

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ: РАЗРАБОТКА И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Л.А. Денисова (ОмГУ), В.А. Мещеряков (СибАДИ)

Рассмотрены вопросы проектирования, разработки и исследования систем автоматического регулирования (САР) технологических процессов объектов теплоэнергетики. Представлен подход к многокритериальной оптимизации с использованием генетических алгоритмов, положенный в основу инструментария программного комплекса. Реализовано сведение многоцелевой задачи к задаче с единым критерием, позволяющее сократить трудоемкость определения оптимальных параметров САР и учитывать ограничения при поиске оптимального решения.

Ключевые слова: математическая модель, автоматическое регулирование; контроллер, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм.

Введение

В процессе разработки и оптимизации систем автоматического регулирования (САР), являющихся неотъемлемой частью АСУТП объектов теплоэнергетики, необходимо учитывать разнообразный комплекс требований, обусловленных особенностями функционирования объектов. В связи с тем, что предъявляемые к САР требования являются противоречивыми, возникает необходимость в использовании нескольких показателей качества функционирования систем. Поэтому для создания системы, удовлетворяющей предъявляемым требованиям, должна ставиться задача ее многокритериальной оптимизации. Решение задачи оптимизации САР осуществляется на основе известного и эффективного подхода Парето—оптимизации, при реализации которого выполняется построение множества Парето-оптимальных решений, не улучшаемых одновременно по всем рассматриваемым критериям [1, 2].

В работе представлены результаты проектирования САР на базе выносных локальных регуляторов (контроллеров) ВЛР-2, разработанных в ООО "Автоматика-Э" (г. Омск) [3, 4]. Контроллеры ВЛР-2 в составе программно-технических комплексов АСУТП предназначены для работы на объектах тепловой и атомной энергетики, где в настоящее время проводится модернизация средств автоматизации.

Для разработки алгоритмического и программного обеспечения контроллеров создан программный комплекс на базе интерактивной среды для научных и инженерных расчетов MATLAB с пакетами расширения Simulink и Global Optimization Toolbox [5], содержащий средства моделирования управляемых ТП, анализа устойчивости и оптимизации САР с использованием генетических алгоритмов (ГА).

Описание программного комплекса для проектирования и оптимизации САР

На рис. 1 приведена функциональная структура программного комплекса, предназначенного для проектирования и отладки программно-алгоритмического обеспечения САР. Программный комплекс, реализованный средствами MATLAB/Simulink/Global Optimization Toolbox, позволяет выполнять моделирование и оптимизацию САР, расчет устойчивости контуров регулирования, а также визуализацию полученных результатов [3, 4, 6, 7].

Математические модели, учитывающие динамические характеристики САР и действие случайных возмущений, построены на основе архивной информации о технологических параметрах в существующих системах управления энергоблоков [3, 6]. Кроме того, при создании динамических стохастических моделей объектов управления приняты во внимание свойственные им нелинейности.

Программные модули, выполняющие многокритериальную оптимизацию САР, реализованы с использованием методов Парето-аппроксимации на основе ГА [8, 9]. Исходя из частных требований, формируется обобщенный критерий качества системы управления, экстремальное значение которого соответствует оптимальному построению системы. С использованием обобщенного критерия осуществляется оптимизация САР с учетом ограничений на область поиска параметров. При оптимизации систем процедурами управления моделированием выполняются многократные вызовы Simulink-модели САР, а найденные оптимальные параметры настройки сохраняются для последующего анализа.

На основе разработанных моделей САР и с использованием результатов оптимизации выполняется анализ устойчивости контуров регулирования и определение области отсутствия автоколебаний. Для применения аналитических методов анализа устойчивости производится аппроксимация применяемых в системах релейно-импульсных регуляторов линейными регуляторами. Выполняется формирование моделей в виде передаточных функций для вычисления полюсов замкнутых систем и построения частотных характеристик, позволяющих оценить запасы устойчивости.

С целью контроля процесса проектирования созданы программные модули визуализации для отображения результатов оптимизации, построения графиков временных и частотных характеристик, а также областей допустимых параметров САР.

В статье представлен пример использования программного комплекса для разработки программно-алгоритмического обеспечения контроллера ВЛР-2, предназначенного для САР типового объекта автоматизации — канала регулирования давления пара в деаэраторе турбинного отделения энергоблока АЭС.

Особенностями регулирования давления пара в деаэраторе является то, что, с одной стороны, для

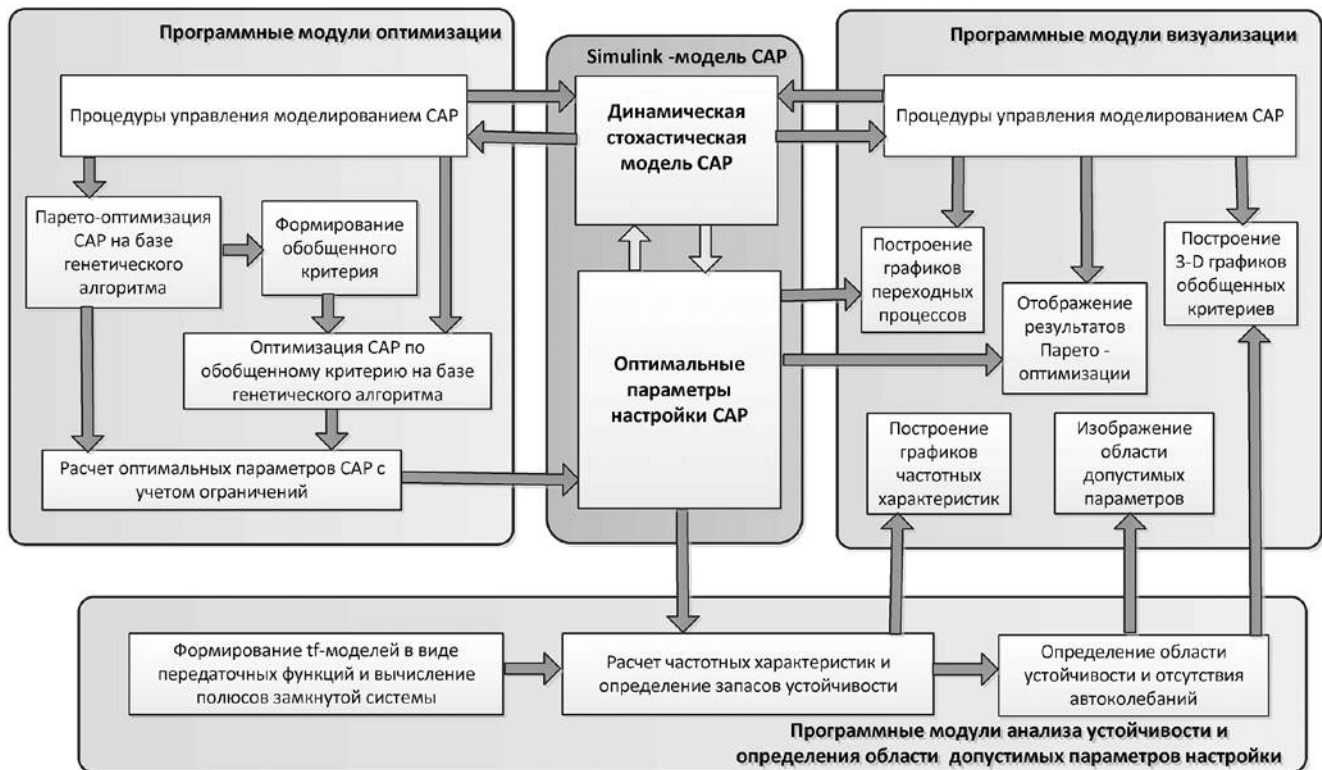


Рис. 1. Структура программного комплекса для проектирования и оптимизации САР

регулируемого параметра характерны случайные пульсации, которые при значительном коэффициенте передачи регулятора могут приводить к частым срабатываниям исполнительного механизма (ИМ).

С другой стороны, для эффективного управления процессом при настройке системы часто стремятся увеличить коэффициент передачи регулятора в связи с малой пропускной способностью регулирующего клапана, установленного на притоке пара в деаэрактор. Однако увеличение коэффициента передачи системы может вызвать возникновение автоколебаний, сопровождаемых частыми реверсивными включениями ИМ. Поэтому при настройке контроллера (эмпирическим путем) сложно понять, по какой именно причине возникли частые срабатывания ИМ (из-за пульсаций давления или автоколебаний), чтобы их устранить и получить требуемое качество управления.

Проектирование САР с использованием описанного программного комплекса позволяет не только решить эту проблему (учитывая ограничения, налагаемые на параметры), но и оптимизировать процесс управления по принятым критериям, повысив эффективность управления.

Математическая модель системы регулирования давления

Регуляторы ВЛР-2 в составе САР, предназначенные для регулирования давления и предотвращения снижения давления пара в деаэракторе при требовании на срабатывание, формируют управляющие воздействия на электроприводы регулирующих клапанов.

В среде MATLAB/Simulink разработана математическая модель САР давления пара в деаэракторе (рис. 2), которая в свою очередь содержит модели: регулятора (controller), регулирующего клапана с ИМ (control valve) и объекта управления (control object). Сигнал рассогласования на входе в регулятор давления формируется как разница между сигналами заданного и текущего значений давления. Демпфирование входного сигнала давления осуществляется с помощью инерционного звена (damping).

В регуляторе используется традиционный способ регулирования, применяемый в системах регулирования теплоэнергетических процессов с ИМ постоянной скорости. Основой алгоритма регулирования является релейно-импульсный пропорционально-дифференциальный преобразователь, представляющий собой два двухпозиционных релейных звена с зоной нечувствительности и гистерезисом, охваченных общей обратной связью в виде инерционного звена. Звено в обратной связи имеет передаточную функцию $W_{oc}(s) = \frac{1/k_p}{T_u s + 1}$, где k_p — коэффициент пере-

дачи; T_u — постоянная времени интегрирования. Выходными сигналами реализованного таким образом релейно-импульсного регулятора являются импульсы, поступающие на ИМ для открытия/закрытия регулирующего клапана. Регулятор совместно с ИМ постоянной скорости приближенно реализует пропорционально-интегральный закон регулирования.

Регулирующий клапан, снабженный ИМ, представлен усилительным звеном для реализации коэф-

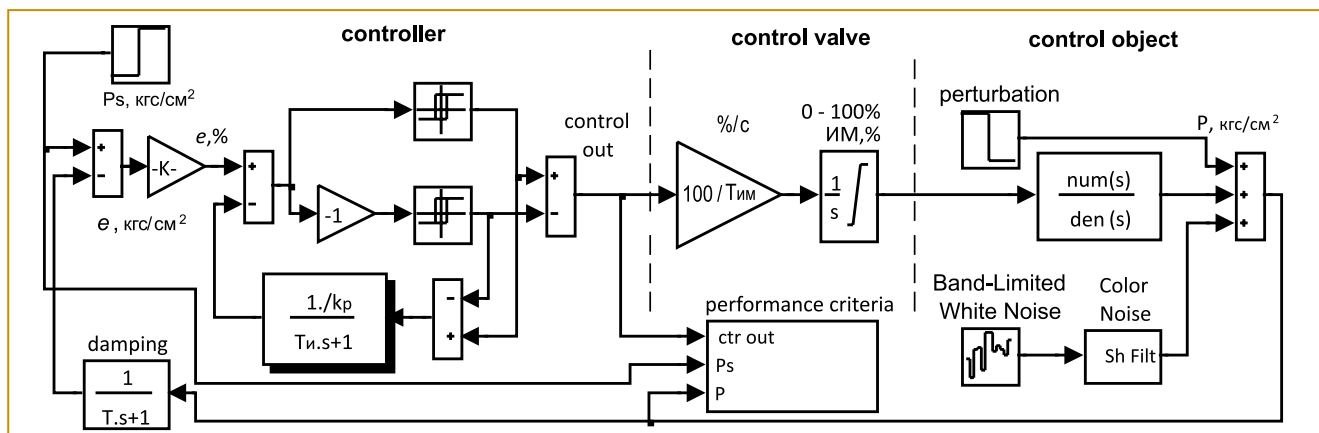


Рис. 2. Схема математической модели САР в среде MATLAB/Simulink

фициента передачи ($100\% \text{откр}/T_{\text{ИМ}}$), учитывающим время открытия клапана, и интегрирующим звеном с ограничением в диапазоне $0 \dots 100\%$ открытия по указателю положения.

Объект управления (канал «положение регулирующего клапана — давление в деаэраторе») представлен инерционным звеном. Для моделирования случайных изменений давления в деаэраторе на основе исходных данных, полученных с энергоблока, реализован формирующий фильтр, генерирующий случайный сигнал с требуемой автокорреляционной функцией [7]. Случайные возмущения (пульсации) давления формируются фильтром Shaping Filter, выход которого суммируется с выходом инерционного звена. При этом генерация входного нормально распределенного белого шума производится с помощью блока Band-Limited White Noise.

Основными параметрами настройки САР являются коэффициент передачи регулятора k_p и постоянная времени интегрирования $T_{\text{и}}$. (содержащее параметры звено на рис. 2 выделено тенью). Выбор указанных параметров осуществлялся при оптимизации.

При моделировании также выполняется расчет интегральных показателей качества работы САР (performance criteria). За период T (не менее длительности переходного процесса) вычисляются квадратичные интегральные критерии: $\bar{F}_1(X) = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt$,

которые характеризуют величину и длительность существования ошибки регулирования $\varepsilon(t)$ (отклонения регулируемого параметра от заданного значения), и критерий $\bar{F}_2(X) = \int_0^T u^2(t) dt$, учитывающий за-

траты на управление (u — выходной сигнал регулятора). Также за указанный временной интервал считается число импульсов N , формируемых регулятором (срабатываний ИМ регулирующего клапана): $\bar{F}_3(X) = N$. В связи с тем, что критерии имеют разные диапазоны изменения, для приведения к диапазону $0 \dots 1$ они нормализованы по формуле

$F_i(X) = \bar{F}_i(X) / \bar{F}_i^{\text{max}}$, $i = \overline{1,3}$, где $\bar{F}_i^{\text{max}} = \max \bar{F}_i(X)$. При моделировании вычисляются критерии $\bar{F}_i(X)$, $i = \overline{1,3}$ и полученный на их основе обобщенный интегральный критерий.

Следует отметить, что при разработке САР, кроме того, учтены налагаемые на соотношения параметров k_p и $T_{\text{и}}$ ограничения, связанные с возможностью возникновения автоколебаний из-за наличия нелинейностей в структуре релейно-импульсного регулятора, а также обратной связи, охватывающей релейные звенья. При определенном отношении $\Delta_{\text{в}} / \Delta$ (зоны возврата к зоне нечувствительности релейной характеристики) каждому значению постоянной интегрирования $T_{\text{и}}$ соответствует критическое отношение $(k_p T_{\text{и}} / \Delta)_{\text{крит}}$ (определяется экспериментально). Для отсутствия автоколебаний необходимо выполнение условия $G(X) = G(k_p, T_{\text{и}}) = k_p T_{\text{и}} / \Delta - (k_p T_{\text{и}} / \Delta)_{\text{крит}} < 0$.

Необходимо выполнить оптимизацию САР давления, то есть найти такие значения параметров $X = (k_p, T_{\text{и}})$, которые при учете ограничения $G(X) < 0$ минимизируют принятые показатели $F_i(X)$, $i = \overline{1,3}$ для обеспечения быстродействия и точности регулирования, отсутствия перерегулирования, а также уменьшения числа срабатываний ИМ.

Оптимизация параметров САР

Как показал предшествующий опыт проектирования [6, 7], минимальные значения частных критериев достигаются при различных параметрах настройки, что говорит о необходимости достижения компромисса между критериями. Одновременная минимизация критериев $F_i(X)$, $i = \overline{1,3}$ соответствует построению множества Парето-оптимальных решений, то есть таких допустимых решений, которые не могут быть улучшены ни по одному из имеющихся критериев без ухудшения по какому-то хотя бы одному другому критерию. Получение множества Парето решений еще не является окончательным решением, так как необходимо получить не несколько, а одно предпочтительное решение (вариант параметров САР). Поэтому после того, как множество Парето решений получено, необходимо его сузить [1, 10].

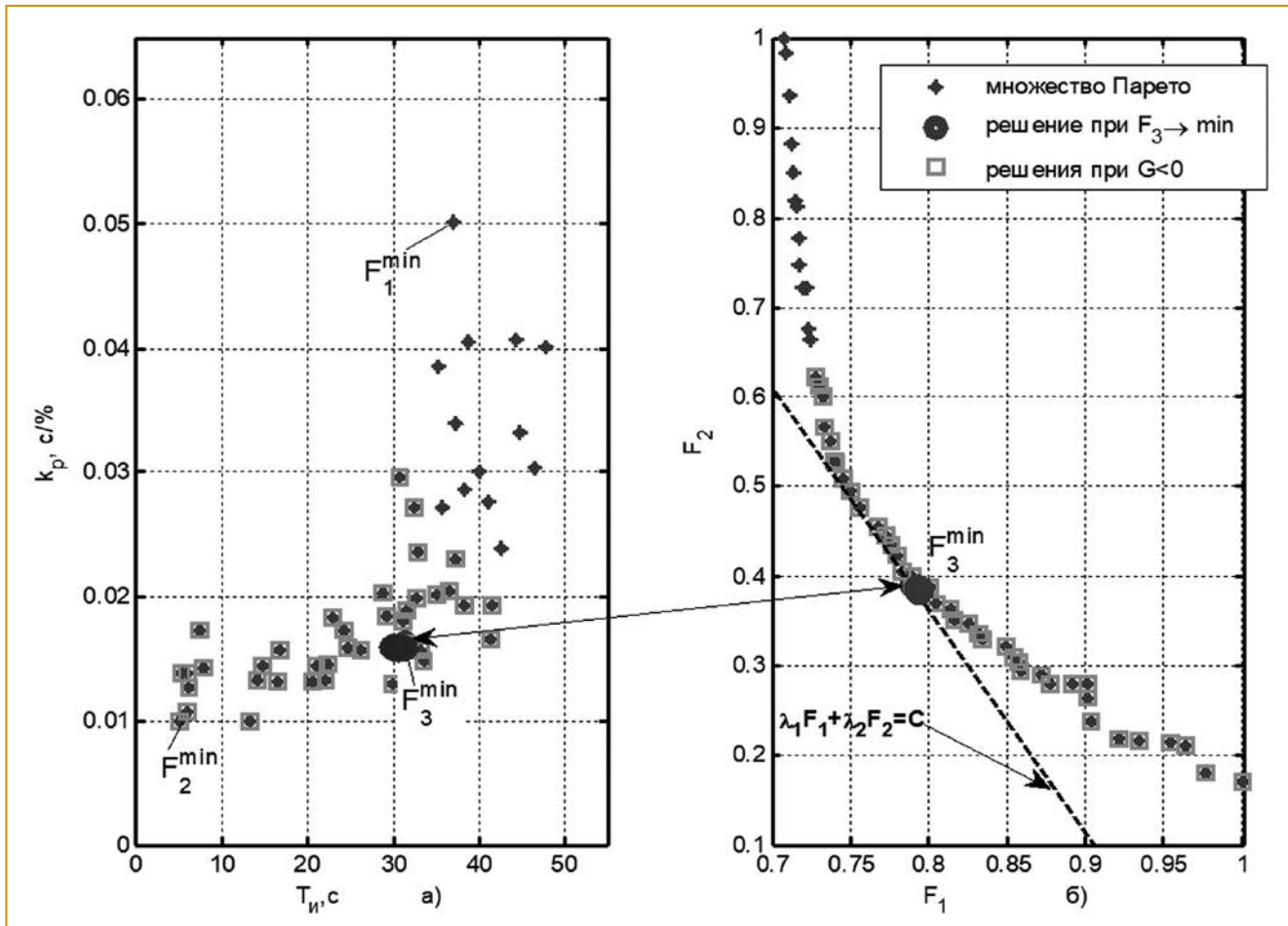


Рис. 3. Отображение параметрического пространства в критериальное при оптимизации САР с помощью ГА: а) множество Парето-решений для параметров; б) множество Парето для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$

Для определения оптимальных параметров САР в рассматриваемом программном комплексе реализован подход, предложенный и опробованный при оптимизации релейно-импульсных регуляторов для случаев, когда на параметры настройки не налагались ограничения [4, 6]. Рассмотрим поэтапное решение задачи многокритериальной оптимизации САР на основе предлагаемого подхода с учетом налагаемого ограничения.

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 принципу Эджворта-Парето [1, 2] 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. Так как множество Парето-оптимальных решений еще не является окончательным решением, то необходимо осуществить его сужение: учесть ограничение, накладываемое на параметры САР.

Поэтому на *третьем этапе* из рассмотрения исключаются те варианты решения (векторы пара-

метров), которые не удовлетворяют ограничению $G(X) < 0$.

На заключительном, *четвертом этапе* для выбора единственного варианта параметров САР в качестве дополнительного вводится критерий $F_3(X)$, минимальное значение которого отыскивается среди суженного с учетом ограничения $G(X) < 0$ множества Парето решений, полученных по критериям $F_1(X)$ и $F_2(X)$.

Для построения множества Парето-оптимальных решений использован метод Парето-аппроксимации на основе ГА. Генетический алгоритм [8, 9] 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. Специфическими для задачи построения множества Парето являются операции вычисления пригодности индивида и селекции для сходимости к фронту Парето. Построение множества Парето решений и моделирование исследуемой САР выполнялось с помощью m-файлов — сценариев на языке MATLAB в составе программного комплекса, осуществляющих многократные вызовы

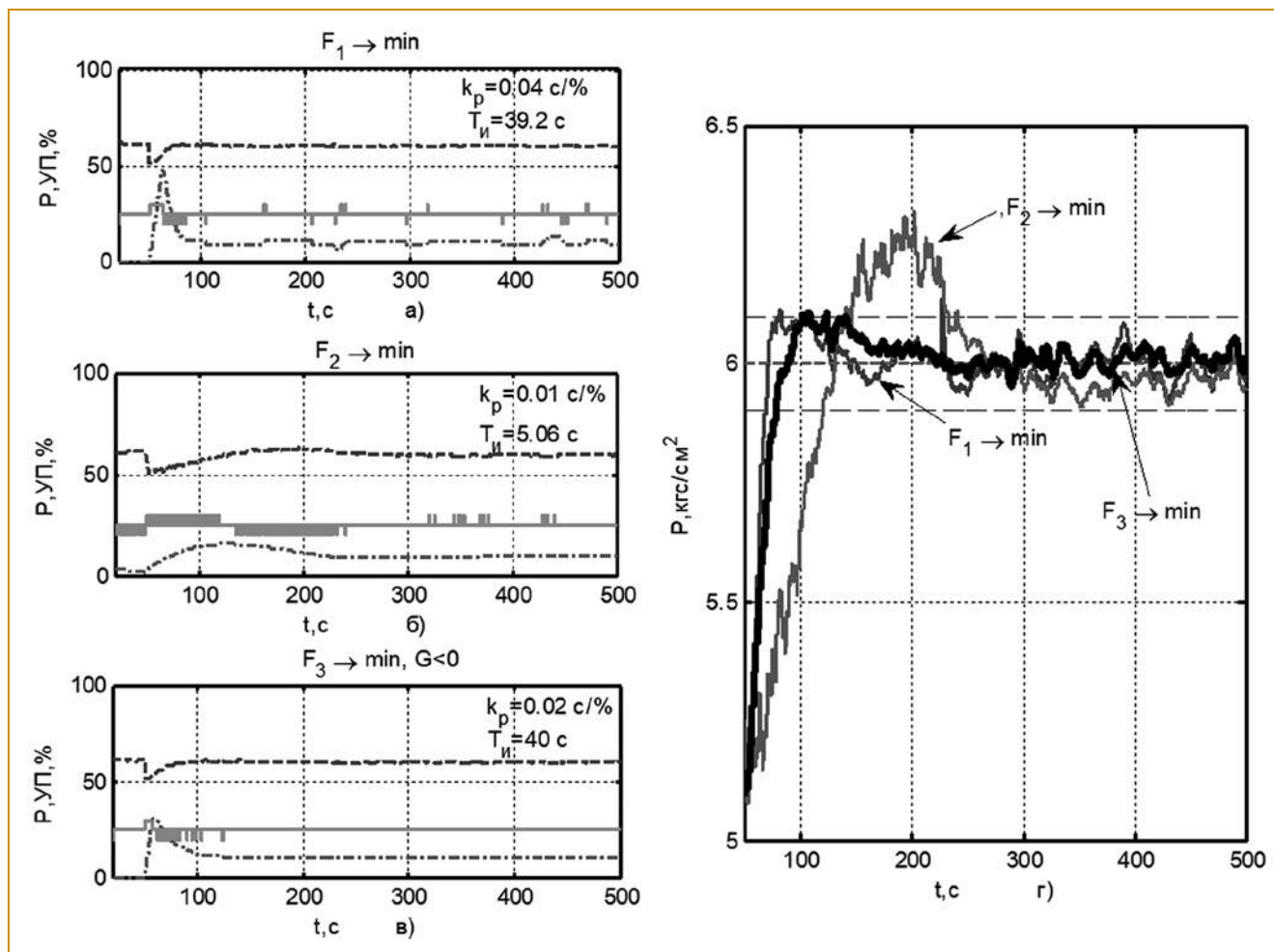


Рис. 4. Переходные характеристики САР при определении минимума $F_3(X)$ среди множества Парето критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$

Simulink-модели (рис. 2), установку необходимых опций ГА и контроль выполнения оптимизации. Поиск множества Парето решений выполнялся функцией *gamultiobj* многоцелевого ГА, реализованного на основе известного алгоритма Парето-аппроксимации NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) [9]. Алгоритм NSGA-II имеет механизм включения особей 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.

На каждом шаге работы алгоритма рассматривался вектор параметров $X=(k_p, T_{и})$ и соответствующие ему значения критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$. В связи с тем, что начальная популяция формируется с использованием генератора случайных чисел, выполнялись несколько реализаций расчетов и выбирались лучшие из полученных решений. Для получения результатов требовалось 5...15 поколений ГА. При этом число особей в популяции генетического алгоритма устанавливалось в диапазоне 30...150. Значения параметров САР выбирались из принятых диапазонов $k_p \in [0, 01; 1]$, $T_{и} \in [1; 70]$.

Результат оптимизации для одной из реализаций решения двухкритериальной задачи с использованием основных критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$ приведен на рис. 3. Отображение плоскости параметров (множества Парето решений, рис. 3а) осуществлено на критериальную плоскость (множества Парето критериев, рис. 3б). Особи ГА (аппроксимация множества Парето критериев и соответствующее множество Парето решений) изображены в виде звездочек. Точки суженного множества Парето решений (удовлетворяющие ограничению $G(X)<0$) и соответствующего множества векторных критериев обведены квадратами. В результате привлечения дополнительного критерия $F_3(X)$ из суженного множества точек Парето-оптимальных параметров САР выбрано единственное решение (выделено кружком), соответствующее минимуму критерия $F_3(X)$.

Для полученных значений параметров САР построены графики переходных характеристик при возмущении значением регулируемого давления (минимизации критериев $F_1(X) \dots F_3(X)$ соответствуют рис. 4а — 4в). На графиках штриховая кривая соответствует давлению, штрихпунктирная — положению регулирующего клапана, а непрерывная — импульс-

ному выходу регулятора. Для наглядности на рис. 4г сведены графики переходных процессов в увеличенном масштабе для всех трех случаев. Как можно видеть на рис. 4а, переходный процесс при минимальном значении критерия $F_1(X)$ характеризуется наличием автоколебаний (так как соответствующая точка не входит во множество точек, удовлетворяющих ограничению $G(X) < 0$), рис. 3). Переходный процесс при минимальном значении $F_2(X)$ не только характеризуется значительным числом срабатываний ИМ (рис. 4б), но и имеет перерегулирование, а также затянут во времени (рис. 4г.).

В то же время САР с параметрами, полученными при нахождении минимума критерия $F_3(X)$ среди суженного множества Парето-решений для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$ с учетом ограничения $G(X) < 0$, имеет значительно лучшие динамические характеристики (рис. 4в). Видно, что переходный процесс характеризуется не только отсутствием перерегулирования и быстроедействием (рис. 4г.), но и меньшим числом срабатываний регулятора без автоколебаний (рис. 4в). Следует отметить, что во всех выполненных с использованием этого подхода реализациях наблюдалось высокое качество регулирования.

На основе полученных результатов многоцелевая задача оптимизации САР сведена к задаче с единым критерием. Преобразование многокритериальной задачи в однокритериальную выполнено с использованием следующего подхода, апробированного при синтезе САР [8]. Выбор во множестве Парето сведен к выбору весовых коэффициентов λ_i для частных критериев линейной свертки $J(X) = \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i(X)$, $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$; $\lambda_i \geq 0$; $i = 1, m$.

В качестве скалярного критерия принимается выражение $J(X) = \lambda_1 F_1(X) + \lambda_2 F_2(X)$. 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. 3б) должен касаться фронта Парето в точке решения (при $F_3 \rightarrow \min$), а ее наклон определяться соотношением весов λ_i , $i = 1, 2$. В связи со сложностью построения касательной к аппроксимации фронта Парето, имеющей разрывный характер, вместо касательной строится ближайшая к ней секущая так, чтобы все точки аппроксимации Парето оказывались не ниже этой прямой. Если точки аппроксимации оказывались по обе стороны прямой (невыпуклый фронт Парето), отыскивалась новая точка, чтобы все точки аппроксимации фронта Парето находились не ниже построенной через нее прямой. Параметры найденной прямой (λ_i , $i = 1, 2$) принимались в качестве искомым весовых коэффициентов скалярного критерия.

Для практического использования обобщенный критерий принимается в форме, позволяющей учитывать диапазоны изменения параметров, входящих в частные критерии. Основные показатели $\bar{F}_1 = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt$ и $\bar{F}_2 = \int_0^T u^2(t) dt$ (вместо нормированных

Наука есть не только знание, но и сознание, т. е. умение пользоваться знанием как следует.

Василий Ключевский

критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$) сведены в выражение скалярного критерия: $J(X) = \int_0^T [\varepsilon^2(t) + (\lambda u(t))^2] dt$. Первое

слагаемое в подынтегральном выражении характеризует точность на всем интервале управления, а второе — определяет совокупные расходы на управление. Весовой коэффициент при втором слагаемом с учетом соотношения весов λ_i , $i = 1, 2$: $\lambda^2 = \frac{\lambda_2 F_1 \bar{F}_1^{\max}}{\lambda_1 F_2 \bar{F}_2^{\max}}$.

Полученный обобщенный критерий пригоден для принятия обоснованных решений при синтезе САР. Следует отметить, что хотя критерии такого вида широко применяются при оптимизации САР [11, 12], они не всегда рекомендуются к использованию, так как весовые коэффициенты для частных показателей определяются чаще всего субъективно. Поэтому предлагаемый подход к выбору весовых коэффициентов скалярного критерия может найти применение при решении задач оптимизации систем управления различными объектами.

Оптимизация САР при постановке задачи как однокритериальной является менее трудоемкой операцией, и, кроме того, для ее решения могут применяться методы поиска параметров, позволяющие непосредственно при оптимизации учитывать ограничения, налагаемые на область поиска.

Полученные при оптимизации параметры настройки регуляторов давления принимались в качестве исходных данных для исследования устойчивости и возможности возникновения автоколебаний в контуре регулирования. Проведенный анализ подтвердил достаточные запасы устойчивости системы с найденными оптимальными параметрами для обеспечения технологической работоспособности. Определенный интерес представляют исследования возможностей возникновения автоколебаний в контуре с релейно-импульсным регулятором. В условиях нормальной эксплуатации автоколебания недопустимы, так как вызывают опасность перегрева электродвигателя ИМ от частых реверсивных включений.

Исследование области автоколебаний САР

Исследование области автоколебаний САР проведено при оптимизации на основе скалярного критерия $J(X) = J(k_p, T_u)$. Осуществляется поиск параметров k_p и T_u , доставляющих минимум функционалу качества J , с помощью m -файла, выполняющего многократные вызовы модели САР с передачей параметров в генетический алгоритм. Поиск минимума выполняется процедурой ga , а создание структуры

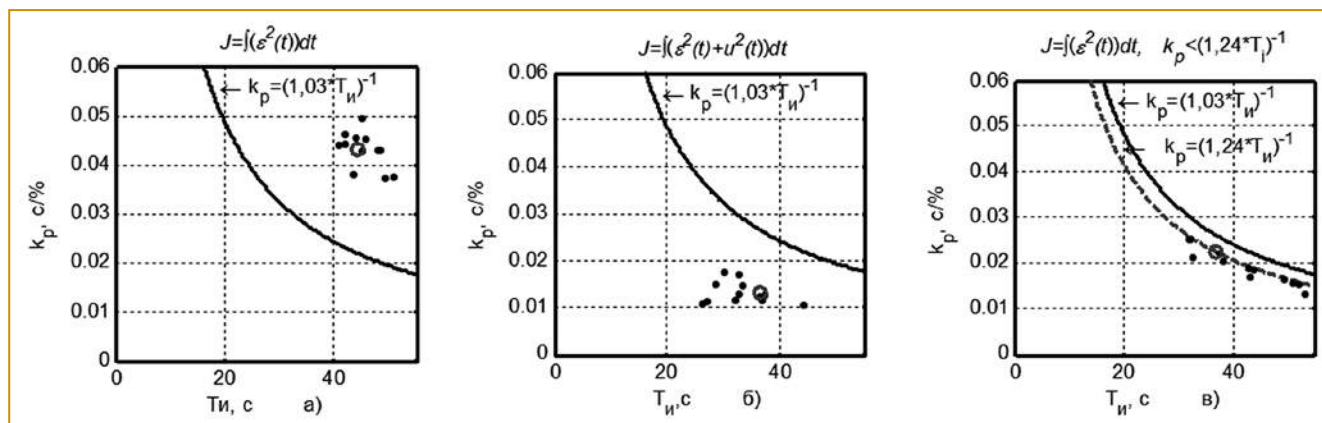


Рис. 5. Исследование области автоколебаний САР при минимизации критерия $J(k_p, T_u) = \int_0^T [\varepsilon^2(t) + (\lambda u(t))^2] dt$: а) при $\lambda = 0$, без учета ограничений; б) при $\lambda = 1$; в) при $\lambda = 0$, с учетом ограничения $G(k_p, T_u) < 0$

опций ГА — оператором *gaoptimset*. Значения параметров ГА устанавливались следующие: число особей в популяции 15...50; число поколений 3...5; начальные значения параметров случайным образом выбирались из принятых диапазонов.

Нелинейное ограничение ГА, характеризующее область отсутствия автоколебаний, задано неравенством $G(k_p, T_u) < 0$. При этом граница автоколебаний для принятого отношения зоны возврата к зоне нечувствительности релейной характеристики регулятора $\Delta_b / \Delta = 0,3$ является гиперболой $k_p = (1,03T_u)^{-1}$. На рис. 5а - 5в граница показана непрерывной кривой: при выборе параметров настройки правее границы в системе наблюдаются автоколебания.

Рассмотрены варианты определения параметров при минимизации критерия $J(k_p, T_u) = \int_0^T [\varepsilon^2(t) + (\lambda u(t))^2] dt$,

отличающиеся весовым коэффициентом λ , значение которого выбиралось из полученного при моделировании диапазона $\lambda \in [0,5; 1,5]$. Для случаев, представленных на рис. 5а и 5б, ограничения на область поиска экстремума не накладывались. Результаты приведены для 12 реализаций каждого варианта. Особи генетического алгоритма (параметры настройки) показаны точками и для лучших реализаций (каждого варианта) выделены кружками.

Так, на рис. 5а показан случай минимизации критерия, не учитывающего затрат на управление ($\lambda=0$). Видно, что полученные значения параметров сосредоточены в области автоколебаний. При учете затрат на управление и минимизации критерия

$$J(k_p, T_u) = \int_0^T [\varepsilon^2(t) + u^2(t)] dt \quad (\lambda=1, \text{ рис. 5б})$$

оптимальные параметры для всех реализаций находятся в области отсутствия автоколебаний. На рис. 5в приведен результат минимизации критерия $J(k_p, T_u) = \int_0^T \varepsilon^2 dt$ (без затрат

на управление) с учетом ограничения $G(k_p, T_u) < 0$ (сравнить с рис. 5а). Для этого случая в качестве границы автоколебаний, параметры которой вводились в ГА, при-

нималась штриховая линия $k_p = (1,24T_u)^{-1}$ (коэффициент в скобках увеличен на 20% от исходного значения для обеспечения запаса в связи с возможными неточностями модели). Как видно, особи ГА (параметры настройки) располагаются вдоль границы автоколебаний.

Таким образом, из рис. 5 видно, что введение весового коэффициента λ в выражении критерия, то есть учет затрат на управление, приводит к устранению возможных автоколебаний. Но следует иметь в виду, что точность поддержания заданного значения регулируемого параметра при этом снижается. Поэтому принято значение $\lambda=1$ для скалярного критерия, обеспечивающее технологическую работоспособность САР: точность регулирования и отсутствие автоколебаний.

Рис. 6 иллюстрирует процесс оптимизации САР с учетом ограничения (для лучшей из выполненных реализаций в соответствии с рис. 5в). Динамику изменения показателя качества для лучших особей и его усредненного значения по популяции ГА можно проследить на рис. 6а. Для получения оптимальных параметров потребовалось всего три поколения: рис. 6а иллюстрирует сходимость алгоритма. На рис. 6б приведены столбцовые графики элементов вектора оптимальных параметров $X_{\text{opt}} = (k_p, T_u)$. Переходные процессы в САР с оптимальными параметрами, полученными для этой реализации, приведены на рис. 6в. Представлен расчет для возмущенного режима работы САР: при снижении давления пара на 10% от номинального значения на 50-й секунде. Из графиков видно, что снижение давления отрабатывается регулятором, положение клапана в рабочем диапазоне меняется на 30% указателя положения (2) за несколько включений ИМ (3). Давление в деаэраторе (1) поддерживается на требуемом уровне.

Таким образом, выполнена многокритериальная оптимизация САР с использованием средств моделирования и оптимизации программного комплекса. Реализовано сведение исходной многоцелевой задачи к задаче с единым критерием, позволяющим сделать менее трудоемким процесс определения оптимальных параметров (при необходимости выполнения оптимизации

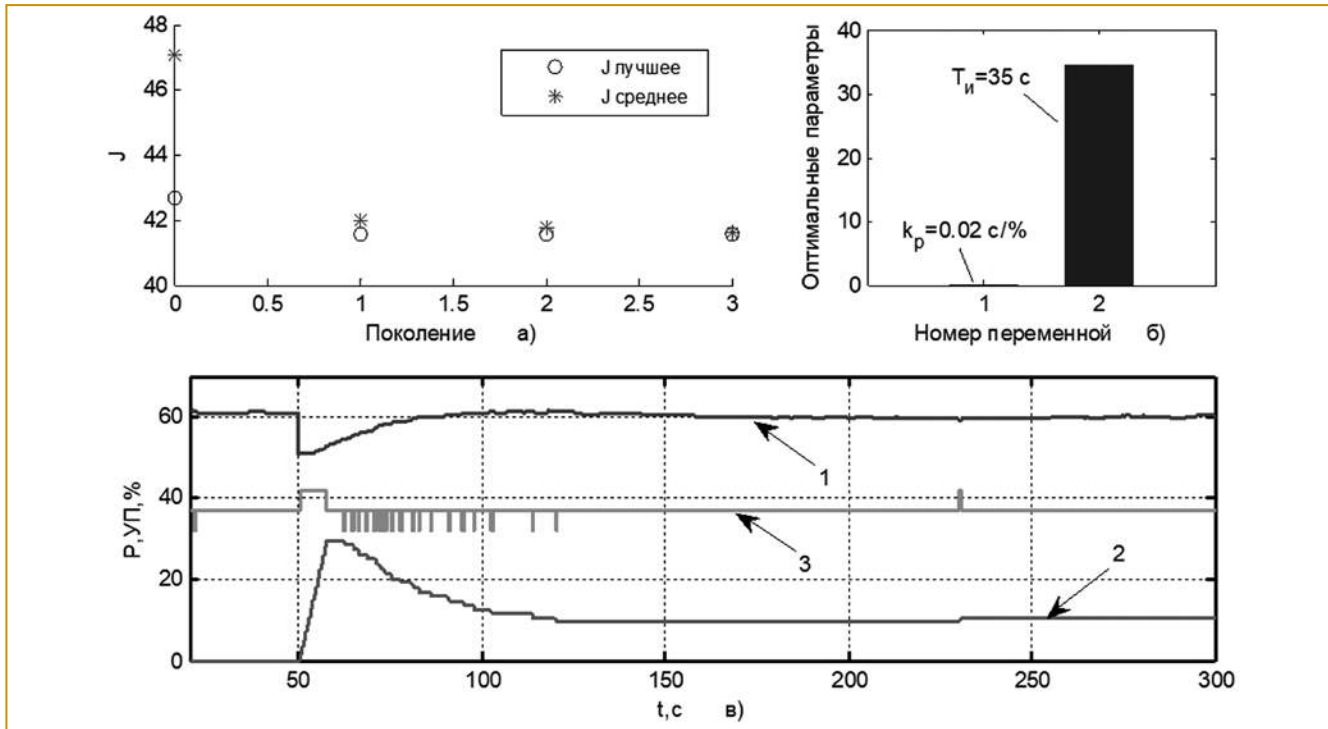


Рис. 6. Оптимизация САР по скалярному критерию с помощью ГА для одной из реализаций: а) динамика изменения показателя качества; б) вектор оптимальных параметров; в) переходные процессы при оптимальных параметрах САР

САР непосредственно на объекте управления), учитывать ограничения на область поиска оптимального решения, а также контролировать результат решения оптимизационной задачи с привлечением средств визуализации.

Заключение

В результате проведенных исследований сделан вывод, что предлагаемые подходы к многокритериальной оптимизации систем регулирования на основе ГА повышают эффективность разработки алгоритмического и программного обеспечения контроллеров.

Автоматизация проектирования, реализованная средствами программного комплекса, позволяет оптимизировать процесс управления по принятым критериям и значительно уменьшить временные затраты на предварительную настройку систем регулирования объектов теплоэнергетики.

Список литературы

1. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 256 с.
2. Noghin V. Generalized Edgeworth-Pareto Principle/ Computational Mathematics and Mathematical Physics 55 (12), pp.1975-1980, 2015.
3. Денисова Л.А. Моделирование и оптимизация системы регулирования питания парогенератора энергоблока АЭС//Автоматизация в промышленности. 2013. № 7. С. 14-19.
4. Денисова Л.А., Мещеряков В.А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования с использованием генетического алгоритма // Автоматизация в промышленности. 2012. №7. С. 34-38.
5. Дьяконов В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. - 768 с.
6. Денисова Л.А. Многокритериальная оптимизация на основе генетических алгоритмов при синтезе систем управления: Омск: Изд. ОмГТУ, 2014. 172 с.
7. Denisova L., Meshcheryakov V. Synthesis of a Control System Using the Genetic Algorithms / IFAC-PapersOnLine, vol. 49, issue: 12, pp: 156-161, 2016.
8. Холланд Дж. Генетические алгоритмы // В мире науки, 1992. № 9. С. 32-40.
9. Deb K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2001. 518 p.
10. Noghin V. Reducing the Pareto Set Based on Set-point Information // Scientific and Technical Information Processing 38 (6). 2011. pp. 435-439.
11. 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.
12. Дорф Р., Бишон Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний. 2002. 832 с.

Денисова Людмила Альбертовна – д-р техн. наук, проф. Омского государственного технического университета (ОмГТУ), старший научный сотрудник ООО «Автоматика-Э»,

Мещеряков Виталий Александрович – д-р техн. наук, проректор по информационным технологиям Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ).

Контактные телефоны: (381-2) 65-20-84, (381-2) 20-45-58.

E-mail: denisova@asoiu.com, vamescheryakov@fa.ru