

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Л.А. Денисова (ОмГУ), В.А. Мещеряков (Омский филиал Финуниверситета)

*Рассмотрены вопросы создания средств автоматизированного проектирования систем управления ТП объектов теплоэнергетики. Представлен подход к многокритериальной оптимизации с использованием генетических алгоритмов при синтезе систем управления, положенный в основу инструментария испытательного стенда.*

*Ключевые слова: математическая модель, автоматизированное проектирование, контроллер, устойчивость, показатель качества, генетический алгоритм.*

### Введение

Повышение эффективности систем автоматического управления (САУ), являющихся неотъемлемой частью АСУТП объектов теплоэнергетики, невозможно без создания новых средств автоматизированного проектирования САУ, базирующихся на современных информационных технологиях.

В работе представлено описание инструментария испытательного стенда и результаты проектирования САУ на базе выносных локальных регуляторов (контроллеров) ВЛР-2, разработанных в ЗАО "Автоматика-Э" (г. Омск). Контроллеры ВЛР-2 в составе программно-технических комплексов (ПТК) АСУТП предназначены для работы на объектах тепловой и атомной энергетики, где в настоящее время проводится модернизация средств автоматики.

Для настройки и испытаний цифровых контроллеров, а также проведения верификации их алгоритмического и программного обеспечения в ЗАО "Автоматика-Э" создан и используется испытательный стенд, содержащий средства моделирования управляемых ТП [1–4].

### Характеристика испытательного стенда САУ

В состав стенда включены математические модели САУ, разработанные с использованием инструментария пакета MATLAB, являющегося средой для выполнения научных и инженерных расчетов [5]. Средства MATLAB с пакетами расширения Simulink и Global Optimization Toolbox позволяют решать задачи моделирования исследуемой САУ и многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами (ГА).

На рис. 1 приведена функциональная структура испытательного стенда САУ, предназначенного для автоматизированного проектирования программно-алгоритмического обеспечения контроллеров. Инструментарий испытательного стенда САУ позволяет решать следующие задачи: моделирование и оптимизация САУ, расчет устойчивости контуров регулирования, а также визуализация полученных результатов.

Моделирование процессов в системах управления является одной из основных задач, решаемых на начальном этапе проектирования системы. При создании моделей ТП выполняется два этапа исследований: параметризация моделей и определение параметров моделей по экспериментальным данным. На этапе параметризации на основе априорных дан-

ных о ТП разрабатывается его модель, определяется ее структура и число параметров. При этом принимается во внимание, что динамические модели ТП (например, каналы регулирования температуры, давления, уровня жидкости в резервуарах и т.д.) приближенно представляются полиномами первой или второй степени, что дает удовлетворительный для практики результат [1, 2, 6].

На этапе определения параметров моделей разрабатывается информация о динамических характеристиках систем, и, кроме того, производится статистическая обработка экспериментальных данных, полученных с объектов управления. Так как информация о протекании ТП в действующих САУ, как правило, регистрируется и архивируется информационно-вычислительными системами, то имеется возможность ее использовать в качестве исходных данных для разработки математических моделей объектов управления. На основе архивной информации получены данные о динамических характеристиках систем и данные, используемые для построения моделей случайных возмущений [1–3].

В процессе разработки и оптимизации САУ необходимо учитывать разнообразный комплекс требований, связанных с различными характеристиками систем. К основным, как правило, относят требования, касающиеся статических и динамических свойств систем управления. Среди них важное место занимают точностные характеристики, определяющие ошибки, возникающие в различных режимах работы системы. Кроме того, к САУ применяются критерии качества, построенные на основе минимизации времени переходного процесса, минимизации потребления энергии и т.д. Важными требованиями к САУ, которые также необходимо учитывать при разработке, являются требования, связанные с ее устойчивостью к влиянию внешних воздействий.

Следует отметить, что предъявляемые к САУ требования являются противоречивыми, и возникает необходимость в использовании нескольких показателей качества функционирования систем. Поэтому для создания системы, удовлетворяющей предъявляемым требованиям, должна ставиться задача ее многокритериальной оптимизации.

Задачи наилучшего выбора при наличии многих критериев являются предметом теории принятия решений [7]. Одним из основных, фундаментальных

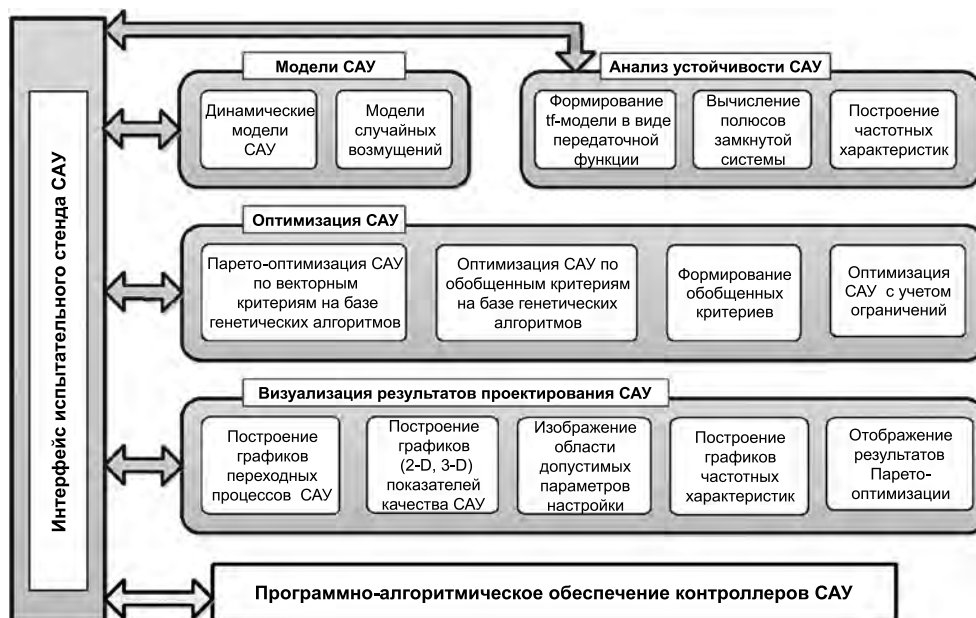


Рис. 1 Функциональная структура испытательного стенда САУ

понятий теории принятия решений является понятие оптимального по Парето или эффективного решения. Оно представляет собой обобщение понятия точки экстремума числовой функции на случай нескольких функций. При этом решение Парето-оптимально, если значение любого из критериев можно улучшить лишь за счет ухудшения значений остальных критериев. При многокритериальной оптимизации САУ использованы методы Парето-аппроксимации на основе ГА [8, 9].

С целью оптимизации систем управления с учетом ограничений на область поиска оптимального решения, реализован предложенный и обоснованный в работе [8] способ сведения исходной многоцелевой задачи к задачам с единым критерием. На основе частных требований выполняется формирование единого критерия качества системы управления, экстремальное значение которого соответствует оптимальному построению системы.

Анализ устойчивости контуров регулирования выполняется на основе разработанных моделей с использованием результатов оптимизации САУ. Для применения аналитических методов анализа устойчивости производится аппроксимация релейно-импульсных регуляторов линейными регуляторами. Выполняется преобразование структурных схем системы для представления моделей в виде передаточных функций с целью вычисления полюсов замкнутых систем и построения частотных характеристик, позволяющих оценить запасы устойчивости САУ.

С целью контроля процесса проектирования регуляторов созданы программные модули построения графиков переходных процессов САУ. Для контроля выполнения оптимизации САУ реализована возможность построения аппроксимации множества Парето-оптимальных решений. Для наглядного представления полученных результатов и контроля расчета

параметров настроек регуляторов, оптимизации и анализа устойчивости контуров регулирования предусмотрена возможность построения двух- и трехмерных изображений областей допустимых настроек на графиках обобщенных критериев качества САУ.

Рассмотрим пример использования инструментария испытательного стенда для разработки программно-алгоритмического обеспечения контроллера, предназначенного для работы в системе автоматического регулирования (САР) типового объекта автоматизации — канала регулирования

давления пара в деаэраторе турбинного отделения энергоблока АЭС.

#### Математическая модель системы регулирования давления

В среде MATLAB/Simulink разработана математическая модель САР давления пара в деаэраторе (рис. 2), которая в свою очередь содержит модели: регулятора давления (controller), исполнительного механизма (ИМ) с регулирующим клапаном (РК) (regulating door) и технологического объекта управления (control object). В регуляторе давления используется традиционный способ регулирования, применяемый в системах регулирования теплоэнергетических параметров с исполнительными механизмами постоянной скорости. Сигнал рассогласования на входе в регулятор давления формируется взвешенным суммированием сигналов заданного и текущего значений давления. Выходными сигналами являются импульсы, формируемые в контроллере и поступающие на исполнительный механизм для открытия/закрытия регулирующего клапана, причем скважность выходных импульсов связана пропорционально-дифференциальной (ПД) зависимостью с изменением сигнала рассогласования. Описанный релейно-импульсный регулятор совместно с ИМ постоянной скорости приближенно реализует пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования в основном, скольльзящем режиме работы. Кроме того, в модели присутствует инерционное звено для демпфирования входного сигнала измеренного давления (damping).

Регулирующий клапан, снабженный ИМ, представлен усилительным звеном для реализации коэффициента передачи ( $100\% \text{откр}/T_{\text{им}}$ ), учитывающим время открытия клапана  $T_{\text{им}}$ , и интегрирующим зве-

ном с ограничением 0...100% по указателю положения (УП). Объект управления — канал «положение регулирующего клапана — давление», представлен инерционным звеном первого порядка.

Основными параметрами настройки регулятора являются: коэффициент передачи  $k_p$  и постоянная времени интегрирования  $T_{и}$ . Содержащее указанные параметры звено на рис. 2 выделено тенью. Кроме того, в модели выполняется расчет интегральных показателей качества регулирования (performance criterion). За период времени  $T$  (принимается не менее длительности переходного процесса) вычисляются квадратичные интегральные критерии:  $\bar{F}_1(X) = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt$ , характеризующий величину и длительность существования ошибки регулирования  $\varepsilon(t)$  (отклонения регулируемого параметра от заданного значения),  $\bar{F}_2(X) = \int_0^T u^2(t) dt$  и, учитывающий затраты на управление ( $u$  — выходной сигнал регулятора). Также за указанный временной интервал считается число импульсов  $n$ , формируемых регулятором (срабатываний ИМ РК):  $\bar{F}_3(X) = n$ .

Так как критерии  $\bar{F}_i(X)$ ,  $i = 1, 3$  имеют разные диапазоны изменения, то для приведения к диапазону 0...1 они нормализованы. Необходимо выполнить оптимизацию САР давления, то есть найти такой вектор параметров  $X = (k_p, T_{и})$ , который минимизирует принятые показатели для обеспечения быстродействия, отсутствия перерегулирования и уменьшения числа срабатываний ИМ.

#### Оптимизация параметров регуляторов давления

Как показали предварительные исследования и предшествующий опыт проектирования САР [8], минимальные значения рассматриваемых критериев качества достигаются при различных параметрах настройки САР, что говорит о необходимости достижения компромисса между ними при оптимизации. Совокупность частных критериев  $\bar{F}_i(X)$ ,  $i = 1, 3$  образует векторный критерий оптимальности (векторную целевую функцию)  $F(X) \in \{F\}$ , где  $X \in \{X\}$  — вектор варьируемых параметров;  $\{X\}$ ,  $\{F\}$  — пространства параметров и векторных критериев соответственно. Минимизация каждого из частных критериев выполняется в одной и той же области допустимых значений параметров, которую обозначим  $D_X$ . Тогда во введенных обозначениях задачу многокритериальной оптимизации можно записать в виде  $\min_{X \in D_X} F(X) = F(X^o) = F^o$ , где  $X^o$ ,  $F^o$  — решения задачи.

Одновременная минимизация критериев соответствует построению множества Парето-оптимальных решений, то есть таких допустимых решений, которые не могут быть улучшены (умень-

шены) ни по одному из имеющихся критериев без ухудшения (увеличения) по какому-то хотя бы одному другому критерию. Для решения задачи многокритериальной оптимизации САР давления использован подход, предложенный и опробованный для оптимизации традиционных релейно-импульсных САР [8], включающий три этапа.

На первом этапе из принятых показателей качества  $F_i(X)$ ,  $i = 1, 3$  выбираются основные частные критерии  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , характеризующие точность регулирования и затраты на управление. Далее задача оптимизации рассматривается как двухкритериальная. Принимается во внимание, что согласно известному принципу Эджворта — Парето [7] наилучшие решения многокритериальной задачи всегда следует выбирать в пределах множества Парето решений.

На втором этапе для основных критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  находится множество Парето-оптимальных решений — таких допустимых решений, которые не могут быть улучшены (уменьшены) по одному из имеющихся критериев без ухудшения (увеличения) по другому критерию. Так как множество Парето-оптимальных решений еще не является окончательным решением при выборе варианта параметров САР (необходимо получить не несколько, а одно предпочтительное решение), то после получения множества Парето решений для его сужения используется так называемый лексикографический подход [7], сущность которого заключается в следующем. Частные критерии упорядочиваются по важности и привлекаются поочередно для выбора параметров в качестве дополнительной информации, пока не будет получено единственное решение.

На заключительном, третьем этапе для окончательного выбора варианта параметров САР в качестве дополнительного вводился критерий  $F_3(X)$ , минимальное значение которого отыскивалось среди множества Парето-решений, полученных по критериям  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ .

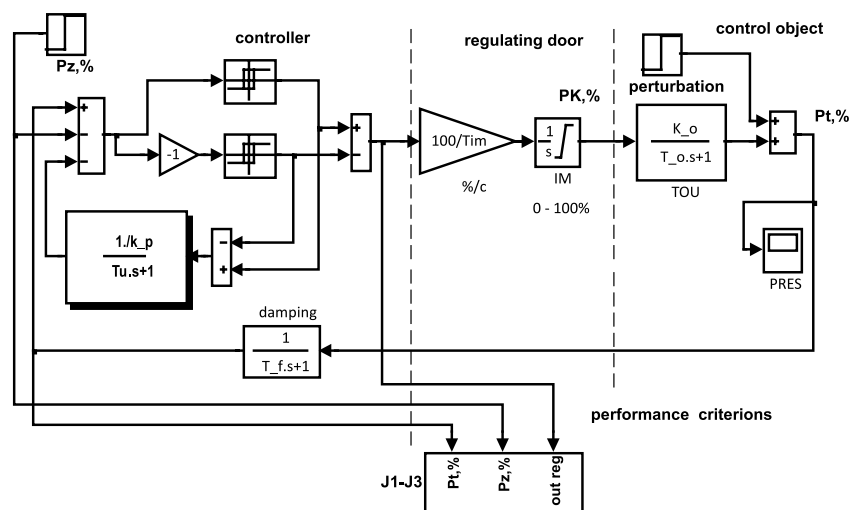


Рис. 2 Схема математической модели САР в среде MATLAB/Simulink

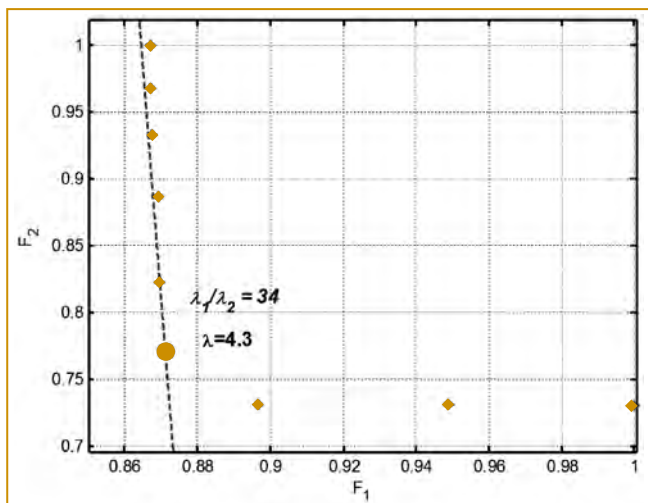


Рис. 3 Построение фронта Парето для критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$

Для реализации описанного подхода и построения множества Парето-оптимальных решений использован метод Парето-аппроксимации на основе ГА. Генетический алгоритм представляет собой метод поиска оптимальных решений, основанный на копировании механизмов биологического естественного отбора и генетического наследования. Преимуществом ГА по сравнению с традиционными методами оптимизации является то, что поиск решения выполняется, исходя из множества (популяции) точек. Основными операциями ГА при приближенном построении множества Парето являются операция скрещивания (*crossover*) наиболее приспособленных особей и операция случайных мутаций (*mutation*), позволяющих получать индивидуумы с новыми свойствами. Кроме того, специфическими для задачи построения множества Парето являются операции вычисления пригодности индивида и отбора (селекции) для сходимости к фронту Парето.

Для построения множества Парето решений и моделирования исследуемой САР использовались специально созданные m-файлы — сценарии на языке MATLAB, выполняющие многократные вызовы Simulink-модели САР (рис. 2), установку необходимых опций многоцелевого ГА и контроль выполнения оптимизации. Поиск множества Парето-решений выполнялся функцией *gamultiobj* многоцелевого ГА, реализованного на основе известного ГА Парето-аппроксимации NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) [9]. Алгоритм Парето-аппроксимации NSGA-II, являясь элитарным ГА, имеет механизм включения лучших (*elite*) особей данной популяции (с высокими значениями функции пригодности для перемещения в направлении множества Парето) без изменения в следующую популяцию. Кроме того, алгоритм поддерживает разнообразие популяций, рассматривая особей с более низкими значениями функции пригодности для сходимости к фронту Парето.

Для получения результатов требовалось от 5...20 поколений ГА. В связи с тем, что при оптимизации САР

осуществлялся поиск параметров  $k_p$ ,  $T_n$ , доставляющих минимум векторному критерию оптимальности  $F(X) = F(k_p, T_n)$ , то для использования ГА в качестве «особи» принят вектор параметров  $X = (k_p, T_n)$ . При этом число особей в популяции ГА устанавливалось в диапазоне 30...50. На каждом шаге работы алгоритма рассматривался вектор параметров  $X$  и соответствующее ему значение векторного критерия  $F(X)$ . В связи с тем, что начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, выполнялись несколько реализаций расчетов и выбирались лучшие из полученных решений.

Построение фронта Парето, выполненное при оптимизации, приведено на рис. 3 (ниже на основании этого графика производится формирование скалярного критерия). На критериальной плоскости с осями координат  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  показана аппроксимация фронта Парето — множество точек, не улучшаемых решений для критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , полученных при оптимизации САР с помощью ГА. Особи ГА — аппроксимация множества Парето критериев, изображены в виде звездочек. В результате привлечения дополнительного критерия  $F_3(X)$  из множества точек Парето-оптимальных параметров САР для каждой реализации выбрано единственное решение (выделено кружком), соответствующее минимуму критерия  $F_3(X)$ .

На рис. 4 приведены графики переходных характеристик САР давления пара в деаэраторе (возмущение заданным значением регулируемого параметра) при минимизации критериев  $F_1(X) — F_3(X)$  на рис. 4, а — 4, в соответственно. На графиках пунктирная кривая соответствует регулируемому параметру — давлению, штрихпунктирная — положению РК, а непрерывная — импульсному выходу регулятора.

Для наглядности на рис. 4, г сведены графики переходных процессов в увеличенном масштабе для регулируемых параметров всех трех случаев ((кривая 1 — при  $F_1 = \min$ ; 2 — при  $F_2 = \min$ ; 3 — при  $F_3 = \min$ ; 4 — заданное значение давления). Как можно видеть, переходный процесс при минимальном значении критерия  $F_1(X)$  характеризуется наличием перерегулирования (рис. 4, а), а переходный процесс при минимальном значении  $F_2(X)$  не только затянут во времени (рис. 4, б), но и имеет статическую ошибку (рис. 4, г, кривая 2). В то же время САР с параметрами, полученными при нахождении минимума критерия  $F_3(X)$  среди множества Парето решений для критериев  $F_1(X) — F_2(X)$ , имеет значительно лучшие динамические характеристики (рис. 4, в). Видно, что переходный процесс характеризуется не только отсутствием перерегулирования и быстродействием (рис. 4, г, кривая 3), но и малым числом срабатываний регулятора (рис. 4, в).

Следует отметить, что высокое качество процесса регулирования, малое число срабатываний регулятора (1...2 импульса) наблюдалось во всех полученных реализациях. Значения параметров САР при оптимизации выбирались из принятых диапазонов  $k_p \in [0, 01; 1]$ ,  $T_n \in [1; 30]$ .

Далее выполнялось построение обобщенного критерия (многоцелевая задача оптимизации САР сводится к задаче с единым показателем качества), позволяющего учитывать ограничения на область поиска оптимальных решений. Преобразование многокритериальной задачи оптимизации САР в однокритериальную выполнено на основании следующего, апробированного при синтезе САР подхода [8].

Формирование обобщенного критерия для синтеза САР выполнялось на основе результатов, полученных при решении задачи многокритериальной оптимизации, когда в качестве основных частных критериев принимались  $F_1(X)$  —  $F_2(X)$ , а дополнительным являлся критерий  $F_3(X)$  (рис. 3).

Выбор во множестве Парето сведен к выбору весовых коэффициентов ( $\lambda_i, i=1, 2$ ) для частных критериев линейной свертки  $J(X) = \lambda_1 F_1(X) + \lambda_2 F_2(X)$ . Принималось во внимание следующее. Так как всякая точка минимума на множестве  $X$  линейной свертки критериев является Парето-оптимальной, то выбор в указанных пределах коэффициентов линейной свертки и минимизация ее значения на множестве  $X$ , приводит к получению Парето-оптимальных вариантов. То есть задача получения линейной свертки сводится к нахождению весовых коэффициентов. Для окончательного выбора варианта параметров САР отыскивалось решение, соответствующее минимуму критерия  $F_3(X)$  среди множества Парето-решений, полученных по критериям  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ .

Тогда график прямой  $\lambda_1 F_1(X) + \lambda_2 F_2(X) = C$  на плоскости целевых функций  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  (рис. 3) должен касаться фронта Парето в точке решения (при  $F_3(X) = \min$ ), а ее наклон — определяться соотношением весов  $\lambda_i, i=1, 2$ . В связи со сложностью построения

касательной к аппроксимации фронта Парето, имеющей разрывный характер, вместо касательной строится ближайшая к ней секущая. Параметры найденной прямой принимались в качестве искомым весовых коэффициентов скалярного критерия. Обобщенный критерий для практического использования при синтезе и исследовании динамики САР должен учитывать диапазоны изменения параметров, входящих в частные критерии. Вычисляемые в ходе экспериментальных исследований системы основные показатели качества (зависящие от диапазонов изменения параметров)  $\bar{F}_1 = \int_0^T \varepsilon^2 dt$  и  $\bar{F}_2 = \int_0^T u^2 dt$  сведены в выражение скалярного критерия (традиционно используемое при исследовании САР [1, 4, 6]):  $J(X) = \int_0^T [\varepsilon^2 + (\lambda u)^2] dt$ .

Первое слагаемое в подынтегральном выражении характеризует точность на всем интервале управления, а второе — определяет совокупные расходы на управление. Весовой коэффициент при втором слагаемом вычисляется с учетом соотношения весов  $\lambda_i, i=1, 2$ . Для рассматриваемой задачи получено  $\lambda=4$ .

Оптимизация САР при постановке задачи как однокритериальной имеет преимущества, заключающиеся в том, что для ее решения могут применяться методы оптимизации, позволяющие учитывать ограничения, налагаемые на область поиска, и кроме того, использоваться современные средства визуализации для построения графиков обобщенных критериев с целью контроля полученных результатов.

#### Анализ устойчивости контура регулирования давления

На основе разработанной математической модели САР давления и оптимизации настроек выполняется анализ устойчивости контура регулирования. При этом для применения аналитических методов анализа устойчивости осуществляется аппроксимация релейно-импульсных регуляторов линейными регуляторами. Производится преобразование структурных схем систем для представления моделей в виде передаточных функций с целью вычисления полюсов замкнутых систем и построения частотных характеристик, позволяющих оценить запасы устойчивости САУ. Для расчета использовались значения параметров системы, полученные при ее оптимизации. Для рекомендованной величины коэффициента передачи регулятора и при его 10-кратном увеличении запасы устойчивости системы по амплитуде и фазе находятся в принятом на практике

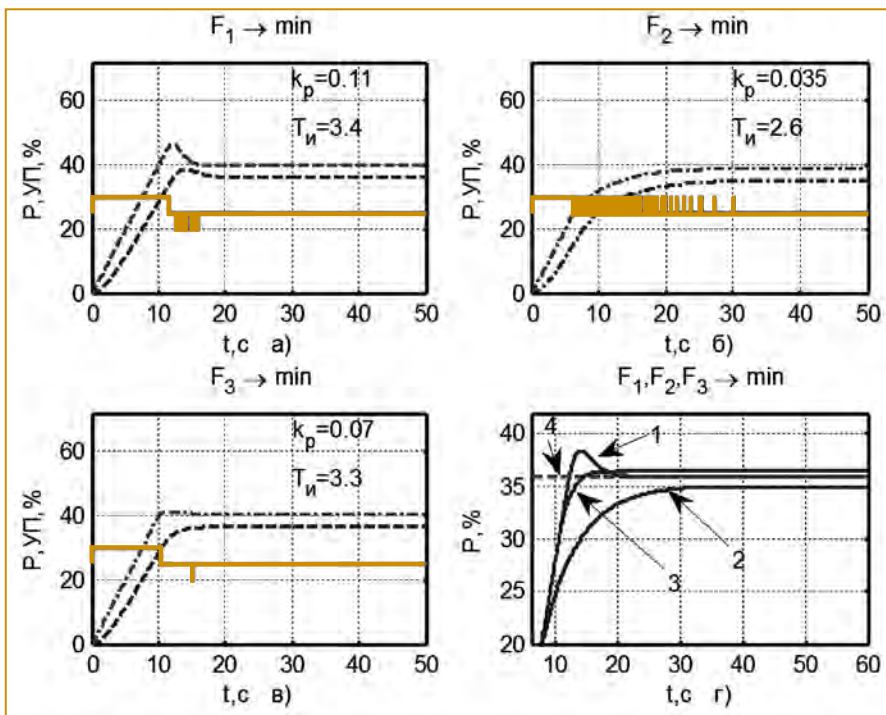


Рис. 4. Переходные процессы при оптимизации САР

диапазоне для обеспечения технологической работоспособности системы.

С целью выработки рекомендаций по настройке САР построена граница области устойчивости в плоскости настраиваемых параметров  $T_n$  и  $k_p$  для системы с аппроксимирующим линейным ПИ регулятором. Построение границы устойчивости выполнено с помощью программы на языке MATLAB, реализующей процедуры задания диапазона значений  $T_n$  и  $k_p$  и вычисления корней характеристического уравнения для конкретных значений этих параметров. Для каждого  $k_p$  находится первое значение  $T_n$ , при котором по крайней мере один корень характеристического уравнения попадает в правую полуплоскость. Пары чисел  $T_n$  и  $k_p$ , найденные при рассмотрении всего диапазона значений, определяют границу области устойчивости системы.

На основе выполненных расчетов для аппроксимирующего линейного регулятора определена область устойчивости в плоскости настраиваемых параметров релейно-импульсного регулятора  $T_n$  и  $k_p$ . На рис. 5 показана граница области устойчивости в плоскости настраиваемых параметров релейно-импульсного регулятора  $T_n$  и  $k_p$ . (линия 1). Для получения аналитического выражения полученная кривая аппроксимирована линейной зависимостью (линия 2).

Также при определении ограничений области допустимых параметров принималась во внимание возможность возникновения автоколебаний из-за наличия нелинейностей в структуре регулятора и обратной связи, охватывающей релейные звенья. В условиях нормальной эксплуатации автоколебания недопустимы, так как вызывают опасность перегрева электродвигателя исполнительного механизма от частых реверсивных включений. Каждому значению постоянной интегрирования  $T_n$  при определенном отношении величин зоны возврата ( $\sigma$ ) и зоны нечувствительности ( $\delta$ ) релейных звеньев  $\sigma/\delta$  соответствует критическое отношение  $(k_p T_n / \Delta_n)_{крит}$ . Автоколебания возможны при  $(k_p T_n / \Delta_n) > (k_p T_n / \Delta_n)_{крит}$ . На рис. 5 приведена граница области автоколебаний (определенная экспериментально) для регулятора

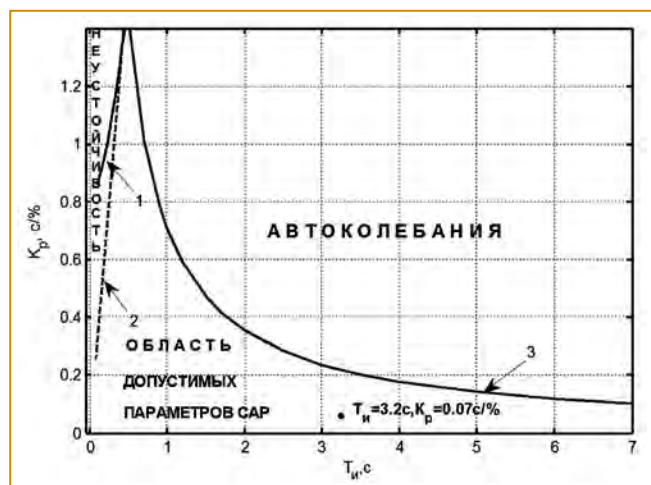


Рис. 5. Границы области допустимых параметров САР

давления пара в деаэраторе при принятом отношении  $\sigma/\delta = 0,3$  (линия 3 является гиперболой). Как показывают расчеты, при увеличении этого отношения области допустимых настроек сужаются.

Следует отметить, что процессы в САР при настройках вне допустимой области отличаются. При неустойчивой работе (область слева от линии 1) процессы в системе являются расходящимися, амплитуды колебаний регулируемого параметра и положения РК увеличиваются во времени. В области настроек правее линии 3 наблюдаются автоколебания в системе. Хотя их амплитуда невелика для регулируемого параметра и положения исполнительного механизма, но, тем не менее, такой характер протекания процесса является недопустимым.

Таким образом, получены границы области допустимых параметров настроек САР давления пара в деаэраторе, причем рекомендуемые значения параметров  $k_p$  и  $T_n$  доставляют минимум функционалу качества  $J(k_p, T_n) = \int_0^T [\varepsilon^2 + (4u)^2] dt$ .

Для наглядного представления полученных результатов и контроля расчета параметров настроек регуляторов, оптимизации и анализа устойчивости контуров регулирования на рис. 6 приведено трехмерное изображение области допустимых настроек на графике обобщенного критерия качества САР.

На рис. 6 кроме графика поверхности обобщенного критерия качества САР (1) приведены трехмерные изображения ограничений: вертикальная плоскость (2) проходит через прямую — границу устойчивости (на рис. 5 соответствует прямой 2); трехмерное изображение ограничения области автоколебаний (3) проходит через границу автоколебаний (на рис. 5 соответствует кривой 3). Видно, что минимальное значение критерия, соответствующее оптимальным настройкам САР (указано стрелкой), находится в области допустимых параметров (соответствует точке рекомендуемых настроек на рис. 5).

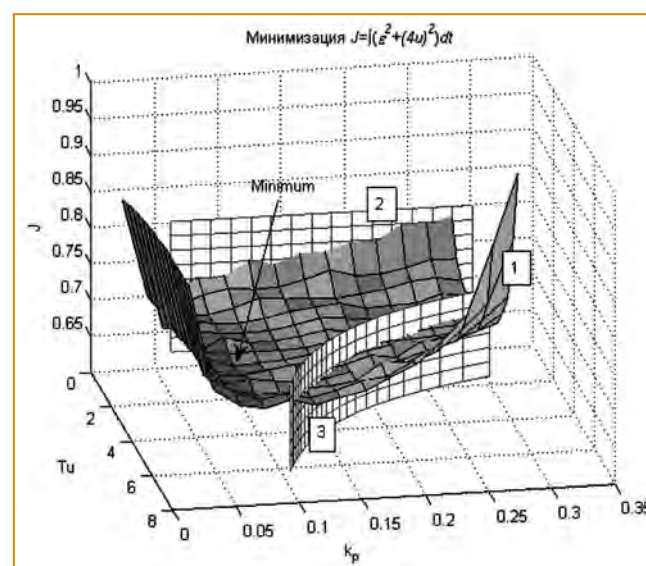


Рис. 6. Область рекомендуемых настроек САР на графике обобщенного критерия

В результате проведенных исследований сделан вывод, что необходимо выбирать значения параметров релейно-импульсных регуляторов давления из области рекомендуемых настроек, обеспечивающие устойчивую работу контура регулирования без автоколебаний. При этом не рекомендуется выбирать параметры настройки вблизи границ устойчивости с целью обеспечения достаточных запасов устойчивости.

#### Заключение

В результате проведенных исследований сделан вывод, что предлагаемые подходы к многокритериальной оптимизации систем управления на основе ГА, позволяющие получить обоснованное решение при незначительных вычислительных затратах, эффективны при автоматизированном проектировании САУ.

Автоматизация синтеза САР, реализованная на испытательном стенде ЗАО "Автоматика Э", позволяет значительно повысить качество регулирования и уменьшить временные затраты на предварительную настройку разрабатываемых контроллеров.

#### Список литературы

1. Денисова Л. А. Моделирование и оптимизация системы регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС//Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 14-19.

2. Раскин Е.М., Денисова Л.А., Сеницын В.П., Нестеров Ю.В. Математическая модель системы питания парогенератора энергоблока // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 3-7.
3. Денисова Л.А., Надточий П.Н., Раскин Е.М. Реализация системы регулирования с нечеткой компенсацией статической ошибки в среде автоматизированного проектирования Terrol // Автоматизация в промышленности. 2012. № 8. С. 33-38.
4. Денисова Л.А., Мещеряков В.А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования с использованием ГА//Автоматизация в промышленности. 2012. №7. - С. 34-38.
5. Дьяконов В. П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель. — М.: ДМК Пресс, 2008. - 768 с.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Уч. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд. МГТУ им Н.Э. Баумана. 2004.
7. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач:—М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 256 с.
8. Денисова Л.А. Многокритериальная оптимизация на основе генетических алгоритмов при синтезе систем управления: Омск: Изд. ОмГТУ, 2014. 172 с.
9. Deb K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2001. 518 p.

*Денисова Людмила Альбертовна — канд. техн. наук, доцент Омского государственного технического университета (ОмГТУ), старший научный сотрудник ЗАО «Автоматика-Э», Мещеряков Виталий Александрович — д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Информатика и информационные технологии» Омского филиала Финансового университета при Правительстве РФ (Омский филиал Финуниверситета).*

#### Компании GE и PTC сформировали стратегический альянс для реализации проекта Brilliant Factory

Компании GE и PTC объявили о совместной разработке нового производственного решения под брендом GE, объединяющего производственные системы GE и возможности среды создания промышленных приложений IoT на базе платформы PTC ThingWorx. Это специализированное промышленное решение будет включать гибкие информационные панели и мощные средства анализа данных. В частности, оно сможет подключаться к различным системам (от производственного цеха до системы управления ресурсами предприятия ERP), обеспечивая оптимизированную информационную панель, вид которой будет зависеть от роли, определенной для пользователя, а благодаря возможностям перетаскивания управление будет максимально комфортным и интуитивным.

Компании GE и PTC объединят свои ресурсы в области продаж и маркетинга для совместного продвижения нового решения под брендом GE по всему миру. Поскольку GE является одной из крупнейших в мире производственных компаний, она внедрит решение GE-PTC на собственных производственных предприятиях в рамках проекта Brilliant Factory.

Проект Brilliant Factory объединяет инженерные и производственные решения, позволяющие использовать различные данные для значительного повышения производительной эффективности предприятий и оптимизации всей цепочки поставок. Этот проект позволяет представлять данные в четком и простом для восприятия формате, что дает возможность принимать важные решения, увеличить время

бесперебойной работы оборудования и предугадывать, когда понадобится техническое обслуживание.

Использование технологий PTC ThingWorx в составе портфолио GE для производства открывает широкие возможности оптимизации производства, а также предоставляет:

- информационные панели для производственных процессов с доступом на основе ролей, позволяющие отслеживать ключевые показатели эффективности (KPI) в реальном времени;
- стандартизированную модель KPI для всех производственных площадок, взаимодействующую с разнородным системным ландшафтом предприятия;

- возможность совместной работы, предупреждения, уведомления и доступа к актуальным данным для принятия более взвешенных решений.

Производственные предприятия мирового уровня компании GE стали площадкой для тестирования этой технологии. Сейчас объединенная команда специалистов компаний GE и PTC намерена создать надежное модульное решение для производителей, которые остро нуждаются в оптимизации при помощи цифровых технологий.

Компании PTC и GE совместно работают над сертификацией ThingWorx для использования в экосистеме облачной платформы Predix. Эти две компании связаны крепкими партнерскими взаимоотношениями. Ранее они уже работали совместно над решением, которое помогает производителям упростить переход от проектирования изделия к его производству.

[Http://www.gesoftware.com](http://www.gesoftware.com) и [ru.ptc.com](http://ru.ptc.com)