c) = -180^\circ + \varphi_m - \arg P(j\omega_c). \quad (7)$$

Из (5) и (6) имеем:

$$K_1 + j \left(K_3 \omega_c - \frac{K_2}{\omega_c} \right) = |C(j\omega_c)| (\cos \Theta + j \sin \Theta), \quad (8)$$

где

$$|C(j\omega_c)| = \frac{1}{|P(j\omega_c)|}. \quad (9)$$

Таким образом, зная частоту среза и желаемый запас устойчивости по фазе, приравнявая действительные и мнимые части слева и справа от знака равенства, можно получить систему из двух уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} G(j\omega_c) &= -\cos(\varphi_m), \\ \operatorname{Im} G(j\omega_c) &= -\sin(\varphi_m), \end{aligned} \quad (10)$$

где $G(j\omega_c)$ – передаточная функция разомкнутой САУ на частоте среза.

Применяя критерий минимального перерегулирования в САУ (3) можно записать окончательный вид системы уравнений:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} G(j\omega_c) &= -\cos(\varphi_m), \\ \operatorname{Im} G(j\omega_c) &= -\sin(\varphi_m), \\ \frac{d \operatorname{Re}[G(j\omega_c)]}{d\omega_c} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Решением системы (11) являются аналитические зависимости параметров настройки ПИД-регулятора как функции параметров обобщенного объекта, запаса устойчивости по фазе и частоты среза [1].

В случае наличия запаздывания в обобщенном объекте управления, звено запаздывания рекомендуется разложить в ряд Паде, а затем представить полную передаточную функцию обобщенного объекта управления в виде (4). Решения системы уравнений (11) при этом остаются прежними.

Результатом вышеприведенного является методика настройки ПИД-регулятора на основе задания частоты среза и запаса устойчивости по фазе, состоящая из следующих этапов:

1. Задать исходные данные: запас устойчивости по фазе, частоту среза, передаточную функцию обобщенного объекта управления.
2. Представить передаточную функцию обобщенного объекта управления в виде уравнения (4).
3. Вычислить параметры настройки регулятора, полученные путем решения системы уравнений (11).
4. Проверить полученные результаты.

Для подтверждения работоспособности методики были проведены сравнительные исследования для различных объектов управления с запаздыванием. Результатом сравнительных исследований явился вывод о том, что регулятор, настроенный по предлагаемой методике обладает малым значением функции чувствительности M_s (см. формулы (12), (13)), что свидетельствует о более высокой степени устойчивости, чем смогли обеспечить другие методы настройки ПИД-регуляторов [1]. По показателям качества переходных процессов предложенная методика не уступает методу оптимального модуля, обеспечивает в системе малое перерегулирование, время регулирования и колебательность [2].

$$M_s = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1 + G_l(j\omega)} \right|, \quad (12)$$

$$s_m = \frac{1}{M_s}. \quad (13)$$

Предложенная в работе методика была распространена на настройку ПИД-регулятора для интервальных объектов управления [6], где передаточная функция обобщенного объекта управления представлена следующим образом:

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{\sum_{i=0}^k n_i s^i}{\sum_{j=0}^l d_j s^j}, \quad (14)$$

где $\underline{n}_i \leq n_i \leq \bar{n}_i$, $\underline{d}_j \leq d_j \leq \bar{d}_j$; \underline{n}_i и \underline{d}_j – минимальные значения коэффициентов n_i и d_j , а \bar{n}_i и \bar{d}_j – максимальные значения коэффициентов n_i и d_j , соответственно; l и k – степени полиномов $N(s)$ и $D(s)$

Для расчета оптимальных значений частоты среза и запаса устойчивости по фазе в интервальных системах был разработан функционал:

$$V[\varphi_m, \omega_c] = -\min(s_m^i) + \frac{\max(IAE_i)}{IAE_0} \rightarrow \min, \quad (15)$$

где $\max(IAE_i)$ – максимальное значение интегрального показателя качества от модуля сигнала рассогласования (IAE) при вариации параметров обобщенного объекта управления, $i = 1 \dots 3^n$; $\min(s_m^i)$ – минимальное значение функции чувствительности.

Функционал (15) позволяет отыскивать такие значения запаса устойчивости по фазе и частоту среза, которые бы обеспечивали минимальность области в координатах T_s (время регулирования) – σ (перерегулирование).

В качестве примера была рассмотрена функция объекта управления (таблица 1). Для данного объекта были рассчитаны параметры настройки ПИД-регулятора различными способами и проведен сравнительный анализ. Переходные характеристики САУ, настроенных различными методами представлены на рисунке 2, области устойчивости в координатах T_s – σ приведены на рисунке 3.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики систем

Обобщенный объект управления	Метод	K_1	K_2	K_3	Запас по фазе, °	Частота среза ω_c , рад/с	M_s
$\frac{1}{(s+1)(s^2+s+5)} e^{-2s}$	Предлагаемый способ	1,72	1,1	0,6	69,15	0,22	1,5
	SIMC	2,84	1,4	1,35	69,05	0,3	1,9
	Метод оптимального модуля	2,64	1,607	1,09	60,01	0,335	1,9
	AMIGO	1,68	1,07	1,06	70,42	0,213	1,4

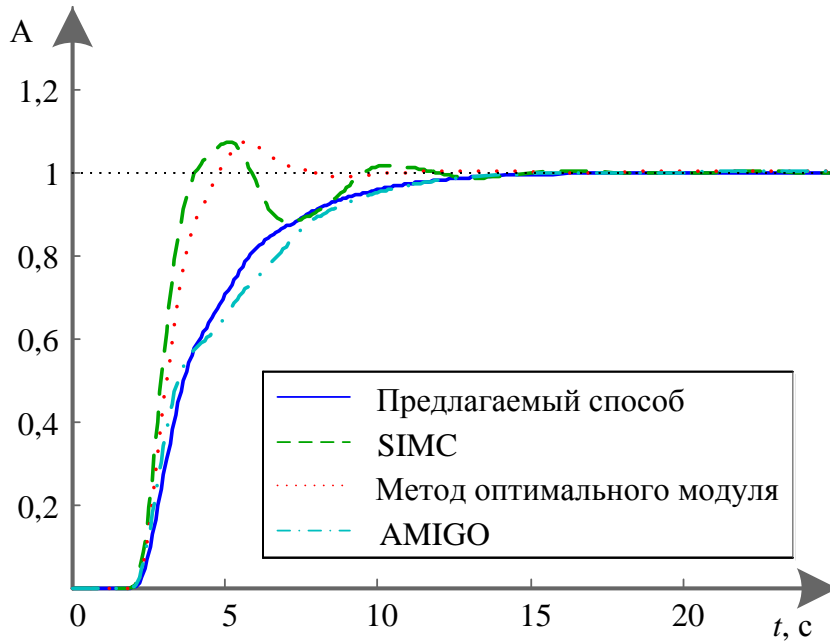


Рисунок 2 – Переходные характеристики САУ при номинальных параметрах объекта управления

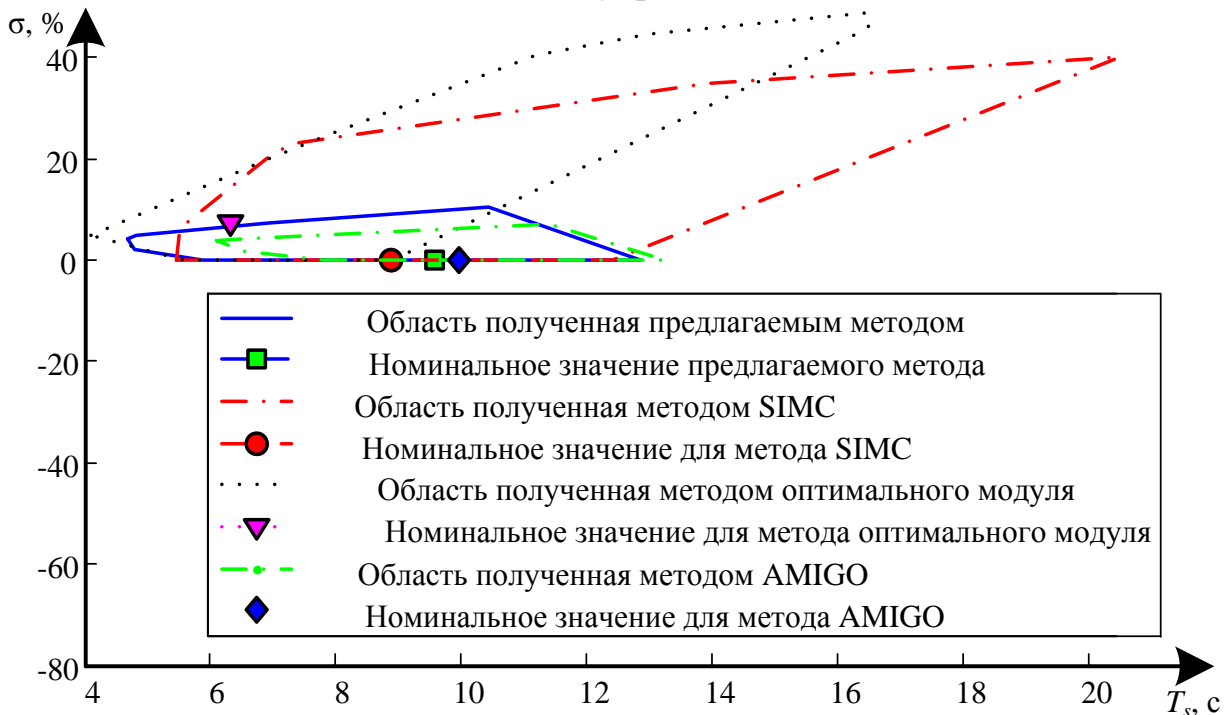


Рисунок 3 – Оценка показателей качества САУ, настроенных различными методами

Как видно из переходных характеристик системы (рисунок 2), предлагаемая методика, как и метод AMIGO, более консервативны, чем методы оптимального модуля и метод SIMC. Но это обстоятельство компенсируется меньшей областью изменения показателей качества. Таким образом, при сравнительно малом проигрыше в показателях качества при номинальных параметрах объекта управления достигается значительное преимущество в случае изменения параметров объекта управления в заданном интервале.

К сожалению, полученный функционал не может быть использован для систем управления, не содержащих запаздывание [6]. Это объясняется тем, что, минимальным значением первого слагаемого является значение равно -1 , которое возможно лишь в случае, когда АФЧХ разомкнутой САУ является прямой вертикальной линией совпадающей с осью ординат, а второе слагаемое принимает наименьшее значение при частоте среза системы стремящейся к бесконечности в положительном направлении. Естественно, полученные таким образом параметры настройки ПИД-регулятора не смогут обеспечить желаемые показатели качества и устойчивости, так как даже небольшое возмущение приведет к неустойчивости системы, ввиду усиления этого возмущения контуром обратной связи.

Таким образом, разработанный подход к параметрическому синтезу ПИД-регуляторов для интервальных объектов управления может быть представлен в виде следующей методики:

1. Задать исходные данные в виде: начального запаса устойчивости по фазе φ_m и начальной частоты среза ω_c , передаточной функции обобщенного объекта управления $P(s)$. В качестве начальных значений рекомендуется брать максимально возможный запас устойчивости по фазе (90°) и наименьшую частоту среза;

2. Представить передаточную функцию обобщенного объекта управления в виде уравнения (4);

3. Вычислить параметры настройки ПИД-регулятора, полученные путем решения системы уравнений (11);

4. Произвести моделирование и найти значения s_{m0} , а также значение интегрального критерия от модуля сигнала рассогласования IAE ;

5. Произвести моделирование САУ при всех возможных комбинациях значений полиномов числителя и знаменателя передаточной функции обобщенного объекта управления;

6. Найти минимальное значение параметра s_m и максимальное значение интегрального критерия IAE ;

7. Рассчитать значение функционала (15);

8. Используя один из известных методов поиска минимального значения, найти минимум функционала (15), частоту среза ω_c и запас устойчивости по фазе φ_m , доставляющие минимум функционалу;

9. Рассчитать параметры настройки ПИД-регулятора в заданной системе, предлагаемой методикой, согласно пунктам 2, 3;

10. Произвести моделирование САУ и построение области в координатах «время регулирования – перерегулирование». Оценить работоспособность и качество синтезируемой системы.

В третьей главе ставится задача синтеза ПИД-регуляторов для многоканальных объектов управления. При этом, считается что объект управления представляет собой квадратную матрицу передаточных функций, имеющий вид:

$$H(s) = \begin{pmatrix} H_{11}(s) & \dots & H_{1n}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1}(s) & \dots & H_{mn}(s) \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где n – порядок объекта управления.

В общем случае, регулятор также представляет собой матрицу размерности $n \times n$. На практике, регулятор зачастую реализуется на контроллерах, которые уже содержат микропрограммы, реализующие ПИД закон. Поэтому целесообразно рассмотреть именно такой тип регулятора.

Таким образом, регулятор представляет собой многоканальный ПИД-регулятор, который может быть описан диагональной матрицей передаточных функций вида:

$$R(s) = \begin{pmatrix} R_{11}(s) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & R_{nn}(s) \end{pmatrix}. \quad (17)$$

В теории управления многосвязными объектами для настройки таких регуляторов широкое применение нашел подход, основанный на представлении многоканального объекта в виде совокупности одноканальных и последующей независимой настройки регуляторов для одноканальных объектов управления [7].

В свою очередь для применения такого подхода в современной литературе широкое применение нашли два варианта реализации: с помощью введения компенсирующих устройств и на основе определения «эффективных передаточных функций» каждого канала управления [7].

Рассмотрим метод синтеза компенсирующего устройства для двухканальной САУ.

Пусть объект управления размерностью 2×2 представлен в виде (16) и матрица $H(0)$ не является особой.

Для начала введем статический компенсатор:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Для того, чтобы произведение матрицы объекта управления и статического компенсатора было единичным (единичной матрицей) необходимо выбрать:

$$D = H^{-1}(0) = \frac{1}{\det H(0)} \begin{pmatrix} h_{22}(0) & -h_{12}(0) \\ -h_{21}(0) & h_{11}(0) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Таким образом, произведение $H(0)D$ – есть единичная матрица, которая свидетельствует о том, что в статическом режиме влияние каналов друг на друга отсутствует и, оно мало для низких частот. Малость влияния каналов друг на друга на низких частотах означает, что многосвязная САУ, синтезированная на основе статических компенсирующих устройств, будет обладать малой шириной полосы частот каждого контура управления.

Тогда матрица передаточных функций объекта управления с учетом компенсатора на малых частотах примет вид:

$$Q(s) = H(s)D, \quad (20)$$

где

$$q_{11}(s) = \frac{h_{11}(s)h_{22}(0) - h_{12}(s)h_{21}(0)}{\det H(0)}, \quad q_{12}(s) = \frac{h_{12}(s)h_{11}(0) - h_{12}(s)h_{11}(0)}{\det H(0)},$$

$$q_{21}(s) = \frac{h_{21}(s)h_{22}(0) - h_{21}(s)h_{22}(0)}{\det H(0)}, \quad q_{22}(s) = \frac{h_{22}(s)h_{11}(0) - h_{21}(s)h_{12}(0)}{\det H(0)}.$$

Метод «эффективных передаточных функций» (*EOTF*) основан на определении динамического массива относительных коэффициентов усиления (*DRGA*). Матрица передаточных функций *DRGA* имеет вид:

$$DRGA = H(s) * H(s)^{-T}. \quad (21)$$

Эффективная передаточная функция разомкнутого контура имеет вид:

$$g_{ii}^{eff} = \frac{h_{ii}(s)}{DRGA_{ii}}. \quad (22)$$

Для выбора наиболее точного метода представления многоканального объекта управления совокупностью одноканальных объектов был проведен сравнительный эксперимент на модели 24-тарельчатого колонного аппарата разделения смеси метанола и воды.

Из проведенного эксперимента был сделан вывод о том, что наиболее точно многоканальный объект описывается при помощи эффективной передаточной функции. Поэтому для дальнейшего применения методов настройки ПИД-регуляторов для одноконтурных систем был выбран данный способ. Дополнительно следует указать, что использование компенсирующих устройств ведет к усложнению схемы (ввиду наличия вспомогательного оборудования для реализации компенсационного устройства).

В диссертационной работе показана возможность применения разработанной методики для синтеза многосвязных САУ на примерах моделей двух ректификационных колонн по разделению метанола и воды: 24-тарельчатый колонный аппарат и 8-тарельчатый колонный аппарат разделения смеси метанола и воды.

Сравнительный анализ методов показывает, что предлагаемая методика обеспечивает меньшую колебательность и перерегулирование в системе, чем метод *SIMC*, при сравнимом времени регулирования во всех каналах управления [7].

Из недостатков методики стоит отметить отсутствие обеспечения автономности каналов управления, что может привести к неустойчивости многосвязной САУ, в то время как системы управления с эффективными передаточными функциями каждого из каналов управления устойчивы. Таким образом, при использовании метода *EOTF* и предлагаемой методики настройки ПИД-регулятора в многосвязных САУ всегда необходимо

проверять полученные параметры на многосвязной модели объекта управления.

Результатом третьей главы является разработка методики настройки ПИД-регуляторов для многоканальных объектов управления, которая может быть представлена следующим образом:

1. Задать исходные данные: запас устойчивости по фазе и начальную частоту среза для каждого управляемого канала, матрицу передаточных функций обобщенного объекта управления;

2. Найти динамический массив относительных коэффициентов усиления по формуле (21);

3. Рассчитать эффективные передаточные функции разомкнутого контура по каждому из управляемых каналов по формуле (22);

4. Представить передаточную функцию каждого из каналов объекта управления в виде уравнения (4). В случае наличия звеньев запаздывания в эффективных передаточных функциях каналов управления их необходимо представить в виде ряда Паде;

5. Вычислить параметры настройки регулятора, полученные путем решения системы уравнений (11).

6. Произвести моделирование и оценить качество регулирования в системе.

В случае недостаточной скорости переходного процесса в каком-либо канале необходимо увеличить частоту среза и повторить пункты 2–6. Если увеличение частоты среза ведет к неустойчивости многосвязной САУ, то необходимо увеличить запас по фазе в настраиваемом канале.

В четвертой главе рассмотрены вопросы теоретической и практической реализации алгоритмов параметрического синтеза ПИД-регулятора в стационарных (САУ уровнем воды в баке) и интервальных САУ (САУ блоком центробежных экстракторов и САУ температурой ТЭНа) на основе задания запаса устойчивости по фазе и частоты среза, выбираемых путем поиска минимального значения функционала (15).

Для реализации вычислений, связанных с проведением компьютерного моделирования реакции объектов управления, их идентификации, параметрического синтеза ПИД-регуляторов, компьютерного моделирования САУ, определения показателей качества и устойчивости было разработано собственное программное средство [8–10]. Для представления звеньев САУ в программном средстве был использован аппарат пространства состояний, а также алгоритмы, приведенные в работах [10–14].

Описаны структурные схемы САУ блоком центробежных экстракторов (математическая модель экстракционного процесса представлена в работе [15]), САУ температурой ТЭНа, САУ уровнем воды в баке. Представлены статические характеристики объектов управления и произведена их идентификация методом Орманса. Получены оптимальные значения запаса устойчивости по фазе и частоте среза, рассчитаны параметры настройки ПИД-регуляторов в рассматриваемых САУ.

Проведен сравнительный анализ различных методов настройки ПИД-регуляторов для САУ блоком центробежных экстракторов при использовании динамической модели (см. рисунок 4). Концентрации урана на графиках даны в процентах от шкалы датчика.

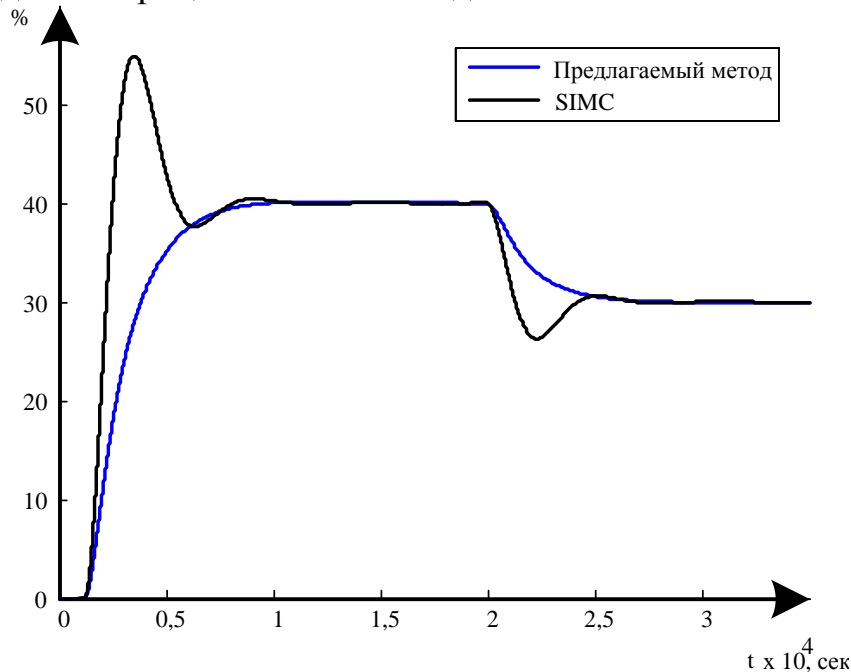


Рисунок 4 – Переходная характеристика по урану от момента пуска установки до выхода на уставку в 40 % и с последующим ступенчатым изменением до 35 % по концентрации урана

Результатом параметрического синтеза регулятора является обеспечение минимального перерегулирования в переходных процессах по управляющему воздействию.

Были проведены экспериментальные исследования реакции САУ температурой ТЭНа и уровнем воды в баке (см. рисунки 5, 6).

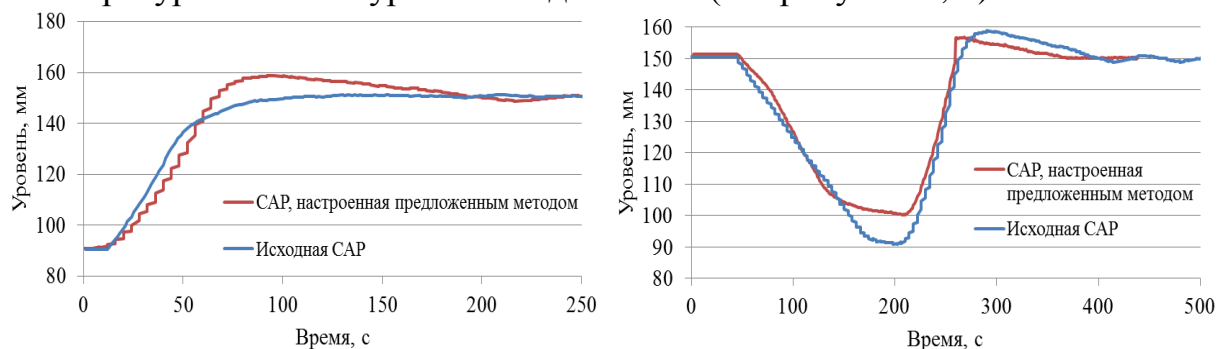


Рисунок 5 – Переходные процессы системы по управляющему и возмущающему воздействиям САУ уровнем воды в баке

Полученные параметры настройки ПИД-регуляторов обеспечили устойчивые переходные процессы, как по управляющему так и по возмущающему воздействиям. САУ с ПИД-регуляторами, настроенными по предлагаемым методикам обеспечили переходные процессы в САУ с минимальным перерегулированием и малым временем регулирования. Таким

образом, предлагаемые в данной работе методики могут быть использованы на производствах химической и атомной промышленности.

Результаты экспериментов показали эффективность и практическую значимость приведенных методик и проведенных исследований.

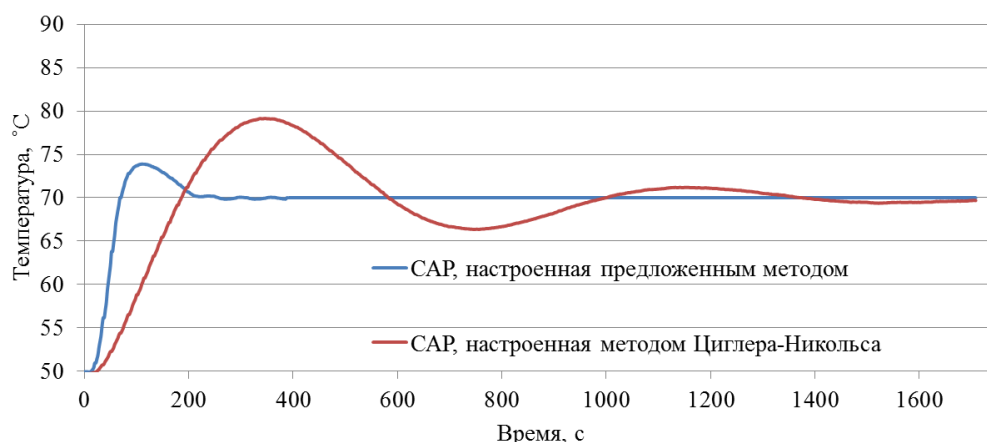


Рисунок 6 – Переходные процессы по управляющему воздействию САУ температурой ТЭНа

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе представлены результаты исследований, направленных на разработку методик параметрического синтеза ПИД-регуляторов для стационарных, интервальных и многосвязных САУ установками химических производств, на основе известных требований устойчивости и представленного модифицированного частотного критерия оптимального модуля, гарантирующего отсутствие или минимальное значение перерегулирования в переходном процессе при заданных параметрах. Основные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан новый частотный критерий на основе критерия оптимального модуля, связывающий АФЧХ разомкнутой системы и АЧХ замкнутого контура.

2. На основе общепризнанного показателя устойчивости системы – запаса устойчивости по фазе и предложенного частотного критерия была разработана методика параметрического синтеза ПИД-регулятора. Параметрами для настройки регулятора выступает запас устойчивости по фазе и частота среза (косвенно характеризующая скорость переходных процессов в системе).

3. Проведены теоретические исследования, доказывающие работоспособность предлагаемой методики настройки ПИД-регулятора. Выполнено сравнение переходных процессов в САУ, настроенных известными методами.

4. Для теоретического исследования устойчивости синтезируемых с помощью разработанной методики систем было предложено использовать критерий Гурвица. Получены требования устойчивости в аналитическом

виде для объектов управления с постоянной времени большей чем запаздывания в два и более раз.

5. Предложен функционал, позволяющий найти оптимальные параметры запаса устойчивости по фазе и частоту среза для интервальных систем. На основе разработанной методики и предложенного функционала разработана методика параметрического синтеза ПИД-регулятора для интервальных систем. Проведенный сравнительный анализ предложенной методики с известными методами показал свою состоятельность и высокое качество настройки.

6. Проведен сравнительный анализ двух методов аппроксимации многоканального объекта управления совокупностью одноканальных объектов. Результатом анализа является выбор метода «эффективной передаточной функции», на основе которого предложена методика параметрического синтеза ПИД-регуляторов для многосвязных систем. Достоинством данной методики является отсутствие процедуры аппроксимации сложной передаточной функции звеньями низкого порядка.

7. Разработано программное обеспечение для структурного и параметрического синтеза САУ, позволяющее использовать предложенные методики настройки ПИД-регуляторов. Факт его использования в промышленности подтвержден соответствующими актами внедрения.

8. Разработанные методики были применены для настройки модели САУ блоком центробежных экстракторов.

Проведены испытания на натурном стенде «САУ температурой ТЭНа» кафедры Электроники и автоматики физических установок Физико-технического института Томского политехнического университета и лабораторном стенде «САУ уровнем воды в баке» в ООО «НПП Кавитон», а также были использованы АО «ВНИИНМ» при выполнении работ по выполнению хозяйственных работ по проектному направлению «ПРОРЫВ». Предлагаемые методики внедрены в учебный процесс в составе разработанного программного обеспечения, что подтверждается соответствующим актом.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Mikhalevich, S.S. Development of a tunable method for PID controllers to achieve the desired phase margin [Text] / S.S. Mikhalevich, S.A. Baydali, F. Manenti // Journal of Process Control. – 2015. – Vol. 25. – P. 28-34.

2. Mikhalevich, S.S. Robust PI/PID Controller Design for the Reliable Control of Plug Flow Reactor [Text] / S.S. Mikhalevich, S.A. Baydali, F. Rossi, F. Manenti // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – Vol. 43. – P. 1525-1530.

3. Михалевич, С.С. Разработка пакета настройки систем автоматизированного управления [Текст] / Ю.А. Чурсин, С.С. Михалевич, С.А. Байдали // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 5. – С. 312–315.

4. Михалевич, С.С. Разработка программы для структурного и параметрического синтеза систем автоматического управления [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали, Ю.А. Чурсин // Современные техника и технологии: Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-19 апреля 2013 г., г. Томск. В 3 т. – 2013. – Т.2. – С. 295-296.

5. Михалевич, С.С. Графический метод расчета параметров настройки регуляторов, приводящих систему к заданным показателям устойчивости [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали, Ю.А. Чурсин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. – № 9 – С. 34-38.

6. Михалевич, С.С. Настройка ПИД-регуляторов в интервальных системах управления [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали / Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – №. 6. – С. 255-258.

7. Михалевич, С.С. Методика параметрического синтеза ПИД-регуляторов в многосвязных системах [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – №. 6. – С. 251-254.

8. Михалевич, С.С. Разработка программы по представлению звеньев систем управления в пространстве состояний [Текст] / П.В. Сиделёв, С.С. Михалевич // «Перспективы развития науки и образования»: Сб. науч. тр. по материалам международной научно-практической конференции, 30 мая 2013 г. г. Тамбов. – 2013. – № 120. – С. 122.

9. Mikhalevich, S.S. The development of program links presentation of operating system in the state space [Text] / P.V. Sidelev, S.S. Mikhalevich // Современные техника и технологии: Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-19 апреля 2013 г., г. Томск. В 3 т. – 2013. – Т.2. – С. 453-454.

10. Михалевич, С.С. Моделирование систем автоматического управления методом пространства состояний [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали, Ю.А. Чурсин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – №. 8. – С. 23-28.

11. Михалевич, С.С. Алгоритм моделирования систем автоматического управления методом пространства состояний [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали, В.А. Чучалин, В.А. Москалев // Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 233-237.

12. Михалевич, С.С. Выбор последовательности расчета звеньев при моделировании систем автоматического управления [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали, Ю.А. Чурсин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – №. 5. – С. 263-266.

13. Михалевич, С.С. Расчет сложной передаточной функции обобщенного объекта [Текст] / С.С. Михалевич, С.А. Байдали, Ю.А. Чурсин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2013. – №. 9. – С. 46-51.

14. Михалевич, С.С. Идентификация и расчет алгебраических контуров в динамических системах [Текст] / Ю.А. Чурсин, С.С. Михалевич // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – №. 5. – С. 336-339.

15. Михалевич, С.С. Синтез системы автоматического управления каскадом по переработке урановых концентратов [Текст] / А.Г. Горюнов, С.С. Михалевич, Ю.А. Чурсин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 9 – 6–11 с.