

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

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

Предлагается подход к выполнению параметрического синтеза системы автоматического регулирования по выбранному показателю качества с использованием генетического алгоритма. Приведена математическая модель цифровой системы регулирования, реализованная в среде MATLAB / Simulink. Представлены результаты оптимизации параметров системы в области настроек, исключающих неустойчивую работу и возникновение автоколебаний, полученные средствами MATLAB / Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox.

Ключевые слова: математическая модель, параметрический синтез, цифровая система автоматического регулирования, устойчивость, показатель качества, генетический алгоритм.

Проблема параметрического синтеза системы автоматического регулирования (САР) по существу сводится к выбору параметров, обеспечивающих оптимальное функционирование системы по выбранному показателю качества. Развитие новых информационных технологий, в частности, генетических алгоритмов (ГА), позволяет эффективно решать задачи автоматического синтеза и настройки САР. Математический аппарат генетических алгоритмов [1] дает возможность осуществления оптимизации, если показатель качества работы САР является нелинейной, недифференцируемой функцией, имеющей локальные экстремумы. Являясь алгоритмами прямого поиска, ГА в отличие от классических алгоритмов оптимизации не требуют определения градиента функции и производных более высокого порядка.

В работе представлены результаты автоматизированного параметрического синтеза САР, реализованной на базе цифровых локальных регуляторов ВЛР 2.1. Выносные локальные регуляторы ВЛР-2.1, разработанные в ЗАО "Автоматика-Э" (г. Омск), являются контроллерами, предназначенными для работы на объектах тепловой и атомной энергетики, где в настоящее время проводится модернизация средств автоматики.

Для настройки и испытаний цифровых автоматических регуляторов ВЛР 2.1, а также проведения верификации их алгоритмического и программного обеспечения создан испытательный стенд, содержащий средства математического моделирования управляемых ТП. В состав стенда включены математические модели САР, разработанные с использованием инстру-

ментария пакета MATLAB, являющегося интерактивной средой для выполнения научных и инженерных расчетов [2]. Средства MATLAB с пакетами расширения Simulink и Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox позволяют решать задачи имитационного моделирования исследуемой САР и многопараметрической оптимизации генетическими алгоритмами.

Автоматизация параметрического синтеза реализована для импульсной системы автоматического регулирования типового объекта автоматизации – давления в паровом коллекторе энергоблока. Для исследования САР в MATLAB/Simulink разработана математическая модель САР (рис. 1), которая в свою очередь содержит модели: цифрового импульсного регулятора (controller), исполнительного механизма (ИМ) с регулирующим клапаном (regulating door) и технологического объекта управления (control object).

Модель цифрового регулятора включает два двухпозиционных релейных звена, охваченных общей обратной связью в виде инерционного звена первого порядка. Для учета дискретизации во времени сигналов на выходе контроллера используется экстраполятор нулевого порядка (Zero-Order Hold), который фиксирует значение поступающего на него сигнала в начале интервала квантования и поддерживает это значение до окончания интервала квантования. Выходная последовательность импульсов после дискретизации поступает на исполнительный механизм регулирующего клапана (ИМ РК).

Регулирующий клапан, снабженный ИМ, представлен усилительным звеном для реализации коэффициента передачи, учитывающего время открытия $T_{ИМ}$, и интегрирующим звеном с ограничением 0...100% открытия РК. Объект управления – канал «положение ИМ РК – давление в паровом коллекторе», представлен инерционным звеном первого порядка.

Кроме того, в модели выполняется расчет интегрального показателя качества регулирования (performance criterion):

$$J = \int_0^T (\varepsilon^2 + (20u)^2) dt,$$

где ε – отклонение регулируемого параметра от заданного значения; u – выходной сигнал

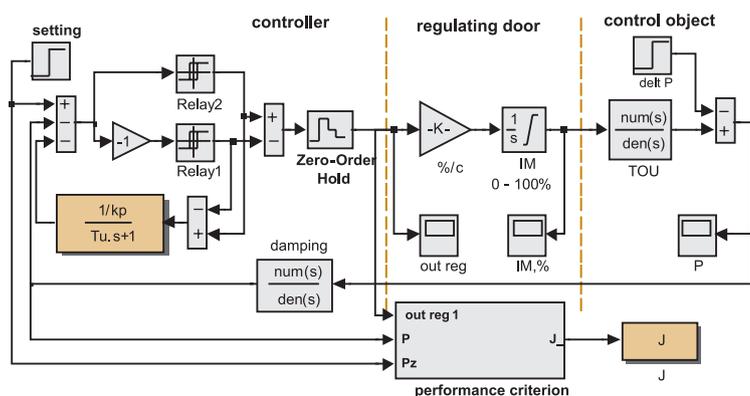


Рис. 1. Схема математической модели САР в среде MATLAB/Simulink

регулятора на ИМ; t текущее время; T – верхний предел интегрирования, выбираемый не менее времени переходного процесса. Минимизация принятого показателя J позволяет обеспечить быстродействие, отсутствие перерегулирования, а также уменьшение числа срабатываний ИМ.

Рассмотрим подробнее модель цифрового импульсного регулятора давления, параметры которого необходимо оптимизировать. В контроллере реализован традиционный способ регулирования, применяемый в САР с исполнительными механизмами постоянной скорости. Основой алгоритма является релейно-импульсный пропорционально-дифференциальный (ПД) преобразователь, представляющий собой два двухпозиционных релейных звена с зоной нечувствительности Δ_n и гистерезисом (зоной возврата Δ_b), охваченные общей обратной связью в виде инерционного звена первого порядка. Инерционное звено в обратной связи имеет передаточную функцию

$$W_{oc}(s) = \frac{1/k_p}{T_i s + 1},$$

где k_p – коэффициент передачи регулятора; T_i – постоянная времени интегрирования.

Входным сигналом контроллера является измеренный сигнал давления, который далее демпфируется (damping). Выходными сигналами являются импульсы, формируемые в контроллере и поступающие на исполнительный механизм для открытия/закрытия регулирующего клапана, причем скважность импульсов связана ПД зависимостью с изменением сигнала рассогласования между заданным и измеренным давлением.

Описанный релейно-импульсный регулятор совместно с ИМ постоянной скорости приближенно реализует пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования в основном, так называемом скользком режиме работы САР [3]. Указанный режим характеризуется включением ИМ несколько раз подряд в одном направлении, пока рассогласование не уменьшится до величины зоны нечувствительности регулятора.

Параметрами настройки регулятора являются коэффициент передачи k_p и постоянная времени интегрирования T_i (содержащее указанные параметры звено обратной связи на рис. 1 выделено тенью).

С целью выявления ограничений области поиска оптимального решения выполнен анализ устойчивости системы. При этом учитывалось следующее.

В связи с тем, что релейно-импульсный регулятор в скользком режиме его работы подчиняется линейному закону регулирования, нелинейный алгоритм ПД-преобразователя совместно с исполнительным механизмом, являющимся интегрирующим звеном, аппроксимирован линейным ПИ-законом. Для аппроксимирующего линейного ПИ-регулятора функциональная связь между входным сигналом регулятора и положением ИМ регулирующего клапана описывается передаточной функцией:

$$W_p(s) = \frac{k_p T_u 100\%}{T_{um}} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right).$$

Для учета дискретизации цифрового контроллера с периодом t_0 в непрерывную модель добавлена передаточная функция экстраполятора нулевого порядка

$$W_h(s) = (1 - e^{-st_0})/s.$$

Член e^{-st_0} , отражающий временное запаздывание в системе и представимый с помощью аппроксимации Паде [4] в виде

$$e^{-st_0} = 1 - st_0 + \frac{1}{2!}(st_0)^2 + \dots,$$

преобразован в дробно-рациональную передаточную функцию второго порядка с помощью функции *pade* пакета MATLAB.

Функциональная связь между положением РК по указателю положения (УП) и выходным сигналом давления от объекта управления с учетом демпфирования выражена передаточной функцией:

$$W_{ou}(s) = \frac{k_{ou}}{(T_{ou} s + 1)(T_f s + 1)},$$

где k_{ou} – коэффициент передачи объекта управления; T_{ou} – постоянная времени объекта управления, T_f – постоянная времени демпфирования. Для расчетов приняты значения: $k_{ou} = 0,9\%/ \%$ УП; $T_{ou} = 5$ с; $T_f = 3$ с; $T_{um} = 25$ с; $t_0 = 0,2$ с.

Построение границы области устойчивости в плоскости параметров T_i и k_p для САР с аппроксимирующим линейным ПИ-регулятором производилось с помощью разработанного m-файла в среде MATLAB. Предварительно с помощью функций MATLAB выполнялось преобразование структурной схемы САР по передаточным функциям отдельных звеньев, получение эквивалентной передаточной функции и характеристического уравнения замкнутой системы.

Процедура построения границы области устойчивости заключалась в следующем. Для каждого значения k_p из заданного диапазона находилось первое значение T_i , при котором по крайней мере один корень характеристического уравнения попадает в правую полуплоскость. Пары чисел T_i и k_p , найденные при рассмотрении всего диапазона значений, определяют границы области устойчивости, график которой при дискретизации в контуре регулирования с периодом $t_0 = 0,2$ с приведен на рис. 2 (линия 1). В связи со сложностью получения аналитического выражения построенная кривая аппроксимирована линейной зависимостью (линия 2) $k_p = 1,80T_i - 3,02$, и в дальнейшем использовалась в качестве ограничения при решении задачи параметрического синтеза.

Кроме того, при определении ограничений области допустимых параметров принималась во внимание возможность возникновения автоколебаний из-за наличия нелинейностей в структуре регулятора, а также обратной связи, охватывающей релейные

звенья. В условиях нормальной эксплуатации автоколебания недопустимы, так как вызывают опасность перегрева электродвигателя исполнительного механизма от частых реверсивных включений.

При определенном отношении величины гистерезиса и нечувствительности релейных звеньев Δ_e / Δ_n каждому значению постоянной интегрирования $T_{и}$ соответствует критическое отношение $(k_p T_{и} / \Delta)_крит.$ Автоколебания в системе возможны при $(k_p T_{и} / \Delta_n) > (k_p T_{и} / \Delta_n)_крит.$

На рис. 2 приведена полученная с помощью имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink граница области автоколебаний для принятого отношения $\Delta_e / \Delta_n = 0,3$ (линия 3). Как показывают расчеты, при увеличении этого отношения области допустимых настроек сужаются. Кривая 3 является гиперболой и определяется выражением $k_p = (0,15T_{и} + 0,44)^{-1}$.

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

Таким образом, получены границы области допустимых параметров, исключающих возможность неустойчивой работы системы и возникновения автоколебаний. Полученные ограничения используются для решения оптимизационной задачи, ко-

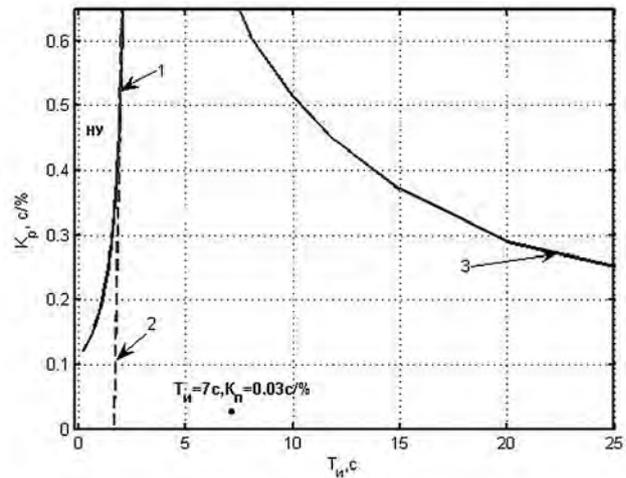


Рис. 2. Область допустимых параметров САР

торая заключается в нахождении параметров k_p и $T_{и}$ САР, доставляющих минимум функционалу качества $J = f(k_p, T_{и})$.

На рис. 3 представлены результаты выбора оптимальных параметров, полученные при расчетах с помощью математической модели САР (рис. 1), для многократного вызова которой и обработки результатов разработан в среде MATLAB m-файл – сценарий.

Построен трехмерный график зависимости критерия J от коэффициента передачи k_p и постоянной интегрирования $T_{и}$ (рис. 3, а) и приведены значения указанных параметров, доставляющие минимум J .

Для полученных оптимальных параметров построены графики переходных процессов при возмущении заданием на 20% (рис. 3, б). Как видно из графиков,

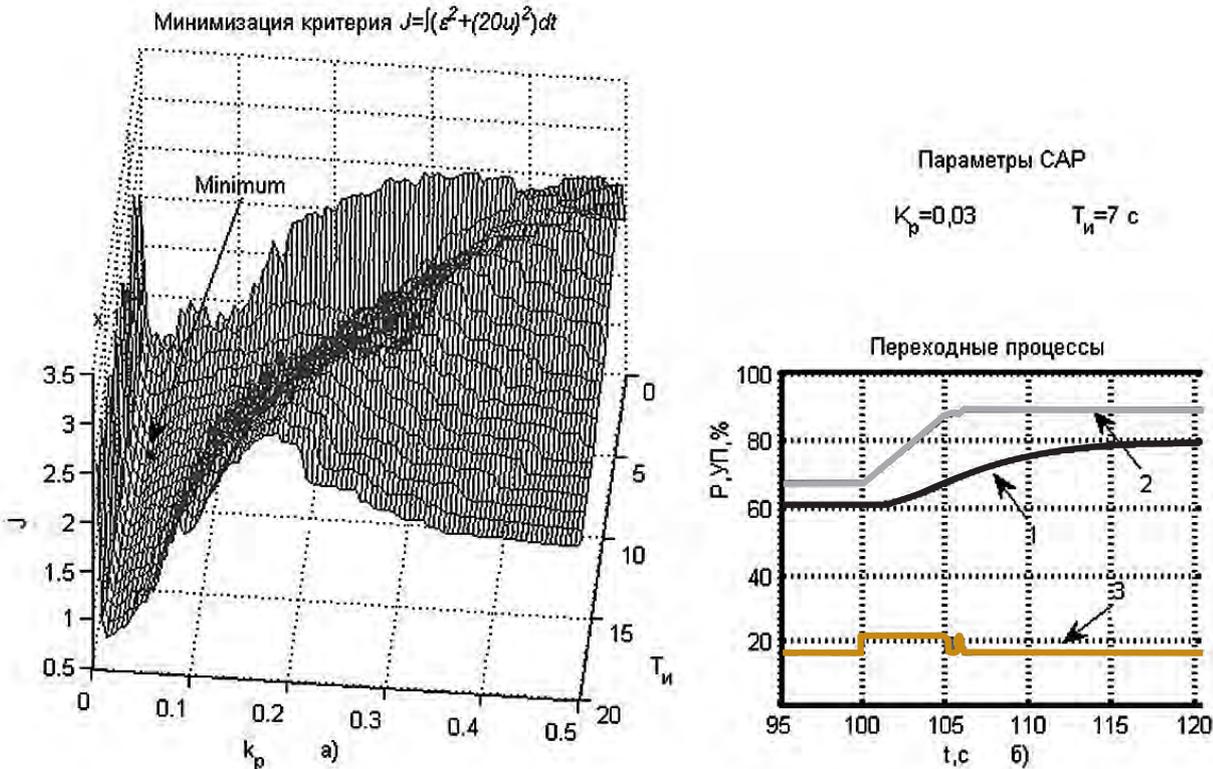


Рис. 3. Зависимость функционала качества от параметров настройки САР и переходные процессы при его минимизации

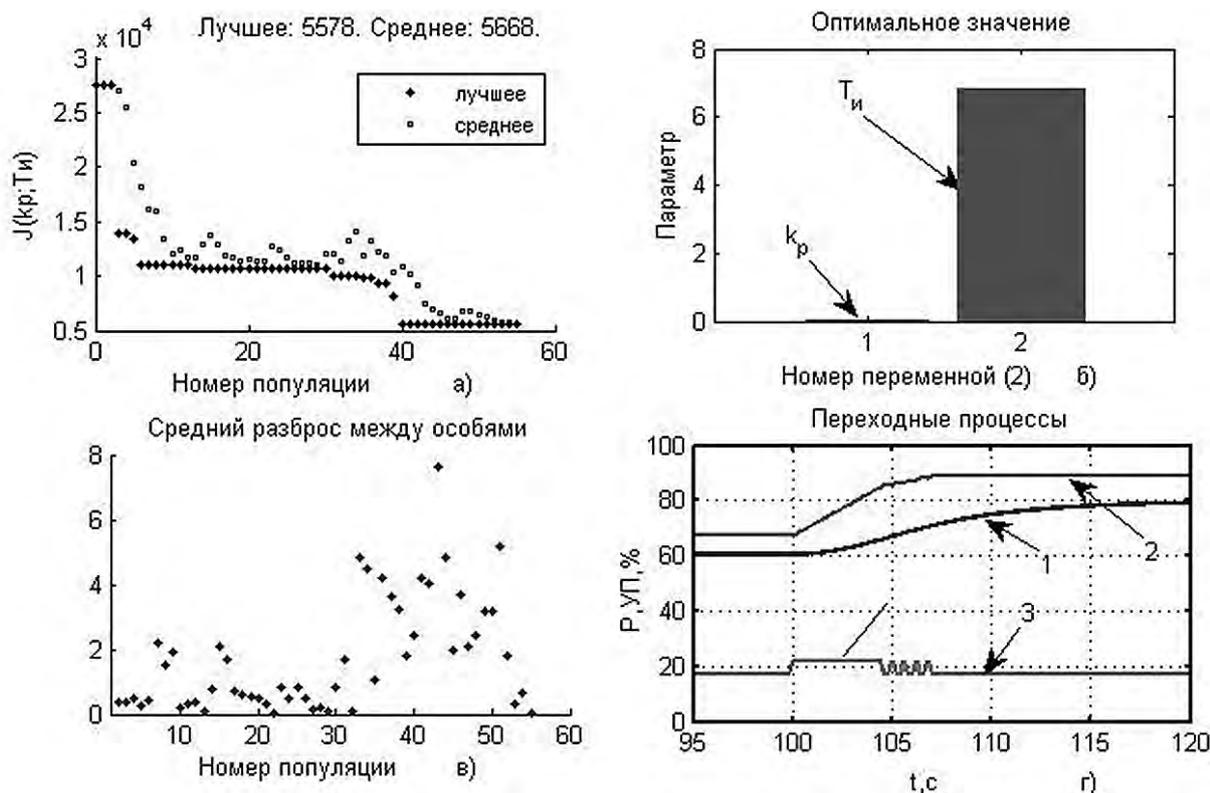


Рис. 4. Параметрический синтез САР при использовании генетического алгоритма

регулируемый параметр (1) аperiодически, без пере-регулирования достигает нового заданного значения. При этом требуемое положение исполнительного механизма (2) устанавливается после нескольких импульсов, формируемых регулятором (3).

При рассмотрении полученного трехмерного графика видно, что зависимость функционала качества $J = f(k_p, T_{ii})$ (рис. 3, а) является нелинейной, содержащей локальные минимумы. Поэтому для минимизации функционала качества и определения оптимальных параметров САР применен генетический алгоритм пакета MATLAB/Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox.

Приведем краткую характеристику используемого генетического алгоритма – метода для решения задач оптимизации, который представляет собой аналогию биологического процесса эволюции, основанного на генетическом наследовании и естественном отборе [1, 2].

При реализации ГА используется множество особей (индивидуумов), называемое популяцией, которое неоднократно модифицируется в процессе решения. При этом новая популяция допустимых решений формируется с помощью вероятностного отбора особей для мутации, наиболее приспособленных особей для скрещивания, а также выбора лучших представителей предыдущего поколения.

Существенным преимуществом ГА по сравнению с традиционными методами оптимизации является то, что он выполняет поиск решения, исходя не из единственной точки, а из множества (популяции) точек. Вследствие применения оператора скрещивания наи-

более приспособленных особей рассматриваются самые перспективные для приближения к оптимальному значению участки пространства поиска, а случайные изменения отдельных особей при применении оператора мутации позволяют получить множество новых индивидуумов. Кроме того, лучшие представители без изменения переходят в следующее поколение, поэтому каждое новое поколение содержит более высокое соотношение характеристик, присущих лучшим особям предыдущего поколения, распространяемое далее по всей популяции. В результате популяция эволюционно сходится к оптимальному решению задачи.

Так как при параметрическом синтезе САР осуществляется поиск параметров k_p и T_{ii} , доставляющих минимум функционалу качества $J = f(k_p, T_{ii})$, для использования генетического алгоритма оптимизации в качестве «особи» понимается вектор параметров. $X = (k_p, T_{ii})$. На каждом шаге работы ГА рассматривается набор индивидуальных решений: вектор параметров $X = (k_p, T_{ii})$ и соответствующее ему значение показателя $J = f(k_p, T_{ii})$. Вычисление функционала J осуществляется созданным в среде MATLAB m-файлом, выполняющим многократный вызов модели САР (на рис. 1 блок записи J в рабочую область MATLAB выделен тенью). Полученный результат в виде аргумента передается в основной генетический алгоритм.

Для работы с функциями раздела Genetic Algorithm разработан m-файл – сценарий, устанавливающий необходимые опции генетического алгоритма и осуществляющий контроль выполнения оптимизации. Поиск глобального минимума функции при помо-

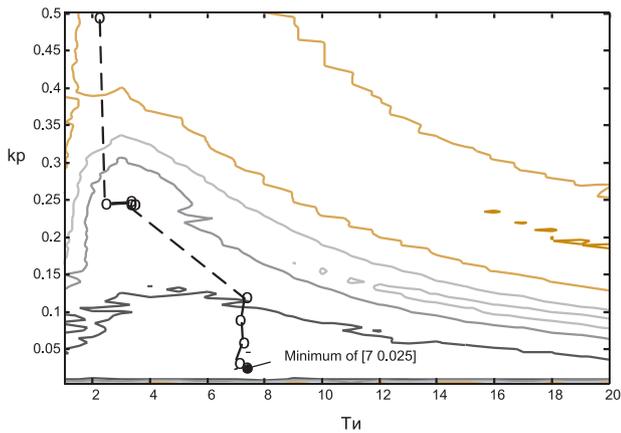


Рис. 5. Расположение лучших особей генетического алгоритма в процессе поиска глобального минимума на графике линий уровня функционала качества

щи генетического алгоритма выполняется процедурой *ga*, а создание структуры опций ГА – оператором *gaoptimset*. Значения параметров генетического алгоритма установлены следующие: число особей в популяции $n=10$; число поколений $L=60$; начальные значения параметров случайным образом выбираются из принятых диапазонов: $k_p \in [0,01;0,5]$, $T_u \in [2;20]$. Линейное ограничение генетического алгоритма задано неравенством $AX \leq b$; $A=[1 \ -1,80]$; $b=[-3,02]$ (линия 2 на рис. 2), также учтена ограничивающая область допустимых настроек нелинейная функция (линия 3 на рис. 2).

В связи с тем, что начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, необходимо выполнить несколько реализаций расчетов и выбрать наилучшее из полученных решений. Результат оптимизации для одной из реализаций приведен на рис. 4.

Использование специализированных графических функций инструментария раздела Genetic Algorithm позволило проследить ход процесса оптимизации. На рис. 4, а показана динамика изменения функционала качества для лучших особей и усредненного по всем особям популяции: начиная с 40-й популяции, алгоритм сошелся к решению.

На рис. 4, б изображена наилучшая особь в виде столбчатых графиков элементов вектора оптимальных параметров $X=(k_p, T_u)$. На рис. 4, в показано изменение разброса – среднего расстояния между особями в популяциях поколений для критерия J . Как видно, разброс является существенным, что свидетельствует о значительном размере рассматриваемого пространства поиска.

Кроме специализированных графикяов ГА на рис. 4, г приведены переходные процессы САР

с полученными оптимальными параметрами. При сравнении рис. 3, б и рис. 4, г видно, что при настройке генетическими алгоритмами переходные процессы незначительно отличаются, обеспечивая близкое оптимальному качество регулирования.

Также для иллюстрации процесса исполнения генетического алгоритма на рис. 5 показана динамика изменения расположение лучших особей при поиске глобального минимума на графике линий уровня функционала качества $J = f(k_p, T_u)$. Лучшие решения в популяциях изменялись всего несколько раз, пока алгоритм не сошелся к оптимальному решению. Для сравнения: на рис. 4, а наблюдалось несколько изменений уровня функционала качества для лучших особей за время выполнения ГА.

Следует отметить, что линии уровня функционала качества, представляющие собой проекцию трехмерного графика $J = f(k_p, T_u)$ на плоскость настраиваемых параметров (рис. 5), приблизительно повторяют линии ограничений области допустимых параметров САР на рис. 2. Например, видно, что траектория ГА в начальный период работы прошла вдоль границы устойчивости, соответствующей линии 2 на рис. 2.

Это означает, что в области неустойчивости или автоколебаний функционал качества $J = f(k_p, T_u)$ принимает большие значения. Отсюда можно было бы сделать вывод, что задачу параметрического синтеза следует решать без учета ограничений, что существенно сокращает время расчетов. Однако такому подходу препятствует наличие локальных минимумов, расположенных вне области допустимых решений.

Таким образом, в результате проведенного исследования сделан вывод, что предлагаемый метод оптимизации с применением генетического алгоритма пригоден для параметрического синтеза САР.

Данный метод, реализованный на испытательном стенде ЗАО "Автоматика-Э" позволяет значительно уменьшить временные затраты на предварительную настройку разрабатываемых контроллеров и повысить качество регулирования.

Список литературы

1. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
2. Дьяконов В. П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008.
3. Трофимов А. И., Егунов Н. Д., Слекенич Я. В. Принципы построения автоматических регуляторов теплоэнергетических процессов АЭС. М., Энергоатомиздат, 1999.
4. Дорф Р., Бишоп 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",

Мещеряков Виталий Александрович – д-р техн. наук, проф. Сибирской автомобильно-дорожной академии (СибАДИ),

Контактный телефон (3812) 23-23-43.

E-mail: ladenisova@mail333.com, mva@webservis.ru

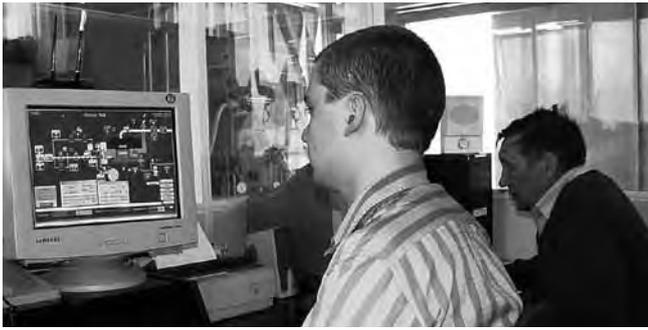


Рис.2. АРМ оператора (испытателя)

– включение силовой цепи (контактор 1-КМ1) только, если регулятор напряжения ИР 74/40 установлен в позицию минимального напряжения;

– подача высоковольтного напряжения только в случае закрытых дверей ограждения стенда и ограждения высоковольтной установки;

– предупредительная звуковая и световая сигнализация, выполненная лампами мигающего красного света, установленными по периметру ограждения стенда, при включенной силовой цепи;

– блокировка работы соответствующего пульта управления в случае ошибочного положения разъединителя – переключателя в шкафу управления.

Для проведения испытаний на стенде ППК в автоматизированном режиме запроектированы следующие измерительные каналы [3]:

– каналы измерения испытательного напряжения для диапазонов 0...10 кВ и 0...36 кВ с выводом информации на стрелочный вольтметр;

– канал измерения тока в испытательной цепи с выводом информации на стрелочный прибор;

– каналы измерения испытательного напряжения для диапазонов 0...10 кВ, 0...36 кВ и 0...70 кВ с выводом информации на электронный самописец;

– канал измерения тока в испытательной цепи с выводом информации на электронный самописец.

Рубцов Ю.Ф. – канд. техн. наук, зам. зав. научно-производственным компьютерным центром,

Богданов В.Г. – зав. проектно-конструкторским бюро «Автоматизация технологических процессов»,

Куликов Н.Д. зав. лаб. проектно-конструкторского бюро «Автоматизация технологических процессов»,

Рубцов Д.Ю. – зав. научно-производственным компьютерным центром (ОАО « Научно-исследовательского института управляющих машин и систем».

Контактный телефон (342)277-28-88. E-mail: rehino@permlink.ru

Стенд относится к испытательному оборудованию специального применения и изготовлен в единичном экземпляре.

Заключение

Результаты апробации нового стенда в составе ИИС и его промышленная эксплуатация показали надежность предложенных технических решений. Впервые в автоматизированном режиме на стенде ППК стали проводиться испытания всей линейки турбогенераторов серии ТТК мощностью 25...160 МВт. Эффективность испытаний повысилась на 15 %.

Производство получило автоматизированную систему промежуточных испытаний статора турбогенератора и новый стенд для проверки электрической прочности изоляции обмоток статоров крупных электрических машин мощностью до 160 МВт и напряжением до 11000 В на диэлектрическую прочность изоляции обмоток статоров относительно корпуса машин и между обмотками.

Автоматизация промежуточных испытаний дала возможность оператору (испытателю) сразу после окончания испытаний получить готовый протокол с результатами испытаний. Связь комплекса с операторской станцией (рабочее место испытателя) осуществляется по оптоволоконной линии через коммутатор.

Список литературы

1. *Глебов И.А.* Проблемы электромашиностроения, электроэнергетики, электрофизики и их решение. СПб.: Наука, 1999.
2. *Рубцов Ю.Ф., Рубцов Д.Ю.* Анализ погрешности многоканальных инструментальных средств АСУТП//Сб. научных трудов НИИУМС. Пермь. 2008.
3. *Рубцов Ю.Ф., Богданов В.Г., Куликов Н.Д., Рубцов Д.Ю.* Модернизация рабочих мест промежуточных испытаний для крупных электрических машин ТТК-110–2УЗ-Г//Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 1.

Новая книга

В издательстве «Профессия» вышла из печати учебно-справочное пособие «Автоматизация процессов нефтепереработки» (авторы Ермоленко А. Д., Кашин О. Н., Лисицын Н. В., Макаров А. С., Фомин А. С., Харазов В. Г.) объемом 303 стр., рис., сх., илл.

В первой части рассматривается структура распределенных систем управления нефтеперерабатывающих заводов: иерархия систем управления, виды программно-аппаратного обеспечения, приборы и методы измерения физико-химических свойств нефти, рабочие станции, контроллеры и вычислительные сети. Распределенные системы управления компаний Siemens, Honeywell, Invensys и др., а также взрыво- и пожаробезопасность нефтеперерабатывающих заводов.

Во второй части впервые освещаются современные технологические процессы нефтепереработки с развернутыми схемами автоматизации этих процессов. К их числу отнесены процессы первичной переработки нефти (обезвоживания и обессоливания на установках ЭЛОУ-АТ

и ЭЛОУ-АВТ и процессы перегонки нефти на установках АТ и АВТ), каталитические процессы переработки бензиновых фракций (автоматизация процессов изомеризации легких бензиновых фракций, каталитического риформинга, каталитического крекинга и гидрирования непредельных углеводородов), процессы гидрооблагораживания нефтяных фракций (автоматизация процессов гидроочистки моторных топлив, гидрокрекинга и гидротермических процессов), термические процессы (автоматизация процессов замедленного коксования, термического крекинга, висбрекинга и пиролиза). В отдельной главе рассматриваются вопросы автоматизации процессов производства водорода, серы и компаундирования моторных топлив.

Книга предназначена специалистам по автоматизации технологических процессов, инженерам и технологам нефтеперерабатывающих заводов, сотрудникам проектных организаций и НИИ, студентам, аспирантам и преподавателям профильных ВУЗов.

Заявки на приобретение книги принимает редакция «Профессия».

Контактный телефон (812) 740-12-60. E-mail: bookpost@professija.ru. Http://www.professija.ru