



## ВВЕДЕНИЕ

Традиционно обсуждение темы моделирования ТП проходит на страницах журнала «Автоматизация в промышленности» в июльских номерах. В этом году в №7 авторы представили решения для металлургии, энергетики, нефтехимии и нефтепереработки, машиностроения, транспорта, пищевой промышленности. Кроме того, была рассмотрена тема использования моделирования в задачах инжиниринга человеческого ресурса.

Несомненным доказательством актуальности моделирования в современной промышленной автоматиза-

ции является большое число публикаций по этой теме. В настоящем номере журнала мы продолжаем обсуждать моделирование ТП.

Полученные авторами результаты сгруппируем по областям применения: энергетика (Л.А. Денисова), металлургия (М.В. Усачев и др.), нефтехимия (А.В. Сухарев и др.), алюминиевая промышленность (О.В. Ершова и др.).

Благодарим всех авторов раздела и ожидаем Ваши новые работы в следующие тематические номера.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Л.А. Денисова (ОмГТУ)

*Предлагаются подходы к выполнению параметрического синтеза системы автоматического регулирования по выбранным показателям качества с использованием генетического алгоритма, осуществляющего аппроксимацию множества Парето-оптимальных решений. Представлены результаты многокритериальной оптимизации параметров системы, полученные средствами MATLAB / Global Optimization Toolbox.*

*Ключевые слова: математическая модель, параметрический синтез, цифровая система автоматического регулирования, многокритериальная оптимизация, множество Парето, генетический алгоритм.*

### Введение

Повышение требований к системам автоматического регулирования (САР) влечет за собой необходимость совершенствования методов автоматизации их проектирования и оптимизации. Ввиду противоречивости предъявляемых к САР требований и налагаемых технологических ограничений неизбежно возникает необходимость в использовании нескольких показателей качества функционирования систем. Следовательно, задача оптимизации построения САР должна быть поставлена и решена как многокритериальная.

В работе представлены результаты многокритериального параметрического синтеза системы регулирования, реализованной на базе цифровых регуляторов ВЛР 2. Выносные локальные регуляторы ВЛР-2, разработанные в ЗАО "Автоматика-Э" (г. Омск), являются контроллерами, предназначенными для работы на объектах тепловой и атомной энергетики [1], где в настоящее время проводится модернизация средств автоматизации.

Проблема параметрического синтеза САР по существу сводится к определению параметров, обеспечивающих оптимальное функционирование системы по выбранным критериям, причем от их выбора в значительной степени зависит качество решения. Так как постановка задачи подразумевает наличие более чем одного критерия, то это неизбежно приводит

к необходимости компромиссных решений, поскольку улучшение поведения системы по одному критерию может сопровождаться ухудшением ее поведения с точки зрения других критериев.

К числу наиболее эффективных и известных подходов к решению задач многокритериальной оптимизации относится Парето — оптимизация, обеспечивающая построение множества Парето-оптимальных решений, не улучшаемых одновременно по всем рассматриваемым критериям [2].

Для решения задачи многокритериальной оптимизации использованы средства интерактивной среды для научных и инженерных расчетов MATLAB с пакетами расширения Simulink и Global Optimization Toolbox [3], позволяющие выполнить построение множества Парето в результате имитационного моделирования исследуемой САР с использованием генетических алгоритмов (ГА).

### Математическая модель САР

Автоматизация параметрического синтеза реализована для импульсной системы автоматического регулирования типового объекта автоматизации — давления в паровом коллекторе энергоблока [1, 4].

Для исследования САР в MATLAB/Simulink разработана математическая модель системы (рис. 1), которая в свою очередь содержит модели: цифрово-

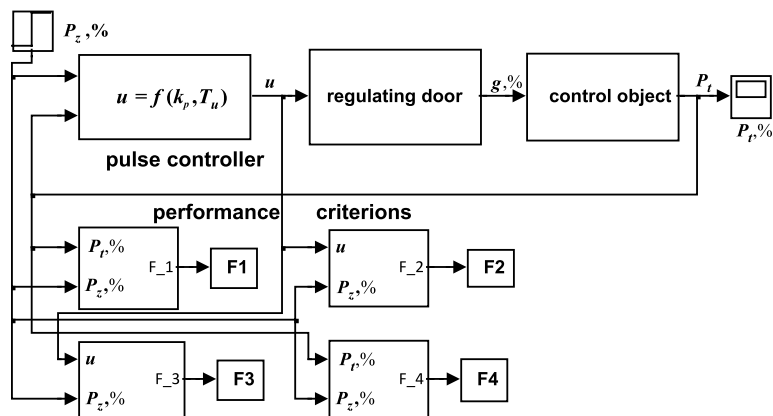


Рис. 1. Схема математической модели САР в среде MATLAB/Simulink

го импульсного регулятора (pulse controller), исполнительного механизма с регулирующим клапаном (ИМ РК) (regulating door) и технологического объекта управления (control object).

Цифровой импульсный регулятор реализует традиционный способ регулирования, применяемый в САР с исполнительными механизмами постоянной скорости [4]. Скважность выходных импульсов, формируемых регулятором, связана пропорционально-дифференциальной (ПД) зависимостью с изменением сигнала ошибки между заданным и текущим значениями регулируемого параметра. Регулятор совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости приблизительно осуществляет пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования.

Параметрами настройки регулятора являются: коэффициент передачи  $k_p$  и постоянная времени интегрирования  $T_u$ . Для удобства дальнейшего изложения примем в качестве вектора варьируемых параметров  $X = (X_1, X_2) = (k_p, T_u)$ .

Управляющее воздействие  $u(t) = f(k_p, T_u)$  в форме импульсов на открытие/закрытие регулирующего

клапана подается на исполнительный механизм. Модель ИМ РК представлена усилительным звеном и интегратором с ограничениями, а объект управления по каналу «положение РК (% открытия) — давление в паровом коллекторе энергоблока» — инерционным звеном.

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), и

$$\bar{F}_2(X) = \int_0^T u^2(t) dt,$$

учитывающий затраты на управление ( $u$  — выходной сигнал регулятора).

Также за указанный временной интервал считается число импульсов  $n$ , формируемых регулятором (срабатываний ИМ РК):

$$\bar{F}_3(X) = n.$$

Для определения области отсутствия перерегулирования рассчитывается показатель

$$\bar{F}_4(X) = \int_0^T |\varepsilon(t)| dt, |\varepsilon(t)| \geq \Delta_n,$$

где  $\Delta_n$  — зона нечувствительности регулятора.

Целью задачи синтеза САР является нахождение таких значений параметров  $k_p, T_u$ , которые минимизируют принятые показатели  $\bar{F}_i(X), i = \overline{1,4}$  для обеспечения быстродействия, отсутствия перерегулирования и уменьшения числа срабатываний ИМ.

На рис. 2 приведены трехмерные графики показателей качества работы САР. Так как критерии  $\bar{F}_i(X), i = \overline{1,4}$  имеют разные диапазоны изменения, то для приведения к диапазону 0...1 они нормализованы по формуле:

$$F_i(X) = \frac{\bar{F}_i(X) - \bar{F}_i^{min}}{\bar{F}_i^{max} - \bar{F}_i^{min}}, i = \overline{1,4}, \quad (1)$$

где  $\bar{F}_i^{min} = \min \bar{F}_i(X)$ ;  $\bar{F}_i^{max} = \max \bar{F}_i(X)$ .

Из графиков видно, что минимальные значения показателей качества достигаются при различных параметрах настройки САР, что говорит о необходимости достижения компромисса между ними при решении задачи оптимизации.

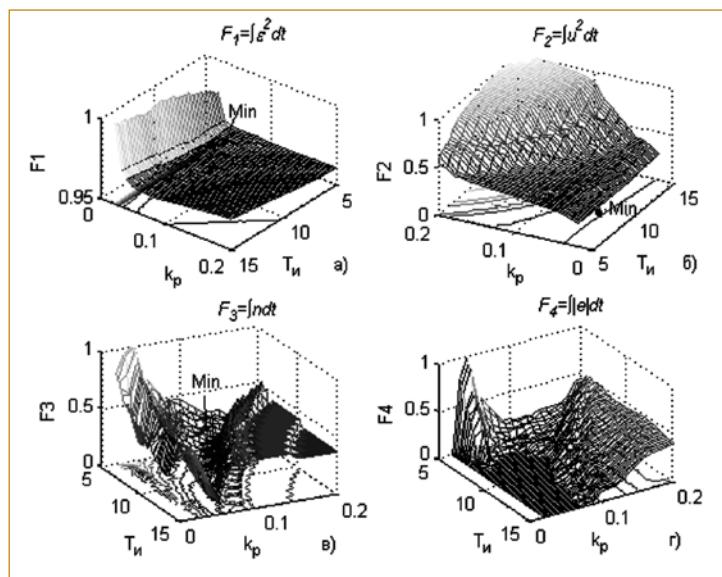


Рис. 2. Графики показателей качества работы САР

### Постановка задачи многокритериальной оптимизации САР

В связи с тем, что при синтезе САР используется несколько показателей качества функционирования, то задача оптимизации ставится как многокритериальная. Совокупность  $m = 4$  частных критериев  $F_i(X), i = 1, m$  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.

Так как выбор во множестве решений (параметров) с математической точки зрения равносильен выбору во множестве векторных критериев, то все определения и результаты принято формулировать как в терминах решений, так и в терминах векторных критериев [2].

Минимизация каждого из частных критериев выполняется в одной и той же области допустимых значений параметров (множестве возможных решений), которую обозначим  $D_X$ . Тогда во введенных обозначениях задачу многокритериальной оптимизации можно записать в виде:

$$\min_{X \in D_X} F(X) = F(X^o) = F^o, \quad (2)$$

где  $X^o, F^o$  — решения задачи.

Векторный критерий оптимальности  $F(X)$  отображает область  $D_X$  во множество  $D_F$ , называемое множеством достижимости (критериальным множеством) задачи многокритериальной оптимизации (2).

На множестве  $D_X$  вводится отношение предпочтения, обозначаемое символом  $\succ_X$ . Говорят, что вектор  $X' \in D_X$  предпочтительнее вектора  $X'' \in D_X$ , то есть  $X' \succ_X X''$ , если среди равенств  $F_i(X') \leq F_i(X'')$ ,  $i = 1, m$  и неравенств существует хотя бы одно строгое неравенство (при выполнении соотношения  $X' \succ_X X''$  также говорят, что решение  $X'$  доминирует решение  $X''$ ).

Отношение предпочтения  $\succ_X$ , заданное на множестве возможных параметров, порождает отношение предпочтения  $\succ_F$  на множестве возможных векторов  $F(X)$ :

$$F(X') \succ_F F(X'') \Leftrightarrow X' \succ_X X'', \text{ при } X', X'' \in \{X\}.$$

Это означает, что вектор  $F' = F(X')$  предпочтительнее вектора  $F'' = F(X'')$  (то есть  $F' \succ_F F''$ ), тогда и только тогда, когда решение  $X'$  предпочтительнее решения  $X''$  (то есть  $X' \succ_X X''$ ).

Согласно известному принципу Эджворта — Парето [2] наилучшие решения многокритериальной задачи всегда следует выбирать в пределах множества Парето решений  $P_F(X)$ , определяемого соотношением:  $P_F(X) = \{X^o \in \{X\} \mid \text{не существует } X \in \{X\} \text{ такого, что } F_i(X) \leq F_i(X^o), i = 1, m, F_i(X) \neq F_i(X^o)\}$ .

Одновременная минимизация целевых функций  $F_i(X), i = 1, m$  соответствует построению множества

*Правильное решение должно оказаться не только изысканным, но и простым.*

Дж. Уотсон

Парето-оптимальных решений  $P_F(X)$ , то есть таких допустимых решений, которые не могут быть улучшены (уменьшены) ни по одному из имеющихся критериев без ухудшения (увеличения) по какому-то хотя бы одному другому критерию. Иначе говоря, предпочитая одному Парето-оптимальному решению другое Парето-оптимальное решение, мы вынуждены идти на определенный компромисс, соглашаясь на некоторую потерю хотя бы по одному критерию (получая определенный выигрыш, по крайней мере, по какому-то другому критерию).

Получение множества Парето-оптимальных решений  $P_F(X)$  еще не является окончательным решением при выборе варианта параметров, так как необходимо получить не несколько, а одно предпочтительное решение. То есть после получения множества Парето-оптимальных решений возникает задача его сужения. Существуют различные подходы к сужению множества Парето [5].

При небольшом числе элементов во множестве Парето-оптимальных решений — вариантов настроек параметров, разработчик САР может просмотреть их для сравнительного сопоставления, анализа достоинств и недостатков и совершить окончательный выбор одного варианта, исходя из своих предпочтений.

Другой возможностью сужению множества Парето является выбор варианта на основе так называемого лексикографического подхода. Для его реализации частные критерии упорядочиваются по важности и привлекаются поочередно для решения задачи выбора параметров САР в качестве дополнительной информации, пока не будет получено единственное решение.

### Решение задачи многокритериальной оптимизации САР

При многокритериальной оптимизации САР необходимо выполнить построение множества Парето-оптимальных решений, не улучшаемых одновременно по всем рассматриваемым критериям.

Существует значительное число методов и алгоритмов приближенного построения множества Парето [6], осуществляющих аппроксимацию множества Парето решений (параметров), а тем самым и множества Парето векторных критериев.

Относительно новыми и высокоэффективными являются методы Парето-аппроксимации на основе ГА. Математический аппарат ГА дает возможность осуществления оптимизации, если показатели качества работы САР являются нелинейными, недифференцируемыми функциями, имеющими локальные экстремумы [7, 8].

Генетический алгоритм (*Genetic Algorithm*) представляет собой метод поиска оптимальных решений, основанный на копировании механизмов биологического

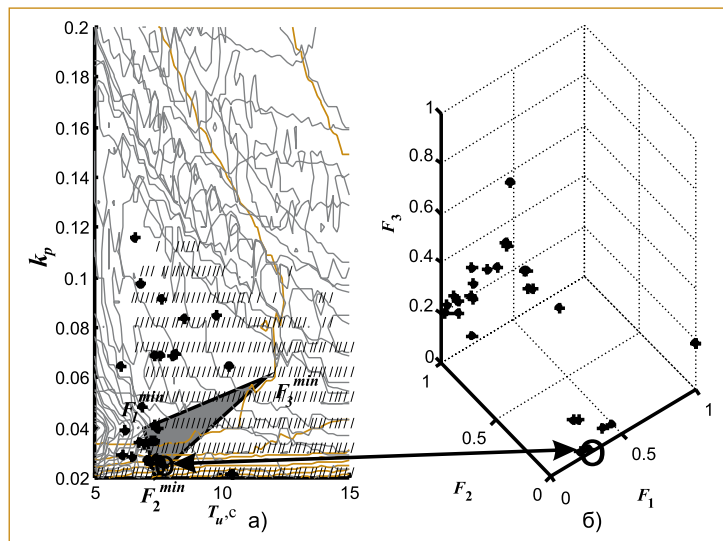


Рис. 3. Отображение параметрического пространства в критериальное при оптимизации САР с помощью ГА (трехмерный случай): а) множество Парето-решений на графике линий уровня критериев; б) множество Парето для критериев  $F_i(X), i = 1, 3$

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 генетических алгоритмов при приближенном построении множества Парето являются операция скрещивания (*crossover*) наиболее приспособленных особей и операция случайных мутаций (*mutation*), позволяющих получать индивидуумы с новыми свойствами. Также важными и 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 спе-

циально созданные m-файлы — сценарии системы MATLAB, выполняющие многократные вызовы Simulink-модели САР (рис. 1), установку необходимых опций многоцелевого ГА и контроль выполнения оптимизации.

Поиск множества Парето-решений выполнялся процедурой *gamultiobj* многоцелевого генетического алгоритма, реализованного на основе известного генетического алгоритма 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. Два оператора: *ParetoFraction* и *DistanceFnc* обеспечивают элитизм ГА. Оператор *ParetoFraction* ограничивает число индивидуумов на фронте Парето, выбирая лучших представителей. Оператор *DistanceFnc* поддерживает разнообразие на фронте Парето, принимая во внимание особей, находящихся относительно далеко от фронта.

Так как ГА применимы к задачам большой размерности и с самого начала работают с большой популяцией кандидатов на решения, то Парето-множество генерировалось уже в первых поколениях ГА, то есть при небольших затратах времени на вычисления. Создание структуры опций ГА выполнялось оператором *gaoptimset*. При этом число особей в популяции ГА устанавливалось в диапазоне 50...80 ед. Для получения результатов требовалось 5...20 поколений ГА.

В связи с тем, что при оптимизации САР осуществлялся поиск параметров  $k_p, T_u$ , доставляющих минимум векторному критерию оптимальности  $F(X) = F(k_p, T_u)$ , то для использования ГА в качестве «особи» принят вектор параметров  $X = (k_p, T_u)$ . На каждом шаге работы алгоритма рассматривался вектор параметров  $X$  и соответствующее ему значение векторного критерия  $F(X)$ . Начальные значения параметров САР случайным образом выбирались из принятых диапазонов:  $k_p \in [0, 0.1; 1]$ ,  $T_u \in [2; 20]$ .

В связи с тем, что начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, выполнялись несколько реализаций расчетов и выбирались лучшие из полученных решений.

Поиск решения задачи выбора параметров САР осуществлялся на основе двух подходов. При реализации первого подхода задача оптимизации рассматривалась как трехкритериальная: для критериев  $F_i(X), i = 1, 3$ , считающихся

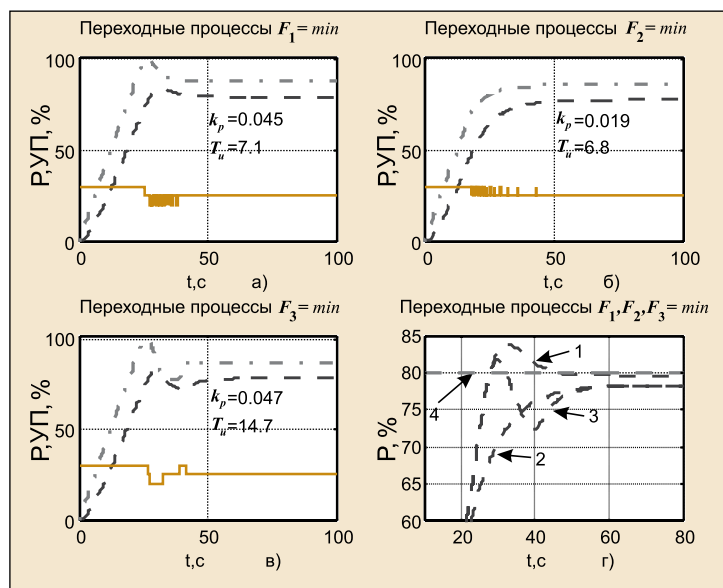


Рис. 4. Переходные характеристики САР при минимизации  $F_i(X), i = 1, 3$  (трехмерный случай множества Парето)

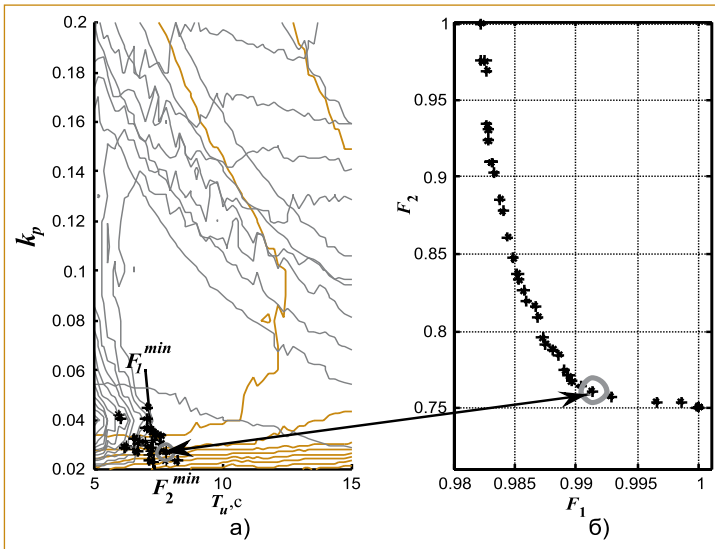


Рис. 5. Отображение параметрического пространства в критериальное при оптимизации САР с помощью ГА (двумерный случай): а) множество Парето-решений на графике линий уровня критериев; б) множество Парето для критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$

одинаково важными, было получено множество Парето-решений. Показатель  $F_4(X)$ , определяющий область настроек, при которых отсутствует перерегулирование, использовался как вспомогательный для отображения этой области при построении графиков.

Результат оптимизации для одной из реализаций приведен на рис. 3, иллюстрирующем отображение параметрического пространства (множества Парето решений) в пространство целевых функций (множество Парето векторных критериев), полученных при оптимизации САР с помощью ГА. Особи ГА — аппроксимация множества Парето-оптимальных параметров САР (рис. 3, а) и соответствующая аппрокси-

мация множества Парето векторных критериев (рис. 3, б), изображены в виде звездочек.

На рис. 3, а показано множество точек аппроксимации Парето-решений на графике линий уровня критериев качества  $F_i(X)$ ,  $i=1,3$  (трехмерные графики  $F_i(X)$ ,  $i=1,4$  на рис. 2). Проекция показателя  $F_4(X)$  — область настроек, при которых отсутствует перерегулирование, выделена штриховкой. Окрашенный треугольник построен на вершинах, соответствующих минимумам критериев качества  $F_i(X)$ ,  $i=1,3$ . Видно, что особи ГА — элементы множества точек аппроксимации Парето-оптимальных параметров САР, расположены вокруг треугольника минимальных решений. Одно из Парето-решений выделено кружком и стрелкой показан соответствующий ему также выделенный элемент множества Парето векторных критериев.

Описанный подход к решению задачи многокритериальной оптимизации САР осложняется тем, что при минимальных значениях частных критериев, полученных при аппроксимации, могут быть решения, не удовлетворяющие разработчика с точки зрения, например, вида переходного процесса (который можно считать еще одним вспомогательным критерием).

Рассмотрим рис. 4, на котором приведены графики переходных характеристик САР (возмущение заданным значением регулируемого параметра) при минимальных значениях частных критериев  $F_i(X)$ ,  $i=1,3$ , полученных с помощью ГА. На графиках пунктирная кривая соответствует регулируемому параметру — давлению в паровом коллекторе, штрихпунктирная — положению РК, а непрерывная — импульсному выходу регулятора.

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). Если минимизируется число включений ИМ, то есть критерий  $F_3(X)$ , то переходный процесс может носить колебательный характер, как, например, на рис. 4, в.

Для наглядности на рис. 4, г сведены графики переходных процессов 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 регулируемого параметра). Ни один из переходных процессов, полученных при минимизации каждого из частных критериев  $F_i(X)$ ,  $i=1,3$  не может быть признан удовлетворительным, и разработчик САР должен просмотреть варианты параметров из Парето-оптимальных для окончательного выбора.

В данной реализации за пять поколений ГА найдено 28 Парето-оптимальных решений. Окончательный выбор одного из полученных

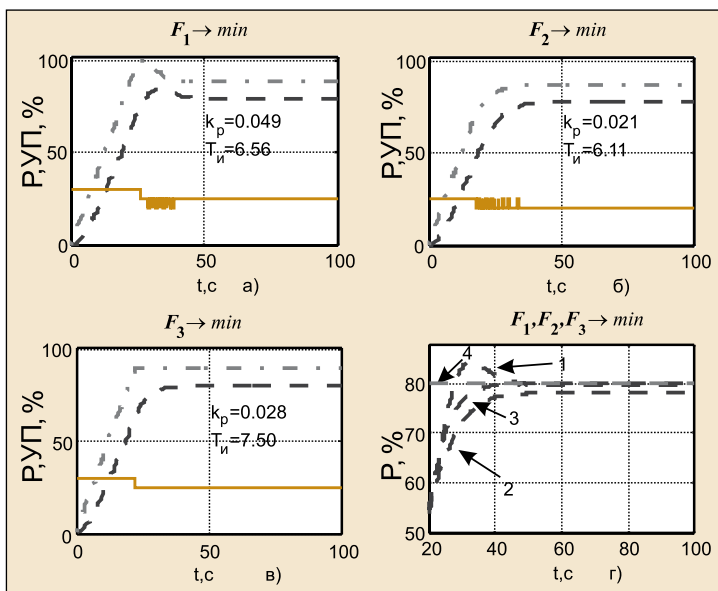


Рис. 6. Переходные характеристики САР при нахождении минимума  $F_3(X)$  среди множества Парето критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  (двумерный случай множества Парето)

28-ми решений остается за разработчиком САР с учетом его предпочтений и требований к системе. Очевидно, что процедура выбора в данном случае не только является трудоемкой, но и зависящей от квалификации и опыта разработчика.

Поэтому для решения задачи многокритериальной оптимизации был предложен и опробован второй подход, включающий следующие шаги. Вначале из принятых показателей качества  $F_j(X)$ ,  $j = 1, 4$  были выбраны основные частные критерии  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , характеризующие точность регулирования и затраты на управление. Далее задача оптимизации рассматривалась как двухкритериальная: для основных критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  было получено множество Парето-оптимальных решений. Затем для окончательного выбора вводился в качестве дополнительного критерия  $F_3(X)$ , минимальное значение которого отыскивалось среди множества Парето-решений, полученных по критериям  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  (так называемое лексикографическое предпочтение).

Результат оптимизации для одной из реализаций решения двухкритериальной задачи с использованием основных критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  приведен на рис. 5. Отображение плоскости параметров (множества Парето решений) осуществляется на критериальную плоскость (множества Парето векторных критериев). Для двумерного случая представление более наглядное, чем для трехмерного: на критериальной плоскости с осями координат  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , показана выраженная аппроксимация фронта Парето (границы множества Парето) — множество точек не улучшаемых решений для критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , полученных при оптимизации САР с помощью ГА.

На рис. 5, а показано множество точек аппроксимации Парето-решений на графике линий уровня критериев качества  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ . Точки, соответствующие минимумам критериев качества  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , соединены прямой, являющейся отображением фронта Парето на плоскость параметров САР. Видно, что особи генетического алгоритма — множества точек аппроксимации Парето-оптимальных параметров САР, расположены вокруг фронта Парето.

В результате привлечения дополнительного критерия  $F_3(X)$  из множества точек Парето-оптимальных параметров САР выбрано единственное решение, соответствующее минимуму критерия  $F_3(X)$ . Это решение выделено кружком и стрелкой показан соответствующий ему также выделенный элемент множества Парето критериев на критериальной плоскости.

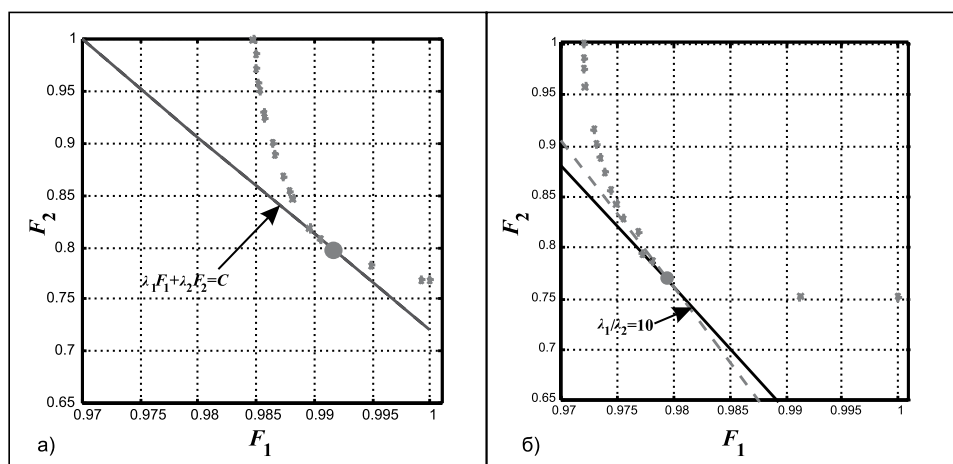


Рис. 7. Формирование скалярного критерия: а) случай выпуклого фронта Парето; б) случай невыпуклого фронта Парето

На рис. 6 приведены графики переходных характеристик САР для данной реализации. При сравнении графиков с аналогичными, полученными при решении трехкритериальной задачи (рис. 4), можно видеть, что динамические характеристики САР при минимизации критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  идентичны (рис. 6, а и рис. 6, б). В то же время САР с параметрами, полученными при нахождении минимума критерия  $F_3(X)$  среди множества Парето решений для критериев  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , имеет значительно лучшие динамические характеристики (рис. 6, в). Видно, что переходный процесс характеризуется не только отсутствием перерегулирования и быстродействием (рис. 6, г, кривая 3), но и минимальным числом срабатываний регулятора (один импульс на открытие РК, рис. 6, в).

Следует отметить, что высокое качество процесса регулирования, малое число срабатываний регулятора (1...2 импульса) наблюдалось во всех полученных реализациях. Отсюда следует вывод, что для многокритериальной оптимизации САР предпочтительнее использовать второй подход, позволяющий получить обоснованное решение за более короткое время и с меньшими вычислительными затратами.

#### Построение обобщенного критерия

Задача многокритериального синтеза САР не является стандартной с точки зрения традиционных методов нелинейной оптимизации из-за наличия векторного критерия оптимальности. Поэтому важным является развитие подходов сведения многоцелевой задачи к конструкциям, допускающим численное решение обычными средствами, то есть к задачам с единым критерием.

Известно, что существуют такие комбинации критериев, с помощью которых можно описать множество Парето, при этом выбор во множестве Парето может быть сведен к выбору некоторой конкретной комбинации [5]. Самой простой и наиболее часто применяемой комбинацией является линейная

свертка критериев. Для  $m$  критериев линейная свертка определяется выражением:

$$f(X) = \sum_{i=1}^m \lambda_i F_i(X), \quad (3)$$

причем на весовые коэффициенты  $\lambda_i$  линейной свертки обычно накладываются ограничения:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1; \lambda_i \geq 0; i = \overline{1, m}.$$

Так как всякая точка минимума на множестве  $X$  линейной свертки критериев при  $\lambda_i \geq 0; i = \overline{1, m}$  является Парето — оптимальной [5], то выбирая в указанных пределах коэффициенты линейной свертки и минимизируя ее значения на множестве  $X$ , получим Парето — оптимальные варианты. То есть выбор вариантов определяется выбором весовых коэффициентов линейной свертки, которые задают степень влияния («важности») отдельных критериев на окончательный выбор (чем больше коэффициент, тем больший вклад вносит соответствующий ему критерий).

В связи с тем, что любое решение из множества Парето-оптимальных может быть представлено в виде (3), то есть в виде весовых коэффициентов, умноженных на частные критерии, то, следовательно, задача получения линейной свертки сводится к нахождению весовых коэффициентов.

Предлагается подход для преобразования многокритериальной задачи минимизации вектора  $F(X)$  параметрического синтеза САР в скалярную задачу путем нахождения весовых коэффициентов для частных критериев (3). Поясним сущность получения скалярного критерия с помощью графической иллюстрации.

Формирование скалярного критерия для синтеза САР реализуем на основе результатов, полученных при решении задачи многокритериальной оптимизации, когда в качестве основных частных критериев принимались  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$ , а дополнительным являлся критерий  $F_3(X)$ . Так как 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  $F_2(X)$ , то скалярный критерий (3) принимает вид:

$$f(X) = \lambda_1 F_1(X) + \lambda_2 F_2(X). \quad (4)$$

Тогда график прямой  $\lambda_1 F_1(X) + \lambda_2 F_2(X) = C$ , полученной в соответствии с выражением (4), на плоскости целевых функций  $F_1(X)$  и  $F_2(X)$  должен касаться фронта Парето в точке решения (при  $F_3(X) = \min$ ), а ее наклон определяться соотношением весов  $\lambda_i, i = \overline{1, 2}$  (рис. 7).

В связи со сложностью построения касательной к аппроксимации фронта Парето, имеющей разрывный характер, вместо касательной строится ближайшая к ней секущая. Эта прямая проходит через две точки фронта, одна из которых соответствует оптимальной — полученной при минимальном значении критерия  $F_3(X)$ .

Второй точкой являлась ближайшая к оптимальной точке в случае выпуклого фронта Парето, то есть, если при проведении прямой все точки аппроксимации Парето-решений оказывались не ниже нее (рис. 7, а). Если точки аппроксимации Парето-решений оказывались по обе стороны прямой (невыпуклый фронт Парето, рис. 7, б, пунктирная прямая), отыскивалась снова ближайшая точка и строилась новая прямая, для которой все точки фронта Парето оказывались не ниже нее (рис. 7, б, непрерывная прямая). Параметры найденной прямой ( $\lambda_i, i = \overline{1, 2}$ ) были приняты 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. Возвращаясь от нормированных критериев к показателям качества, вычисляемым в ходе экспериментальных исследований системы (зависящим от диапазонов изменения параметров)  $\bar{F}_1 = \int_0^T \varepsilon^2 dt$  и  $\bar{F}_2 = \int_0^T u^2 dt$ , на основании (4) получим формулу, удобную для расчетов при исследовании САР:

$$f(X) = \int_0^T [\varepsilon^2 + (\lambda u)^2] dt. \quad (5)$$

Первое слагаемое в подынтегральном выражении скалярного критерия характеризует точность на всем интервале управления, а второе — определяет совокупные расходы на управление. Весовой коэффициент при втором слагаемом зависит от соотношения весов  $\lambda_i, i = \overline{1, 2}$  и с учетом (1) рассчитывается по формуле:

$$\lambda^2 = \frac{\lambda_2 [F_1(\bar{F}_1^{\max} - \bar{F}_1^{\min}) + \bar{F}_1^{\min}]}{\lambda_1 [F_2(\bar{F}_2^{\max} - \bar{F}_2^{\min}) + \bar{F}_2^{\min}]}$$

В результате модельных исследований САР и получения нескольких реализаций аппроксимации фронта Парето с помощью ГА был определен диапазон изменения весового коэффициента  $\lambda \in [10, 35]$ . Рекомендуемое значение, выбранное из середины диапазона  $\lambda = 20$ , соответствует часто используемому при оптимизации импульсных САР [2].

Критерии вида (5) широко применяются при решении задач аналитического конструирования регуляторов [10]. Однако они не всегда рекомендуются к использованию, так как весовые коэффициенты для входящих в них показателей определяются чаще всего субъективно. Поэтому предлагаемый подход к решению проблемы выбора весовых коэффициентов скалярного критерия может найти применение при решении задач оптимизации САР.

Следует отметить, что оптимизация САР при постановке задачи как однокритериальной имеет определенные преимущества, заключающиеся в том, что использование более развитых традиционных методов оптимизации дает возможность дополнительно-

го учета ограничений, налагаемых на область поиска параметров [8].

### Заключение

В результате проведенных исследований сделан вывод, что предлагаемые подходы к многокритериальной оптимизации САР на основе ГА эффективны при автоматизированном проектировании САР.

Автоматизация синтеза САР с выбором параметров из множества Парето-оптимальных решений, реализованная на испытательном стенде ЗАО "Автоматика-Э", позволяет значительно повысить качество регулирования и уменьшить временные затраты на предварительную настройку разрабатываемых контроллеров.

### Список литературы

1. Раскин Е.М., Денисова Л.А. Программно-технический комплекс для регулирования давления в главном паровом коллекторе энергоблока АЭС // Автоматизация в промышленности. 2011. №2.
2. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007.

3. Дьяконов В.П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель. — М.: ДМК Пресс. 2008.
4. 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.
5. Ногин В.Д. Проблемы сужения множества Парето: подходы к решению // Искусственный интеллект и принятие решений. 2008. №1.
6. Карпенко А.П., Митина Е.В., Семенухин А.С. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 4. 2012. (<http://www.techomag.edu.ru/doc/363023.html>).
7. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия — Телеком. 2006.
8. Денисова Л.А., Мещеряков В.А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования с использованием генетического алгоритма // Автоматизация в промышленности. 2012. №7.
9. Deb K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2001.
10. Дорф Р., Бишон Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний. 2002.

*Денисова Людмила Альбертовна — канд. техн. наук, доцент Омского государственного технического университета (ОмГТУ), старший научный сотрудник ЗАО «Автоматика-Э».*

*Контактный телефон: (381-2) 23-23-43.*

*E-mail: ladenisova@mail333.com*

### Сертификация ПО

*Комментарии к теме номера Олега Владимировича Андрианова — старшего менеджера по сертификации продуктов «Лаборатории Касперского».*

В качестве производителя средств защиты информации мы сталкиваемся с добровольной сертификацией, так как требования использовать сертифицированные средства защиты предъявляются к нашим клиентам. Некоторую сложность добавляет то, что нам приходится одновременно соответствовать как минимум двум системам сертификации — ФСТЭК России и ФСБ России. Кроме того существует еще сертификация по требованиям Министерства Обороны и иностранные стандарты.

Сложность в сертификации ПО, а тем более такого быстро меняющегося, как антивирус, в основном состоит в скорости развития. К моменту получения сертификата на текущую версию продукта к выходу готовится уже следующая версия с исправлениями и доработками. А к тому моменту, когда заказчики приобретают и устанавливают сертифицированный продукт, уже начинается новый процесс сертификации.

Негатива от общения с сертифицирующими органами у нас нет, хотя то, что часто приходится работать в формате ГОСТов системы ЕСПД/ЕСКД 70-х гг. XX века вызывает некоторое раздражение. Однако по предметной области эксперты обладают достаточно серьезной компетенцией, и здесь регулирование изменяется в правильном направлении.

В России существуют множества ведомственных разрешительных систем. И когда один и тот же заказчик требует наличия сертификата сразу в нескольких системах, это косвенно свидетельствует о том, что границы между ними недостаточно ясно определены. К сожалению, это частая проблема. Мы сталкиваемся с тем, что иногда заказчики точно не понимают, сертифи-

кат какого из ведомств ему необходим, а какой — необязателен, и запрашивают избыточные сертификации.

На западе сертификация средств защиты информации еще более размыта. Существуют международные стандарты, такие как Common Criteria (ISO 15408), которые признаются большинством развитых стран в качестве достаточных для защиты важных систем. При этом у разных стран часто есть свои локальные стандарты, которые также имеют рекомендованный статус и либо ссылаются на СС, либо параллельны им. В то же время от операторов защищаемых систем зачастую не требуется явного наличия сертифицированных средств защиты. Определение того, что именно будет достаточным уровнем защиты, и какой надежности решение ему нужно, в большей степени лежит на заказчике. Такова практика в банковских и медицинских системах, в таком же ключе написаны и последние требования к защите промышленных систем. Это не всегда хорошо, но и не всегда плохо... Большая гибкость в использовании средств защиты также повышает риски недостаточной защиты или неправильного конфигурирования.

Сравнивая отечественную и зарубежную системы сертификации, нельзя сказать, что Российская система статична. Регуляторы активно изменяют ее в ответ на новые угрозы и требования рынка.

В последнее время ФСТЭК России меняет формат требований по сертификации средств защиты на формат СС, что приближает нас к международным системам и помогает решить некоторые вопросы, возникающие в процессе сертификации. Сейчас ФСТЭК занимается разработкой общих требований к защите АСУТП, в том числе и требований для специализированных средств защиты АСУТП.

Важной инициативой регулятора является вовлечения лидеров рынка и производителей в разработку и согласование этих требований.

*[Http://www.kaspersky.com](http://www.kaspersky.com)*