



ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

А.В. Голубев (ИГЭУ им. В.И. Ленина), В.Е. Ершов, С.П. Сердобинцев (КГУ)

Парогазовые установки широко распространены по всей территории России, высокий КПД является серьезным преимуществом перед другими способами генерации. Однако серьезное влияние на работу блока оказывают погодные условия. Изменения параметров наружного воздуха значительно сказываются на работе газотурбинной установки. Оператор энергоблока придерживается режимных карт и опирается на личный опыт, ему достаточно сложно предсказать поведение системы при других значениях параметров. Поддержание оптимального режима работы парогазовой установки представляется сложной научно-технической задачей, решение которой возможно путем создания автоматизированной системы оптимизации как системы помощи оператору. Система позволит корректировать задания регуляторов с целью получения максимального коэффициента полезного действия. Для решения задач глобальной оптимизации хорошо зарекомендовал себя генетический алгоритм (ГА).

Для исследований используется имитационная модель газотурбинной установки (ГТУ), которая позволяет выполнить исследование и отладку алгоритмов оптимизации и управления. Система оптимизации обрабатывает информацию, получаемую от модели и реального объекта (или его прототипа), определяет оптимальные параметры работы установки, мощность энергоблока и температуру уходящих газов. Система выдает корректирующие воздействия на регуляторы топлива и входного направляющего аппарата ГТУ.

В работе приведена практическая реализация оптимизационного контура, базирующегося на генетическом алгоритме, его структурная схема и принцип взаимодействия с объектом управления и имеющейся системой регулирования. Система оптимизации может работать в двух режимах. В режиме максимальной эффективности определяются параметры регуляторов для увеличения выходной мощности установки. В режиме заданной мощности определялся минимальный расход топлива при сохранении максимального количества теплоты за ГТУ. Показано увеличение эффективности работы ГТУ, полученные результаты могут быть использованы как основа для разработки реальной системы в составе АСУТП электростанции.

Ключевые слова: генетический алгоритм, математическое моделирование, АСУТП электростанций, газотурбинная установка.

Введение

Парогазовые установки широко распространены по всей территории России. Их высокий КПД (свыше 60%) является весомым преимуществом перед другими способами генерации электрической энергии. Значительное влияние на работу энергоблока ПГУ оказывают погодные условия — давление и температура окружающего воздуха [1, 2]. Для климата России характерны большие перепады температур в течение суток и в течение года, а средняя температура почти во всех регионах далека от расчетной (15 °С). В холодное время года возникает необходимость прикрывать входной направляющий аппарат (ВНА), что снижает экономичность и мощность ГТУ и ПГУ в целом. В теплый период времени температура окружающего воздуха накладывает ограничения на максимальную мощность ГТУ из-за повышения температуры уходящих газов перед котлом-утилизатором сверх нормы [1].

Для повышения эффективности работы энергоблока ПГУ в нерасчетных режимах, в частности, при

низкой температуре окружающего воздуха, предложены конструктивные решения в работе [1]. В области совершенствования методов управления предложены решения [3, 4].

Ранее была разработана имитационная модель газотурбинной установки с системой впрыска воды в проточную часть компрессора [5]. В работе проведено исследование влияния впрыска горячей воды как средства повышения температуры воздуха перед компрессором в холодное время года. Показано, что, используя впрыск воды, можно получить дополнительную выработку мощности и тепла уходящих газов, что увеличивает эффективность работы ГТУ и котла-утилизатора (КУ) соответственно. Однако вопрос автоматического управления данным впрыском, а также определения оптимума соотношения «расход воздуха-угол открытия ВНА-температура воды» остается не решенным. Таким образом, разработка алгоритма для поисковой подсистемы оптимизации режима работы энергоблока ПГУ является актуальной научно-технической задачей.

Методы исследования

В работе рассматривается вопрос определения оптимальных параметров воды, впрыскиваемой в проточную часть газотурбинной установки в холодное время года. Для решения данной задачи предлагается использование генетического алгоритма (ГА). ГА — механизм эволюционного поиска, который начал использоваться в различных задачах оптимизации, управления ресурсами, планирования производства и др. с начала 90-х гг XX века. Механизм его действия подобен эволюции живых организмов и согласуется с принципом «выживает сильнейший». Основные достоинства ГА:

1) не требуют никакой информации о поверхности ответа;

2) работают при наличии нелинейных ограничений и шумов;

3) просты и прозрачны в реализации;

4) применимы для задач крупномасштабной оптимизации;

5) могут быть использованы в задачах с изменяющимися параметрами.

Известно применение ГА совместно с классическими методами управления, например, настройка коэффициентов ПИД-регулятора [6], их адаптация или оптимизация [7, 8, 9], что позволяло повысить быстродействие и точность регулирования. А также использование ГА в различных предиктивных алгоритмах [10, 11] для прогнозирования поведения объекта и повышения качества управления.

В данной работе предлагается использование ГА в роли корректора системы автоматического регулирования мощности ГТУ. Система оптимизации включает: объект управления, модуль имитационного моделирования объекта управления и модуль расчета генетического алгоритма. В модуле расчета ГА на основе данных от объекта управления и его имитационной модели рассчитывается величина задания или коррекции регуляторов ГТУ. Модуль расчета может находиться на инженерной станции АСУТП и получать информацию с архивного сервера АСУТП. Модель объекта представляет собой систему дифференциальных и балансовых уравнений (законы сохранения), реализованных в среде имитационного моделирования. Обмен данными может быть реализован через семейство технологий OPC (OLE for Process Control). В связи с ростом числа тренажеров энергоблоков [12] и их совершенствованием представляется возможным осуществить интеграцию тренажера с расчетным модулем ГА.

Экспериментальная установка включает:

1) модель ГТУ, которая работает в режиме реального времени и является прототипом реального объекта управления. Работой модели ГТУ управляют моделируемые регуляторы мощности, температуры уходящих газов и впрыска воды;

0	1	1	0	0	0	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	1	1	0	1

Рис. 1. Пример скрещивания двух значений

2) оптимизационный контур, включающий модель ГТУ и генетический алгоритм. Оптимизационный контур работает в ускоренном времени.

Модуль ГА содержит вектор исходных данных (α — угол открытия ВНА, $T_{\text{воды}}$ — температура воды, $F_{\text{воды}}$ — расход воды), параметры на-

стройки генетического алгоритма и блок определения оптимума целевой функции и выходных параметров. На каждом шаге алгоритма оптимизационный контур получает информацию о состоянии прототипа реального объекта и просчитывает несколько вариантов исходных данных с помощью имитационной модели ГТУ. Затем определяется оптимум, и осуществляется повторный обмен данными — значения температуры уходящих газов, мощность и расход воды на впрыск передаются на вход регуляторов ГТУ.

Генетически алгоритм представляет собой итерационный процесс, начинающийся с инициализации популяции P . Затем входные данные преобразуются в бинарный код. На каждом поколении популяции реализуется предусмотренные алгоритмом генетические операторы, среди них:

1) селекция — определение трех из пяти лучших значений переменной (хромосом), при которых достигается оптимальное значение целевой функции;

2) формирование родительских пар — используются лучшие два значения переменной, при которых значение оптимума максимально (родительские хромосомы);

3) скрещивание — формирование новых значений переменной путем скрещивания генов родителей в кросс-точках. Здесь значения переменных, отобранных на предыдущем этапе, представляются в виде десятиразрядного бинарного кода и побитово скрещиваются (рис. 1). В экспериментах параметр скрещивания равен 5, то есть для получения новых переменных берутся первые 5 битов первой переменной и вторые 5 битов второй переменной и наоборот;

4) генная мутация — случайное изменение одного бита с 0 на 1 и наоборот.

Для завершения итерационного процесса в ГА необходимо либо получение результата, не хуже заданного, либо фиксацию факта попадания в зону глобального экстремума (при этом требуемое качество может быть не достигнуто). Значение целевой функции (1) представляет собой сумму значений параметров:

$$O_1 = 2 * N + \left| Q - Q_{\text{затр}} \right| - 20 * \left| T_{\text{yx}} - T_{\text{здн}} \right|, \quad (1)$$

где N — мощность ГТУ, МВт; Q — количество теплоты на выходе ГТУ, кДж; $Q_{\text{затр}}$ — количество теплоты, затраченное на нагрев воздуха, кДж; T_{yx} — температура уходящих газов, °С; $T_{\text{здн}}$ — заданная температура уходящих газов, °С. Генетический алгоритм осуществляет поиск максимального значения целевой функ-

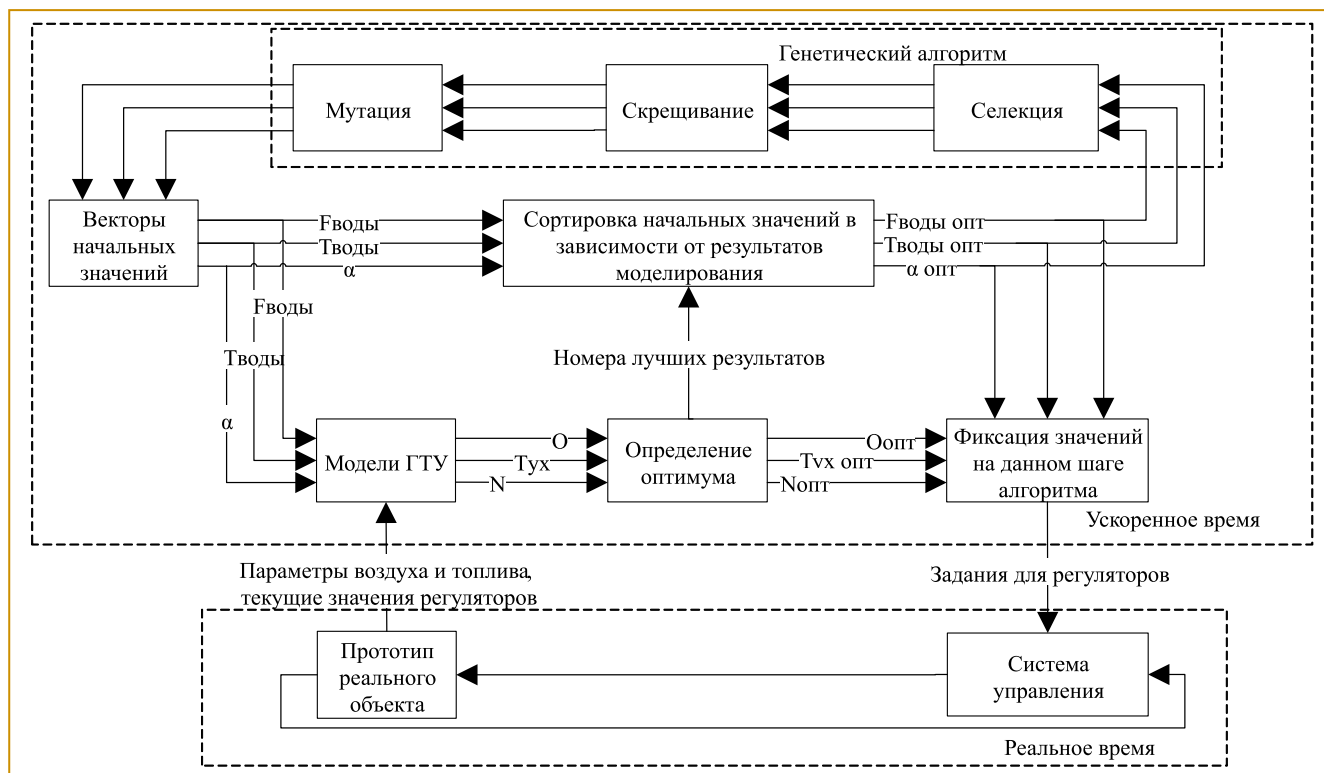


Рис. 2. Общая схема работы алгоритма оптимизации: α , $T_{\text{воды}}$, $F_{\text{воды}}$ – векторы начальных значений; N , $T_{\text{ух}}$ – расчетные параметры; $\alpha_{\text{опт}}$, $T_{\text{воды опт}}$, $F_{\text{воды опт}}$ – отсортированные векторы начальных значений; $N_{\text{опт}}$, $T_{\text{ух опт}}$, $O_{\text{опт}}$ – отсортированные расчетные параметры

ции. Таким образом, результатом работы алгоритма является поиск максимальных значений количества теплоты на выходе ГТУ и мощности ГТУ при постоянном значении температуры уходящих газов.

Последнее слагаемое (отклонение по температуре) введено для того, чтобы расчетные значения не выходили за диапазон поддержания безопасного режима эксплуатации ГТУ. Схема работы ГА приведена на рис. 2.

Приведем пример работы алгоритма на одном параметре.

1. Инициализация начальных значений. Начальные значения расхода воды на впрыск:

1, 2, 3, 4 и 5 кг/с.

2. Значения расхода воды на впрыск, параметры топлива и воздуха, полученные от прототипа реального объекта, подставляются в модели ГТУ. Получаем значения мощности: 127, 130, 129, 133 и 131 МВт.

3. Определяется значение целевой функции. В данном примере оно равно значению мощности.

4. Сортируем значения целевой функции по возрастанию. Получаем следующий порядок: 133, 131, 130, 129 и 127 МВт.

5. В соответствии с сортировкой целевой функции располагаем начальные значения расхода воды на впрыск: 4, 5, 2, 3 и 1 кг/с.

6. Фиксируется максимальное значение целевой функции и значение переменной, при которых оно получилось — мощность ГТУ 133 МВт и расход воды на впрыск 4 кг/с. Эти данные передаются в прототип реального объекта.

7. Далее формируются новые значения расхода воды на впрыск с помощью ГА. На этапе селекции отбирается два лучших начальных значения после сортировки — 4 кг/с и 5 кг/с.

8. На следующем этапе эти числа масштабируются и преобразуются к десятизрядному двоичному коду. Для выбранного диапазона расхода воды на впрыск 0... 10 кг/с, значение «пять» представляется в виде 100000000, а значение «четыре» — в виде 0110011010. Затем происходит скрещивание в выбранной точке (после пятого бита), в результате которого получаются числа 1000011010 и 0110000000. Переводим их в десятичную систему и масштабируем к исходному диапазону, получаем 5,25 кг/с и 3,75 кг/с.

9. Затем значение 2 кг/с (третье значение в отсортированном списке), представленное в виде двоичного кода — 0011001101, меняет случайный бит (допустим, второй) на другой. Получаем число 0111001101, что равняется 4,5 кг/с.

10. Формируем новый список начальных значений: — два лучших значения по результатам моделирования — 4 и 5 кг/с.

— два значения, полученных по результатам скрещивания, — 5,25 и 3,75 кг/с.

— одно значение, полученное в результате мутации, — 4,5 кг/с.

11. Начинается новый цикл работы алгоритма с полученным списком начальных значений.

Оптимизация работы ГТУ может быть выполнена по двум режимам. Первый вариант оптимизации: по

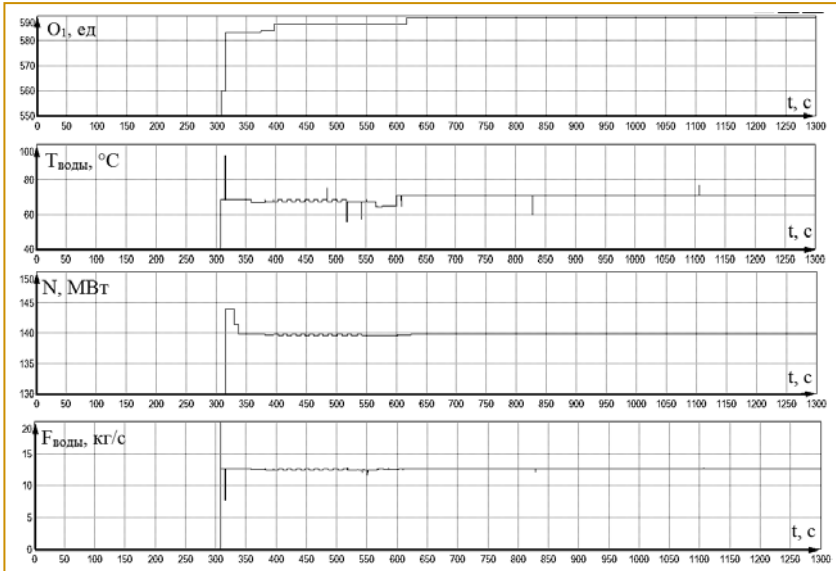


Рис. 3. Параметры, передаваемые генетическим алгоритмом

которых сохраняется требуемая температура уходящих газов. Происходит увеличение расхода воды на впрыск перед компрессором ГТУ до 13 кг/с и рост температуры воды до 71,8 °С. Вместе с этим растет температура воздуха перед компрессором ГТУ с -15 °С до -1,6 °С. При небольшом росте температуры уходящих газов до 544 °С увеличилась мощность ГТУ с 133,43 МВт до 139,791 МВт. В результате работы поисковый алгоритм в режиме реального времени примерно за 300 с позволил вывести ГТУ в более эффективный режим работы (повысить мощность ГТУ на 6,361 МВт с сохранением заданной температуры уходящих газов). При этом отклонения всех основных параметров находятся в допустимых диапазонах регулирования.

Результаты в режиме заданной мощности

Таблица 1. Сравнение результатов работы системы

Параметр	Без впрыска	С впрыском
Мощность, МВт	133,43	139,791
Количество теплоты за ГТУ, кДж	310,31	309,564
Положение ВНА, %	41,97	23
Температура воздуха перед ОК, °С	-15	-1,6

иск таких соотношений параметров, при которых получается максимальная генерируемая мощность, при этом расход топлива остается постоянным. Во втором режиме оптимизации задачей является поддержание требуемой мощности при максимальной экономии топлива.

Результаты в режиме максимальной эффективности

В этом режиме осуществлялся поиск таких значений температуры, расхода воды на впрыск и положения ВНА, при которых вырабатывается максимальная мощность ГТУ при неизменном расходе топлива. Температура наружного воздуха в эксперименте равна -15 °С. В первые 100 с происходит разгон модели, затем включение регуляторов в работу, и спустя еще 100 с происходит включение оптимизационного контура. В течение нескольких шагов видны нулевые результаты — момент, когда в результате перебора вариантов оптимум принимает отрицательные значения (имеет место значительный штраф по температуре). Затем происходит приближение к максимуму целевой функции. На рис. 3, рис. 4 и в табл. 1 приведены результаты работы системы.

В процессе работы алгоритма происходил поиск оптимальных параметров впрыска, при

При участии энергоблока в общем первичном регулировании частоты-мощности энергоблок несет заданную нагрузку в соответствии с диспетчерским графиком нагрузки. Для такого режима производился поиск значений расхода воды на впрыск, положения ВНА с минимальным расходом топлива для поддержания заданной мощности. При этом предполагается, что для впрыска используется вода с температурой 70 °С (в алгоритме ее температура не изменяется, но в реальных условиях может изменяться). Температура наружного воздуха в эксперименте равна -15 °С. Вектор исходных данных выглядит следующим

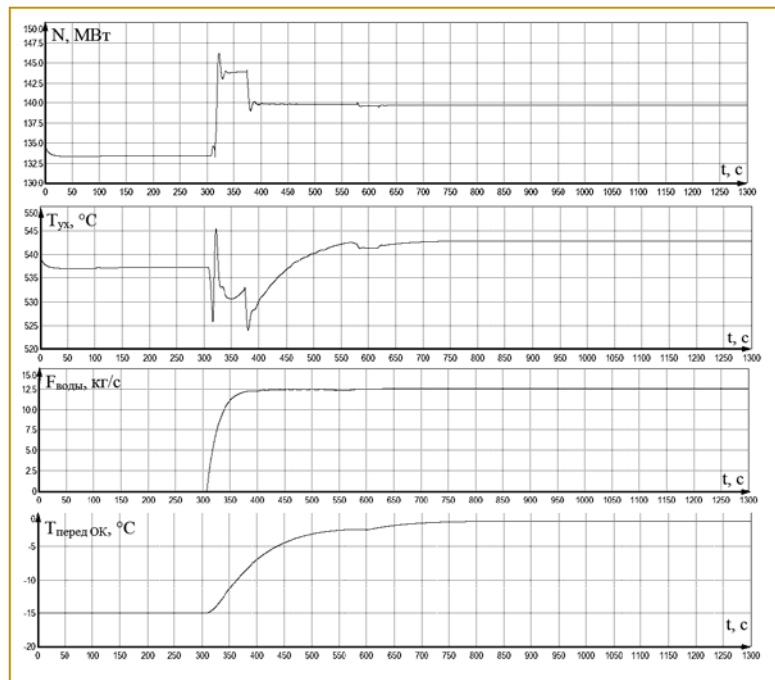


Рис. 4. Динамика работы модели реального объекта

Таблица 2. Сравнение результатов работы системы

Параметр	Без впрыска	С впрыском
Мощность, МВт	133,43	133,287
Число теплоты за ГТУ с учетом затрат, кДж	310,31	302,543
Число теплоты за ГТУ без учета затрат, кДж	-	314,843
Положение ВНА, %	41,97	24,32
Расход топлива, нм ³ /ч	40015	38783,4
Температура воздуха перед ОК, °С	-15	-5,87
Расход воды, кг/с	0	8,56

образом: α — угол открытия ВНА, $V_{топл}$ — расход топлива, $F_{воды}$ — расход воды. Эти же параметры ГА передает прототипу реального объекта.

Формирование целевой функции (2) происходит следующим образом:

$$O_2 = 20 * |N - N_{зад}| + 10 * |T_{ух} - T_{зад}| + 0,00005 * V_{топл}, \quad (2)$$

где N — мощность ГТУ, МВт; $N_{зад}$ — заданная мощность ГТУ, МВт; $T_{ух}$ — температура уходящих газов, °С; $T_{зад}$ — заданная температура уходящих газов, °С; $V_{топл}$ — расход топлива, нм³/ч. Генетический алгоритм осуществляет поиск минимального значения целевой функции. При этом мощность ГТУ и температура уходящих газов сохраняется на заданном уровне, а расход топлива минимизируется.

Так как оптимум возможен при различных комбинациях входных параметров (в некоторой области), то для устойчивости работы алгоритма предусмотрена блокировка изменения задания мощности (если изменения целевой функции не происходит, то задание регулятора остается неизменным). Первые 100 с происходит разгон модели, затем происходит включение регуляторов в работу и после выдержки еще 100 с, происходит включение в работу оптимизационного алгоритма. В течение следующих 150 с видны сильные колебания мощности (в пределах 8 МВт) и температуры (в пределах 30 °С). Это объясняется первыми шагами работы генетического алгоритма. Результаты работы алгоритма приведены на рис. 5, рис. 6 и в табл. 2.

В процессе работы алгоритма происходил поиск минимального расхода топлива, при котором сохраняется требуемая температура уходящих газов и мощность ГТУ. По графикам видно, что происходит снижение расхода топлива с 40015 нм³/ч до 38783,4 нм³/ч. Вместе с этим увеличивается количество воды на впрыск до 8,56 кг/с, растет тем-

пература воздуха перед компрессором ГТУ до -5,87 °С. В результате работы, поисковый алгоритм в режиме реального времени примерно за 400 с позволил вывести ГТУ в более эффективный режим работы (снизить расхода топлива на 1231,6 нм³/ч с сохранением заданной мощности ГТУ и температуры уходящих газов), при этом отклонения всех основных параметров находятся в допустимых диапазонах регулирования.

Выводы

Для определения оптимальных параметров впрыска воды в проточную часть компрессора в холодное время года была разработана подсистема оптимизации на базе генетического алгоритма, позволяющая работать в двух режимах. В первом режиме основной задачей является поиск максимальной эффективности использования ГТУ, а во втором — минимизация затрат топлива при поддержании требуемой мощности. Система базируется на ГА, непрерывно обменивающимся информацией с моделью ГТУ.

С помощью оптимизации параметров впрыскиваемой воды в проточную часть компрессора в первом опыте удалось получить выигрыш в мощности в 6,361 МВт (4,77%), при этом потери тепла составили 0,746 кДж (-0,24%). Во втором опыте за счет включения впрыска воды достигается экономия топлива в 1231,6 нм³/ч (3,08%), но имеются потери по выработке тепла в -7,767 кДж (-2,5%) при учете затрат на нагрев воды (или дополнительный вы-

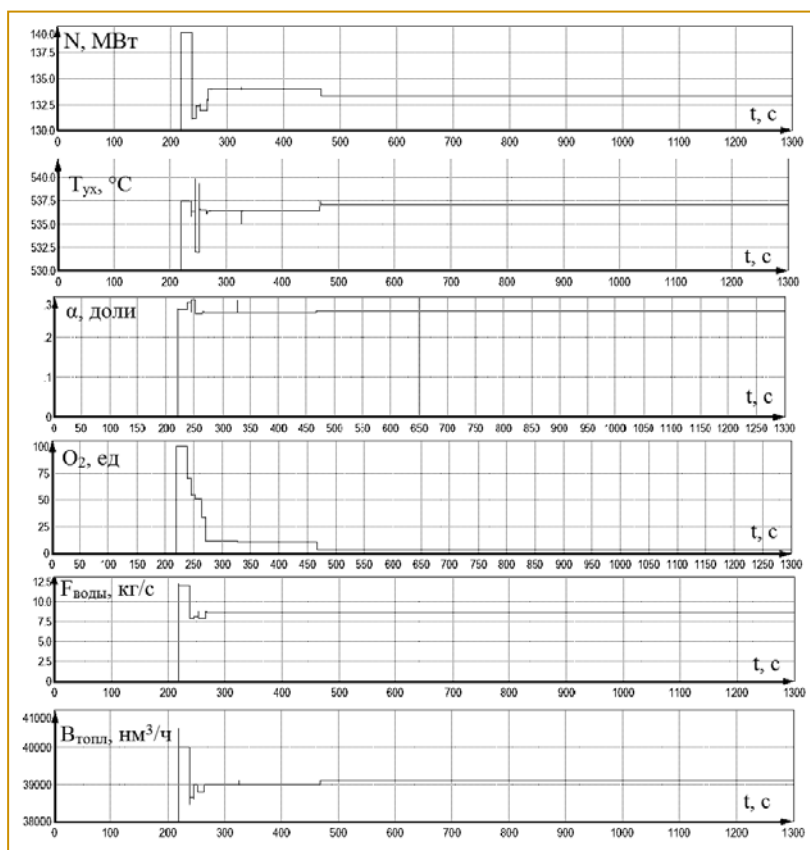


Рис. 5. Параметры, передаваемые генетическим алгоритмом

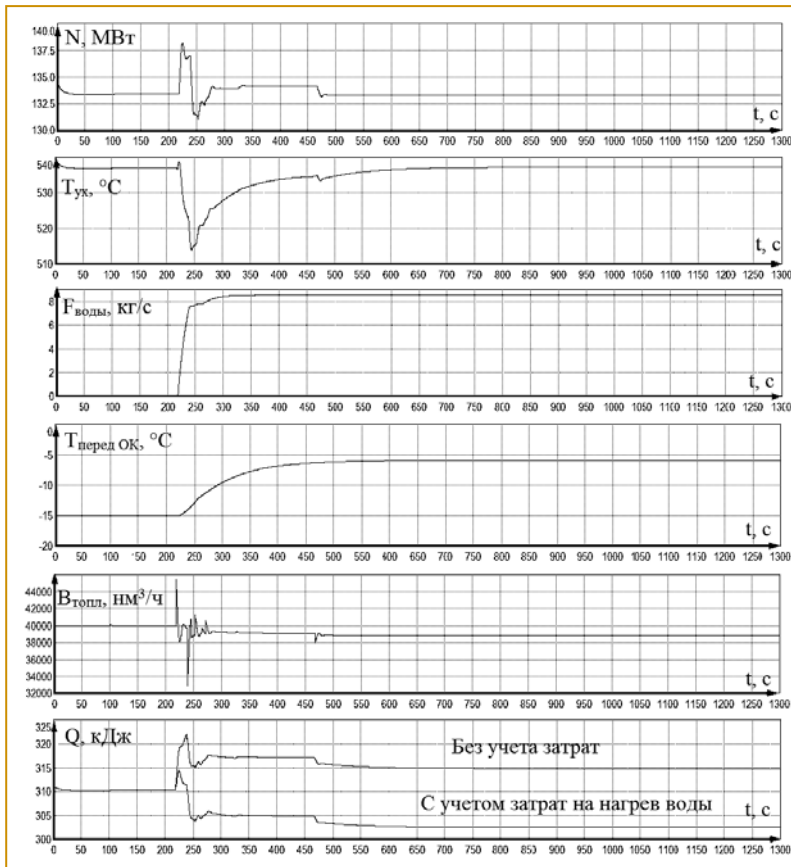


Рис. 6. Динамика работы модели реального объекта

игрыш в 4,533 кДж (1,46%) без учета затрат). Прогнозируемый и реальный расходы топлива различаются из-за того, что в модель объекта передаются лишь задания для регуляторов, но не фактические значения величин.

Практическая реализация такой системы возможна как в контроллере, так и на базе отдельной расчетной станции в качестве системы помощи оператору энергоблока или непосредственной управляющей системы. Для этого в дальнейшем необходимо исследовать влияние дополнительных факторов на работу системы как в статическом, так и в переходных режимах.

Список литературы

1. Рабенко В.С. Об особенностях эксплуатации энергоблоков ПГУ в климатических условиях России. / В.С. Рабенко, И. В. Будаков, В. М. Неуймин // Энергосбережение и водоподготовка. — 2010. — №6. — С. 9-14.
2. Мошкарин А.В. Влияние определяющих факторов на изменение мощности ПГУ-325./А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин, Т.А. Жамлиханов//Вестник ИГЭУ. — 2010. — № 4. — С. 13-16.

3. Муравьев И.К. Технология интеллектуализации АСУТП и повышение всережимной эффективности энергоблоков ПГУ / И. К. Муравьев, Ю. С. Тверской // Оптимизация и повышение эффективности работы ТЭС путём внедрения АСУТП.: сб. докл. Третьей Междунар. научно-техн. конф. — Москва: ОАО «ВТИ», 2014. — С. 66-72.

4. Способ повышения КПД парогазовой энергоустановки: пат. 2334112 Рос. Федерация: МПК F01K 23/02, F02C 6/00 / Кириленко В.Н.; заявитель и патентообладатель Кириленко В. Н. — N. 2005102152/06, заявл. 28.01.2005; опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26.

5. Ершов В.Е. Повышение эффективности использования газотурбинной установки с помощью впрыска воды перед компрессором / В. Е. Ершов, А. В. Голубев // XIII Тинчуринские чтения (24-27 апр.): материалы. — Казань, 2018. — т.2. — С. 12-14.

6. Луков Д.К. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации/Луков Д.К., Богданов Д.С., Шагин А.В./Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. LX студ. межд. научно-практ. конф. (25 дек.). — Новосибирск, 2017. — С. 334-338.

7. Степаненченко И.В. Реализация генетического алгоритма адаптации параметров регулятора в распределенной вычислительной системе / И.В. Степаненченко, В.Г. Семенов, В.В. Сургутанов // Известия ВолгГТУ. — 2007. — №9. — С. 24-27.

8. Куцый Н.Н. Применение генетического алгоритма для оптимизации автоматических систем с ПИД-регулятором / Н.Н. Куцый, Н.Д. Лукьянов // Вестник Иркутского государственного университета. — 2012. — №6. — С. 6-10.

9. Andri M., PID parameters optimization by using genetic algorithm / Andri M., Shinichiro Yo., Masashi F. // ISTECS Journal. — Vol. 8. — 2006., — pp. 34-43.

10. Ardavan M.H. Modular multilevel converter circulating current control using model predictive control combined with genetic algorithm./Ardavan M.H., Senol I.B., Seyed H.H. // 9th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perception, ICSCCW 2017, 24-25 August 2017, Budapest, Hungary.

11. Santosh K.S. Genetic algorithms techniques based optimal PID tuning for speed control of DC motor/Santosh K.S., Vinod K.G//American Journal of Engineering and Technology Management. — Vol. 1. — Iss. 4. — 2016. — pp. 59-64.

12. Рубашкин А.С. Компьютерный тренажер энергоблока ПГУ-450Т. / Рубашкин А.С., Обуваев А.С. // Тренажерні комплекси та системи: 3 науково-практичної конференції: в 2-х т. — Київ.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2006.

Голубев Антон Владимирович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой систем управления Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина,

Ершов Владислав Евгеньевич — аспирант, **Сердобинцев Станислав Павлович** — д-р техн. наук, проф. кафедры автоматизации производственных процессов

Калининградского государственного технического университета.

E-mail: kafsu@su.ispu.ru vladershov95@mail.ru