

ОБ ОДНОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ОТОПЛЕНИЕМ ЗДАНИЙ

С.В. Панферов, В.И. Панферов

ABOUT ONE AUTOMATIC CONTROLLER SYNTHESIS PROBLEM SOLUTION IN AUTOMATIC ADAPTIVE CONTROL HEATING SYSTEMS

S.V. Panferov, V.I. Panferov

Рассматривается проблема выбора и настройки автоматических регуляторов отдельных контуров адаптивной системы управления температурным режимом отапливаемых зданий. Динамические свойства регулируемых каналов представлены типовыми передаточными функциями. Исследованы устойчивость и качество переходных процессов в системах, сконструированных методом эталонной передаточной функции. Рассматриваются вариации как параметров настройки регуляторов, так и параметров объектов управления.

Ключевые слова: устойчивость, качество переходных процессов, система автоматического регулирования, эталонная передаточная функция, адаптивное управление, температурный режим.

The article covers the selection and adjustment of automatic controllers of individual circuits at adaptive thermal management systems of the heated buildings. The dynamic properties of the controlled channels are presented by typical transfer functions. Sustainability and quality of transient processes in the systems, which were designed using the reference transfer function method, have been analyzed. The paper covers the settings of automatic controllers and the parameters of subjects to management.

Keywords: sustainability, quality of transient processes, automatic control system, reference transfer function, adaptive control, temperature control.

Введение. Энергосбережение в жилищно-коммунальной сфере – это одна из первоочередных проблем настоящего времени, требующих незамедлительного решения. Даже относительно небольшой успех в решении этой задачи в силу масштабности энергозатрат приводит к ощутимым эффектам в абсолютном выражении. При этом следует заметить, что наибольшая экономия тепловой энергии в системах отопления зданий достигается за счет их автоматизации. Объясняется это тем, что автоматическое управление позволяет экономить теплоту за счет учета (как правило, опосредованного) тех факторов, учет которых проектно-расчетными методами либо невозможен, либо достаточно проблематичен:

- 1) влияния солнечной радиации;
- 2) тепловыделений от оборудования и людей;
- 3) избыточной мощности системы отопления при данной температуре наружного воздуха;
- 4) оперативного учета колебаний температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра и других возмущений со стороны наружной среды;
- 5) хаотичности режима работы систем вентиляции и т. п.

Таким образом, разработка высококачественных систем автоматизации отопительных установок является актуальной задачей настоящего времени.

Общая структура адаптивной системы управления. Одним из наиболее эффективных

Панферов Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Южно-Уральский государственный университет; tgsiv@mail.ru

Панферов Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, Южно-Уральский государственный университет; tgsiv@mail.ru

Panferov Sergei Vladimirovich – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, South Ural State University; tgsiv@mail.ru

Panferov Vladimir Ivanovich – Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, South Ural State University; tgsiv@mail.ru

способов решения данной проблемы является построение адаптивных систем управления тепловым режимом отапливаемых зданий, программное обеспечение которых учитывает как реальные теплозащитные свойства зданий, так и действительные теплотехнические характеристики их отопительных установок.

При этом следует иметь в виду, что наиболее разумным принципом управления тепловым режимом зданий является комбинированный принцип, когда в структуру системы управления вводится канал компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха и одновременно при этом в системе используется сигнал обратной связи о температуре воздуха внутри так называемых представительных помещений (в представительных точках) здания [1].

Известно, что эффективность применения принципа компенсации во многом зависит от точности модели, отражающей влияние возмущения на выходную величину объекта управления, т. е. от характеристик канала «температура наружного воздуха – регулируемая температура». Также хорошо известно, что эти характеристики заметно меняются, например, из-за старения здания и его системы отопления, при накоплении влаги в ограждающих конструкциях и т. п. Поэтому вполне понятно, что для построения высококачественной системы управления необходимо своевременно отслеживать изменение этих характеристик, т. е. решать задачу идентификации модели канала. Вместе с тем заметим, что за счет обратной связи в рассматриваемой системе управления будут обрабатываться такие возмущения теплового режима, как теплопоступления от людей, от работающего оборудования, за счет солнечной радиации, увеличение потерь теплоты из-за ветра, а также все погрешности реализации канала компенсации основного возмущения – температуры наружного воздуха, однако известно, что быстродействие контура обратной связи заметно ниже, чем канала компенсации [2].

Подчеркнем также, что в настоящее время на практике обычно применяются системы управления, осуществляющие только компенсацию основного возмущения – температуры наружного воздуха, это так называемые погодные регуляторы температуры (погодные компенсаторы). Обратная связь по температуре внутреннего воздуха, как правило, не реализуется, во многом это обуславливается некоторыми проблемами, связанными с измерением данной величины. Вопросы, связанные с адаптацией модели канала компенсации к изменяющимся характеристикам зданий и их систем отопления, достаточно детально разработаны и апробированы в [3].

Задача выбора и настройки регуляторов.

Следует отметить, что для качественной реализации указанных разработок необходимо оптимизировать еще и переходные процессы в отдельных контурах автоматического регулирования, в частности, нужно как можно лучше решить проблему

динамической инвариантности (квазиинвариантности) системы относительно основного возмущения [4]. В связи с этим задача качественного построения автоматизированной системы управления (АСУ) тепловым режимом зданий предполагает также решение вопросов выбора и настройки автоматических регуляторов, задействованных в различных контурах системы. Несмотря на солидный «возраст» этой проблемы, в ее решении еще имеются достаточно «темные» моменты и требующие дальнейшего развития вопросы. Эта проблема имеет как общетехнический характер, так и специальный для автоматизации теплоснабжающих систем (см., напр.: [5]). Для подтверждения актуальности и значимости этой проблемы и для настоящего времени укажем, что вопросы выбора и настройки автоматических регуляторов рассматривались и рассматриваются в следующем достаточно представительном (и, конечно же, неполном) списке работ [6–35]. Предлагаются и анализируются различные способы структурно-параметрического синтеза систем автоматического регулирования (САР), значительная часть работ посвящена настройке ПИД-регуляторов, их модификациям [36, 37] и вопросам их реализации [38, 39]. Так, по данным работы [36], в 2000 г. только на одном семинаре IFAC (International Federation of Automatic Control) «...было представлено около 90 докладов, посвященных ПИД-регуляторам». Обсуждается и обоснованность применения ПИД-регуляторов, в частности, утверждается, что П-, PI- и PID-алгоритмы «...были получены чисто эвристическим путем» [40, с. 82] и что «...достаточно убедительное формальное доказательство целесообразности их применения... до сих пор получить не удалось» [40, с. 24]. Актуальной считается проблема адаптации настроек автоматических регуляторов технологических процессов [41], что совсем не значимо для САР с объектами типа сервомеханизмов.

Утверждается, что «...правильно спроектированная, реализованная и налаженная САР на базе ПИД-регулирования может успешно решать 99 % существующих на предприятиях проблем непрерывного управления технологическими объектами» [42, 43], что «...около 90–95 % регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм» [36], что «...ПИД-регуляторы... являются, по существу, единственными регуляторами, используемыми на практике в системах автоматического управления технологическими процессами» [25]. При этом отмечается, что «...вопреки распространенному представлению, ПИД-регуляторы являются далеко не простыми в настройке» [25].

При этом при решении задачи синтеза САР промышленные объекты управления, в том числе и объекты теплоснабжения, обычно представляют с помощью следующих типовых передаточных функций:

$$\frac{1}{T_{06}p} \exp(-\tau_{06}p), \frac{k_{06}}{T_{06}p+1} \exp(-\tau_{06}p),$$

$$\frac{k_{06}}{a_2p^2 + a_1p + 1} \exp(-\tau_{06}p),$$

где $k_{06}, T_{06}, \tau_{06}$ – соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания объекта; a_1, a_2 – коэффициенты дифференциального уравнения объекта; p – комплексная переменная.

Заметим, что если по «физике» технологического процесса его передаточная функция имеет несколько иной вид, то используют различные способы приведения математического описания к указанным передаточным функциям, так, например, по данным проф. А.М. Шубладзе, передаточная функция $W(p) = \frac{k}{(Tp+1)^n}$ при $n \rightarrow \infty$ превращается в звено $\frac{k}{(Tp+1)} \times \exp(-\tau p)$. В работе [44]

утверждается, что данный эффект имеет место уже при $n=8 \div 10$, а в работе [45] рекомендуется такую замену производить в том случае, если объект управления описывается последовательным соединением двух инерционных звеньев 1-го порядка с существенно различными постоянными времени. На наш взгляд, все это является проявлением того, что называется термином «емкостное запаздывание». К сожалению, параметры указанных передаточных функций в большинстве случаев до сих пор определяют по экспериментальным кривым разгона графоаналитическими методами, имеющими достаточно низкую точность оценки [14, 40, 45, 46]. При этом хорошо разработанные и эффективные методы современной теории идентификации [47] в инженерной практике почти не используются.

В учебной литературе по-прежнему базовое место занимает графо-аналитический метод расчета настроек ПИД-регуляторов промышленных объектов, детально разработанный в свое время В.Я. Ротачем [40]. Качество переходных процессов здесь оценивается линейным интегральным критерием, который вообще-то пригоден только для монотонных и знакопостоянных процессов. Это главный недостаток метода, который пытаются компенсировать введением ограничений на запас устойчивости САР. Утверждается, что это гарантирует достаточно интенсивное затухание переходного процесса, что «...ограничение на запас устойчивости делает процессы регулирования слабоколебательными, площадь под их графиками может быть достаточно точно оценена линейным интегральным критерием» [41]. Тем не менее это все-таки не исключает его колебательный характер, поэтому линейный интегральный критерий по-прежнему будет оценивать его качество достаточно приближенно. На наш взгляд, распростра-

ненность метода обуславливается тем, что задача нахождения минимума линейного интегрального критерия по параметрам настройки регулятора из ПИД-семейства до конца решается аналитически и получаемые ответы хорошо известны. Если же использовать модульный или квадратичный интегральные критерии качества переходных процессов, то введение указанного ограничения на запас устойчивости в подавляющем большинстве случаев будет достаточно излишним. Исключения, по видимому, составляют случаи, когда требуется предельно высокая точность идентификации математической модели объекта управления (например, случаи применения регуляторов Ресвика и Смита). Получение ограниченных значений таких критериев уже само по себе является свидетельством устойчивости САР, а их минимизация только увеличивает его запас. Однако, несмотря на это, существует мнение, что ограничение на запас устойчивости все-таки «...должно быть выведено из подынтегральной функции и задано явно» [48].

Вместе с тем отметим, что в этой методике рекомендации по выбору типа регулятора, как правило, не однозначны, отчетливых разъяснений, почему в данном случае (на данном объекте управления) следует применять именно этот регулятор, обычно нет. Понятно, что все это значительно усложняет задачу синтеза системы.

Известны также решения задачи синтеза САР, представленные в формульном виде для настроек регуляторов (см.: [49]), обеспечивающих три типа переходных процессов на типовых объектах управления. Однако и здесь нет однозначности и отчетливости рекомендаций, не ясно, как были получены указанные формулы для настроек, остается только предполагать, что это было сделано путем обобщения результатов моделирования и натуральных экспериментов.

В работе [50, с. 164] утверждается, что «...процесс синтеза... регулятора не следует формализовать до конца», так как существуют «...дополнительные, часто почти не поддающиеся формализации требования», необходимо обеспечить определенную грубость, робастность сконструированных систем. Вместе с тем, безусловно, необходимо стремиться к увеличению степени формализации процедуры синтеза САР настолько, насколько это возможно.

Отметим также и то, что процедура настройки регуляторов остается еще секретом некоторых фирм, работающих в данной области [42], поскольку (пр процитируем еще раз) «...ПИД-регуляторы являются далеко не простыми в настройке» [25]. Об актуальности и значимости этой проблемы свидетельствуют, например, и данные компании Honeywell, которая провела обследование 100 000 контуров регулирования на 350 предприятиях, принадлежащих различным отраслям промышленности, согласно этим данным 49–63 % САР работают с плохими настройками [51].

В литературе, в том числе и по теплоснабжению, рассматриваются вопросы применения фаззи-регуляторов в системах автоматизации технологических процессов [52 и др.]. Привлекательность этой идеи основана на том, что объекты, трудно поддающиеся математическому описанию, довольно часто успешно управляются человеком-оператором, который, вообще говоря, формулирует (и, конечно, реализует) свои действия достаточно не четко. Обсуждая перспективность применения таких регуляторов, ограничимся цитированием только того, что высказал на этот счет проф. В.Я. Ротач: «...фаззи-регуляторы... являются обычными четкими регуляторами. Поскольку квантование только ухудшает качество управления, то... следует считать снятым вопрос о преимуществах таких регуляторов перед традиционными четкими непрерывными регуляторами» [52]; фаззи-регуляторы являются «...обычными неизвестно зачем усложненными детерминированными регуляторами» [25].

Солидное количество недостатков отмечается и у регуляторов, построенных с помощью нейронной сети [37], поэтому не следует ожидать их широкого применения для управления технологическими процессами в ближайшем будущем.

В настоящее время интенсивно разрабатываются процедуры синтеза регуляторов методами H_∞ -теории [53, 54].

Известен также метод обратной задачи динамики для синтеза систем управления [55].

Таким образом, все вышеизложенное свидетельствует о заметной незавершенности, о том, что необходимо найти ясные и недвусмысленные ответы на еще многие вопросы, казалось бы, уже решенной проблемы выбора и настройки автоматических регуляторов.

Причем в случае успешного решения поставленных задач размер выигрыша в части энергосбережения будет достаточно весомым, так как в настоящее время индивидуальные тепловые пункты (ИТП) зданий, как правило, не автоматизированы, некая автоматика имеется только на центральных тепловых пунктах (ЦТП) и на источниках теплоты (ТЭЦ, котельные), ориентирована она на управление группой зданий и поэтому в принципе не может достаточно удовлетворительно решить поставленные задачи. Только АСУ, учитывающая конкретные характеристики конкретных зданий и их систем отопления и непрерывно отслеживающая их изменение, а также содержащая в своем составе оптимально сконструированные локальные контуры автоматического регулирования отдельных переменных процесса теплоснабжения, способна определить именно то количество теплоты, которое фактически необходимо для поддержания требуемого температурного режима в здании.

Предлагаемые решения. В работе [56], как нам представляется, удалось получить некоторое формальное обоснование целесообразности при-

менения ПИД-регуляторов, здесь задача решалась методом выбора передаточной функции замкнутой системы в виде $W_{зс}(p) = \frac{1}{\theta p + 1} \exp(-\tau_{об} p)$, где θ –

некоторая постоянная времени, а параметр $\tau_{об}$ приравнивался ко времени запаздывания объекта управления. В результате применения данного подхода получили, что для объектов первого типа передаточная функция квазиоптимального регулятора будет равна $W_p(p) = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$, т. е. близким к

идеальному является П-регулятор с коэффициентом передачи $k_p = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$. Для объекта второго

типа квазиоптимальным будет ПИ-регулятор, его передаточная функция будет иметь вид

$W_p(p) = \frac{T_{об}}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)} [1 + \frac{1}{T_{об} p}]$. Передаточная функция регулятора для объекта третьего типа будет

такой $W_p(p) = \frac{a_1}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)} [1 + \frac{1}{a_1 p} + \frac{a_2}{a_1} p]$, т. е. целесообразно применение ПИД-регулятора.

При выборе эталонной передаточной функции замкнутой системы руководствовались следующими соображениями. Очевидно, что идеальной передаточной функцией замкнутой системы по задающему воздействию является передаточная функция вида $W_{зс}(p) = 1$ [57]. В этом случае САР абсолютно точно обрабатывает задание, а также полностью исключает влияние возмущений на процесс управления [57]. Однако, как это достаточно хорошо известно научной общественности, добиться такой передаточной функции совершенно невозможно. Поэтому есть смысл попытаться за счет выбора регулятора получить такую передаточную функцию замкнутой системы, которая в определенной мере будет близка к идеальной. Нетрудно видеть, что при малом значении параметра θ следующие передаточные функции близки к 1:

$\frac{1}{\theta p + 1}$, $e^{-\theta p}$, причем при $\theta \rightarrow 0$ предел этих пе-

редаточных функций будет точно равен 1. Кроме

того, $\frac{1}{\theta p + 1} \approx e^{-\theta p}$, т. е. данные передаточные

функции приближенно равноценны. Отметим также, что, по данным работы [58], система с передаточной функцией $\frac{1}{\theta p + 1}$ является оптимальной по

робастности и точности. В этой работе приводятся следующие значимые для рассматриваемой проблемы данные: «...чем ближе к отрицательной вещественной полуоси располагаются корни характеристического уравнения системы... тем большую робастность имеет система»; «...если все полюсы системы находятся на отрицательной ве-

щественной полуоси, то она...обладает... наиболее высоким потенциалом по робастности», «...из множества чисто инерционных систем наиболее структурно-робастным является простейшее инерционное звено первого порядка». Впрочем, аналогичные сведения имеются и в других источниках.

Кроме того, дополнительным обоснованием для выбора данной передаточной функции в качестве эталона являются следующие соображения.

Известно [55], что достаточно рациональным (вполне предпочтительным) является следующий критерий качества переходных процессов в САР:

$$I = \int_0^{\infty} [\varepsilon^2 + \alpha^2 (\frac{d\varepsilon}{dt})^2] dt, \quad (1)$$

где $\varepsilon(t) = x^3(t) - x(t)$ – ошибка регулирования (рас-согласование); $x^3(t)$ и $x(t)$ – соответственно заданное и действительное значение регулируемой величины; t – время; α^2 – некоторый весовой коэффициент.

Известно также [55], что оптимальным по минимуму этого критерия переходным процессом является экспоненциальный процесс, т. е. процесс вида

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(0) \exp(-t/\alpha), \quad (2)$$

где $\varepsilon(0)$ – значение ошибки регулирования при $t=0$.

Если при этом считать, что такой переходный процесс должен иметь место при отработке САР единичного ступенчатого задания $x^3(t) = 1(t)$, то в этом случае $\varepsilon(0) = 1$ и выходной сигнал САР будет иметь вид

$$x(t) = 1 - \exp(-t/\alpha). \quad (3)$$

В связи с этим Лапласово изображение выходной величины запишется так:

$$L\{x(t)\} = X(p) = \frac{1}{p(\alpha p + 1)}, \quad (4)$$

далее, учитывая, что

$$L\{x^3(t)\} = X^3(p) = \frac{1}{p}, \quad (5)$$

найдем передаточную функцию образцовой (эталонной) САР

$$W(p) = \frac{X(p)}{X^3(p)} = \frac{1}{\alpha p + 1}, \quad (6)$$

что соответствует вышеотмеченному.

Для выбора величины α имеются следующие рекомендации [55]: так как длительность переходного процесса в САР с передаточной функцией (6) составляет примерно $(3 \div 4)\alpha$, поэтому если задано время регулирования t_p , то, допуская известный запас, α следует вычислять по соотношению

$$\alpha = \frac{t_p}{(5 \div 6)}. \quad (7)$$

Понятно, что параметр α в этом случае играет роль постоянной времени θ эталонной передаточной функции САР. Поэтому формулу (7) можно использовать для формализованной процедуры определения параметра θ , естественно, что при этом следует задавать реально достижимую длительность переходного процесса. Если канал регулирования достаточно инерционный, то, как это следует из вышеприведенных формул для настроек регуляторов, малые значения параметра θ приведут к весьма большим, реально недостижимым значениям управляющего воздействия.

Если известна передаточная функция замкнутой САР по заданию $W_{zc}(p)$, то передаточная функция регулятора $W_p(p)$ находится по формуле:

$$W_p(p) = \frac{W_{zc}(p)}{W_{об}(p)[1 - W_{zc}(p)]}, \quad (8)$$

где $W_{об}(p)$ – передаточная функция объекта.

Если динамические свойства объектов управления описывать вышеприведенными передаточными функциями и при этом $W_{zc}(p)$ выбрать в виде $\frac{1}{\theta p + 1}$, то в соответствии с формулой (8) будут

получаться физически нереализуемые структуры регуляторов из-за наличия в числителе $W_p(p)$ множителя вида $\exp(\tau_{об} p)$. Поэтому, учитывая все вышеизложенное, при решении задачи полагали, что $W_{zc}(p) = \frac{1}{\theta p + 1} \exp(-\tau_{об} p)$. Очевидно, что та-

ких же соображений придерживается и автор работы [59], поскольку им в желаемой передаточной функции замкнутой системы полностью сохраняется запаздывание объекта управления.

Детальное обоснование указанного вида эталонной передаточной функции замкнутой системы приведено в работе [56]. Таким образом, было установлено, что для каждого конкретного объекта управления, принадлежащего множеству типовых динамических объектов, целесообразно применение конкретного регулятора из ПИД-семейства с конкретными настройками. В результате задача структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов локальных контуров становится однозначно решаемой как по структуре регуляторов, так и по их настройкам.

Исследование устойчивости и качества систем. Для полноты исследования предлагаемого способа решения задачи синтеза рассматривался вопрос о качестве переходных процессов в сконструированных указанным образом системах и о грубости этих структур и настроек. В работах [60, 61] указанное исследование проведено для объекта

$$W_{об}(p) = \frac{1}{T_{об} p} \exp(-\tau_{об} p) \quad \text{с регулятором}$$

$W_p(p) = \frac{T_{об}}{\tau_{об} + \theta}$. Аналогичные исследования для

объекта $W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{T_{об}p + 1} \exp(-\tau_{об}p)$ с регулято-

ром $W_p(p) = \frac{T_{об}}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)} [1 + \frac{1}{T_{об}p}]$ и для объекта

$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{a_2p^2 + a_1p + 1} \exp(-\tau_{об}p)$ с регулятором

$W_p(p) = \frac{a_1}{k_{об}(\tau_{об} + \theta)} [1 + \frac{1}{a_1p} + \frac{a_2}{a_1}p]$ проведены со-

ответственно в работах [62, 63].

Для исследования устойчивости и анализа качества переходных процессов в каждом случае разработаны по две компьютерные программы: одна – для анализа переходных процессов при возмущении по заданию, а другая – при возмущении со стороны регулирующего органа. В каждой из разработанных программ предусмотрен ввод параметров объекта, а также и параметров настройки регулятора. Каждая из программ осуществляет не только построение графика переходного процесса, но и определяет перерегулирование σ и время регулирования t_p , а также вычисляет значения критериев

$$I_1 = \int_0^{t_K} |\varepsilon(t)| dt, \quad (9)$$

$$I_2 = \int_0^{t_K} \varepsilon^2(t) dt, \quad (10)$$

где t_K – конечное время оценки качества переходного процесса. При этом время регулирования t_p определялось как время, по истечении которого отклонение регулируемой величины от задания не будет превышать 5%. Интегрирование дифференциальных уравнений объектов управления осуществлялось методом Рунге-Кутты с погрешностью, пропорциональной пятой степени шага по времени. Для компьютерного использования алгоритм регулирования представляли в дискретной форме, при вычислении интеграла применяли метод трапеций. С целью сокращения объема необходимых вычислений использовали рекуррентные формы дискретного представления алгоритмов ПИД-регулирования, приведенные в работе [64]. В программах предусматривается ввод нижнего и верхнего пределов изменения регулирующего воздействия. Варьировались как параметры объекта управления, так и параметры настройки регуляторов. Границы области устойчивости, где это представлялось возможным, отыскивались аналитическим методом, в других случаях устойчивость САР оценивалась численным методом по кривым переходных процессов.

Во всех случаях установлено, что рассматриваемый метод синтеза промышленных САР, позволяющий однозначно выбирать как структуру,

так и параметры настройки регулятора, обеспечивает приемлемое качество переходных процессов и достаточный запас устойчивости системы при довольно заметных по размерам вариациях параметров объекта управления и погрешностях задания настроек регулятора.

Заключение. Предложенный метод структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов по эталонной передаточной функции замкнутой системы дает однозначные ответы на следующие вопросы: какой регулятор следует использовать для данного объекта управления и каковы должны быть его настройки. Показано, что сконструированные таким образом САР обладают должными запасами устойчивости и приемлемым качеством переходных процессов. Поэтому данный метод синтеза можно достаточно уверенно рекомендовать для практического использования.

Литература

1. Зингер, Н.М. *Повышение эффективности работы тепловых пунктов* / Н.М. Зингер, В.Г. Бестолченко, А.А. Жидков. – М.: Стройиздат, 1990. – 188 с.
2. *Автоматика и автоматизация систем теплогоснабжения и вентиляции: учеб. для вузов* / А.А. Калмаков, Ю.Я. Кувишинов, С.С. Романова, С.А. Шелжунов. – М.: Стройиздат, 1986. – 479 с.
3. Панферов, С.В. *Структурно-параметрический синтез адаптивной системы управления температурным режимом отапливаемых зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / С.В. Панферов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 20 с.
4. Неймарк, Ю.И. *Синтез и функциональные возможности простейшего квазиинвариантного управления* / Ю.И. Неймарк // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия «Математическое моделирование и оптимальное управление»*. – 2007. – № 6. – С. 140–146.
5. Самарин, О.Д. *О совершенствовании расчета процессов автоматического регулирования инженерных систем обеспечения микроклимата* / О.Д. Самарин, К.М. Мжачих // *Инженерные системы*. – 2008. – № 2 (34). – С. 22–25.
6. Блох, З.Ш. *Динамика линейных систем автоматического регулирования машин* / З.Ш. Блох. – М.: Технтеориздат, 1952. – 491 с.
7. Ключев, А.С. *Условия оптимальной настройки регуляторов систем автоматического регулирования температуры и давления перегретого пара котлоагрегата* / А.С. Ключев // *Теплоэнергетика*. – 1969. – № 7. – С. 57–60.
8. Чертков, Н.К. *Аналитические формулы оптимальной настройки авторегуляторов* / Н.К. Чертков, С.В. Корябина // *Теплоэнергетика*. – 1969. – № 9. – С. 28–30.
9. Давыдов, Н.И. *Определение параметров настройки ПИД-регулятора по переходной характеристике объекта регулирования* / Н.И. Давыдов, О.М. Идзон, О.В. Симонова // *Теплоэнергетика*. – 1995. – № 10. – С. 17–22.

10. О приближенном соответствии между квазиоптимальными и типовыми законами управления / С.М. Кулаков, В.В. Штефан, С.П. Огнев, И.А. Штефан // *Изв. вузов. Сер. «Черная металлургия»*. – 1999. – № 4. – С. 33–40.
11. Сметана, А.З. Методика определения параметров настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / А.З. Сметана // *Изв. АН. Сер. «Энергетика»*. – 2001. – № 2. – С. 80–87.
12. Гончаров, В.И. Синтез робастных регуляторов низкого порядка / В.И. Гончаров, А.В. Лиепиньш, В.А. Рудницкий // *Изв. АН. «Теория и системы управления»*. – 2001. – № 4. – С. 36–43.
13. Александрова, Н.Д. О настройках импульсных релейных регуляторов на малоинерционных объектах / Н.Д. Александрова, Н.И. Давыдов // *Теплоэнергетика*. – 2002. – № 5. – С. 54–57.
14. Сметана, А.З. Методика расчета параметров настройки систем автоматического регулирования теплоэнергетических процессов / А.З. Сметана // *Теплоэнергетика*. – 2002. – № 10. – С. 40–45.
15. Тверской, М.Ю. Исследование итерационного алгоритма расчета параметров настройки двухконтурных систем регулирования / М.Ю. Тверской, С.А. Таламанов // *Теплоэнергетика*. – 2002. – № 10. – С. 65–72.
16. Ротач, В.Я. Анализ алгоритмов регулирования в каскадных системах / В.Я. Ротач // *Теплоэнергетика*. – 2002. – № 10. – С. 26–30.
17. Панько, М.А. Выбор показателя запаса устойчивости при расчете настроек ПИ- и ПИД-регуляторов / М.А. Панько, Х.Ш. Буй // *Теплоэнергетика*. – 2003. – № 10. – С. 27–32.
18. Мозжечков, В.А. Синтез линейных регуляторов с простой структурой / В.А. Мозжечков // *Автоматика и телемеханика*. – 2003. – № 1. – С. 27–41.
19. Круглов, С.П. Взаимосвязь двух подходов к аналитическому конструированию оптимальных регуляторов / С.П. Круглов // *Автоматика и телемеханика*. – 2003. – № 4. – С. 56–69.
20. Гриценко, А.В. Улучшение качества алгоритма управления «Предиктор Смита» посредством автоматического вычисления времени запаздывания / А.В. Гриценко // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2004. – № 12. – С. 32–37.
21. Смирнов, Н.И. Оптимизация настроечных параметров автоматических систем регулирования с дифференциатором / Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // *Теплоэнергетика*. – 2004. – № 10. – С. 10–16.
22. Панько, М.А. Расчет настроек ПИД-регуляторов при цифровой реализации алгоритма регулирования / М.А. Панько // *Теплоэнергетика*. – 2004. – № 10. – С. 28–32.
23. Сметана, А.З. Автоматическая и автоматизированная настройка регуляторов теплоэнергетических процессов / А.З. Сметана // *Теплоэнергетика*. – 2004. – № 11. – С. 47–52.
24. Оптимальные автоматически настраиваемые регуляторы (регуляторы ОАНР) / А.М. Шубладзе, Е.С. Сысоев, С.В. Гуляев, А.А. Шубладзе. – http://www.greenco.orc.ru/St_01/stat_01.htm.
25. Ротач, В.Я. К расчету оптимальных параметров ПИД-регуляторов по экспертным критериям / В.Я. Ротач // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2005. – № 11. – С. 5–9.
26. Ротач, В.Я. К расчету оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям / В.Я. Ротач // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2006. – № 12. – С. 22–29.
27. Зверьков, В.П. Итерационные алгоритмы динамической настройки регуляторов при наличии случайных возмущений / В.П. Зверьков, В.Ф. Кузицин // *Теплоэнергетика*. – 2006. – № 10. – С. 24–28.
28. Ротач, В.Я. Расчет параметров систем автоматического управления при высокой точности их функционирования / В.Я. Ротач // *Теплоэнергетика*. – 2006. – № 10. – С. 17–19.
29. Лозгачев, Г.И. Построение модальных робастных регуляторов по передаточной функции замкнутой системы / Г.И. Лозгачев, Л.А. Тютюнникова // *Изв. РАН. Сер. «Теория и системы управления»*. – 2006. – № 4. – С. 5–8.
30. Смирнов, Н.И. О корректности настройки ПИД-регулятора при аппроксимации переходной характеристики объекта регулирования апериодическим звеном с транспортным запаздыванием / Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2007. – № 1. – С. 35–39.
31. Чертков, Н.К. Пакет компьютерных программ для настройки систем автоматического регулирования / Н.К. Чертков, В.Н. Чертков // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 9. – С. 56–60.
32. Смирнов, Н.И. Чувствительность и робастная настройка ПИД-регуляторов с реальным дифференцированием / Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин, А.И. Репин // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 10. – С. 15–23.
33. Повышение помехоустойчивости и эффективности алгоритма регулирования температуры горячего водоснабжения на центральных тепловых пунктах / О.С. Колосов, В.Б. Гармаиш, Р.В. Деев, Р.Б. Морозов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2008. – № 10. – С. 18–23.
34. Сметана, А.З. Модифицированная методика автоматической и автоматизированной настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / А.З. Сметана // *Теплоэнергетика*. – 2009. – № 4. – С. 44–46.
35. Дылевский, А.В. Синтез конечномерных регуляторов для бесконечномерных объектов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Дылевский. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2009. – 32 с.
36. Денисенко, В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1 / В. Денисенко // *Современные технологии автоматизации*. – 2006. – № 4. – С. 66–74.

37. Денисенко, В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2 / В. Денисенко // *Современные технологии автоматизации*. – 2007. – № 1. – С. 78–88.
38. Денисенко, В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1 / В. Денисенко // *Современные технологии автоматизации*. – 2007. – № 4. – С. 86–97.
39. Денисенко, В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 2 / В. Денисенко // *Современные технологии автоматизации*. – 2008. – № 1. – С. 86–99.
40. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В.Я. Ротач. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
41. Ротач, В.Я. Адаптация в системах управления технологическими процессами / В.Я. Ротач // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2005. – № 1. – С. 4–10.
42. Варламов, И.Г. «Гаечный ключ» для наладчика САР / И.Г. Варламов, Л.П. Серезжин, Б.В. Филимонов // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2004. – № 9. – С. 17–22.
43. Варламов, И.Г. «Не мешайте регуляторам работать!» / И.Г. Варламов, М.М. Кузнецов // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2005. – № 6. – С. 20–23.
44. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов / А.А. Ерофеев. – СПб.: Политехника, 2002. – 302 с.
45. Кулаков, Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справ. пособие / Г.Т. Кулаков. – Минск: Высш. шк., 1984. – 192 с.
46. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Клюев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
47. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб. В 5 т. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 640 с.
48. Ротач, В.Я. Расширение границ действия теории автоматического управления теплотехнологическими процессами / В.Я. Ротач // *Теплоэнергетика*. – 2009. – № 10. – С. 25–31.
49. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов: учеб. пособие / Г.М. Глинков, В.А. Маковский, С.Л. Лотман, М.Р. Шапировский. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
50. Абдуллаев, Н.Д. Теория и методы проектирования оптимальных регуляторов / Н.Д. Абдуллаев, Ю.П. Петров. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
51. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования / Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Серезжин, И.Е. Залуцкий, И.Г. Варламов // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2004. – № 7. – С. 1–7.
52. Ротач, В.Я. Возможен ли синтез нечетких регуляторов с помощью теории нечетких множеств? / В.Я. Ротач // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2004. – № 1. – С. 33–34.
53. Поляк, Б.Т. Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
54. Поляк, Б.Т. Развитие теории автоматического управления / Б.Т. Поляк // *Проблемы управления*. – 2009. – № 3.1. – С. 13–18.
55. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. В 2 т. Т.1. Линейные системы / Д.П. Ким. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
56. Панферов, С.В. К обоснованию метода структурно-параметрического синтеза автоматических регуляторов / С.В. Панферов, А.И. Телегин, В.И. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2009. – Вып. 9. – № 3 (136). – С. 29–36.
57. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования: пер. с нем. / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. – М.: Энергия, 1973. – 190 с.
58. Мань, Н.В. Оптимальный синтез робастной каскадной автоматической системы управления / Н.В. Мань // *Теплоэнергетика*. – 2000. – № 9. – С. 22–28.
59. Лозгачев, Г.И. Построение модальных регуляторов для одноконтурных и многосвязных систем / Г.И. Лозгачев // *Автоматика и телемеханика*. – 2000. – № 12. – С. 15–21.
60. Панферов, С.В. Оценка качества регулирования уровня жидкости в системах теплоснабжения / С.В. Панферов, А.И. Телегин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2009. – Вып. 11. – № 15 (148). – С. 39–44.
61. Панферов, С.В. Анализ качества выбора и настройки автоматического регулятора уровня жидкости / С.В. Панферов, А.И. Телегин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2009. – Вып. 8. – № 16 (149). – С. 49–53.
62. Панферов, С.В. К задаче конструирования автоматического регулятора для статического объекта первого порядка с запаздыванием регуляторов / С.В. Панферов, В.И. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2011. – Вып. 14. – № 23 (240). – С. 79–86.
63. Панферов, С.В. К задаче конструирования автоматического регулятора для объекта второго порядка с запаздыванием / С.В. Панферов, В.И. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2011. – Вып. 12. – № 16 (233). – С. 46–52.
64. Плюто, В.П. Практикум по теории автоматического управления химико-технологическими процессами. Цифровые системы / В.П. Плюто, В.А. Путинцев, В.М. Глузов. – М.: Химия, 1989. – 279 с.

Поступила в редакцию 11 марта 2012 г.