

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА В КОМПРЕССОР ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК БЛОКОВ ПГУ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ РЕЖИМНЫХ И ВНЕШНИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ¹

Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев (ФГБОУВО ИГЭУ им. В.И. Ленина)

Приводятся результаты исследования на математической модели энергоблока с ПГУ ключевых факторов, влияющих на эффективность его работы. На основе полученных результатов разработана соответствующая автоматическая система регулирования (АСР) расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок блоков ПГУ с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов и дается оценка эффективности ее работы при вариации температуры наружного воздуха.

Ключевые слова: технология функционального проектирования систем управления, газотурбинная установка, парогазовые технологии, эффективность энергоблока, режимные и внешние факторы, математическая и имитационная модели, синтез САУ.

Совершенствование технологии создания полноценных АСУТП электростанций неразрывно связано с задачами структурного синтеза локальных (контроллерный уровень) систем автоматического управления (САУ) и затрагивает при этом целый ряд междисциплинарных задач. Особенно остро междисциплинарные проблемы проявились при освоении инновационных парогазовых технологий. Поиск факторов, влияющих на потерю эффективности инновационного оборудования бинарных энергоблоков, путей и методов решения проблем достижения расчетной (проектной) эффективности автоматизированных объектов, совершенствование алгоритмов управления, являются важнейшими актуальными задачами освоения современных инновационных парогазовых технологий [1].

В настоящей статье представлены результаты очередного этапа исследований, который является логическим развитием обобщенного термодинамического анализа эффективности газотурбинной установки (ГТУ) и бинарного энергоблока в целом, выполненного ранее в аспекте анализа физических проблем структурного синтеза локальных систем управления, и созданной всережимной математической модели энергоблока ПГУ, позволяющей выполнить необходимые вычислительные эксперименты по совершенствованию системы регулирования расхода воздуха в компрессор ГТУ блоков ПГУ с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов [2,3].

Разработка АСР расхода общего воздуха в компрессор ГТУ

Задаче автоматического регулирования ГТУ в современной науке и технике уделяется большое внимание [4–6]. Однако известные технические решения не вскрывают и не устраняют первопричину дисбаланса в сложной системе, который возникает при изменениях параметров наружного воздуха.

Как было показано в [3,7], обобщенными координатами, характеризующими состояние ГТУ как термодинамической системы, служат как режимные

параметры энергоблока: давление в установке, расход топлива, так и комплексированные показатели, одним из которых является массовый расход воздуха.

Однако все известные устройства автоматического регулирования положения направляющего аппарата компрессора, выполнены, как правило, по схеме с жесткой обратной связью. Иными словами, базовый регулятор компрессора «не замечает» колебаний температуры и давления наружного воздуха и соответственно изменений массового расхода воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, то есть возникающий дисбаланс между заданным расходом топлива и необходимым для горения массовым расходом воздуха не устраняется. При этом возникает целый комплекс негативных последствий, влияющих на эффективность работы ГТУ в условиях изменяющихся внешних климатических факторов.

Во-первых, это «плавающая» мощность ГТУ, что влечет за собой нестабильность всего вектора выходных параметров установки. Во-вторых, поскольку потери в выработке электроэнергии покрываются за счет дополнительной подачи топлива, то двигатель при этом форсируется, падает его экономическая и экологическая эффективность, надежность и общий ресурс. Возникает вопрос: «Можно ли и как решить эту проблему на ранних стадиях функционального проектирования ГТУ, энергоблока и его систем управления?»

К внешним климатическим факторам относят изменение температуры, давления и влажности наружного воздуха. При этом изменение температуры наружного воздуха имеет сезонный низкочастотный тренд искаженный различного рода случайными вариациями. В целом влияние температуры носит нечеткий скрытый характер, что не позволяет экспериментально изучить особенность влияния температуры наружного воздуха на основные параметры блока.

В настоящей работе задача решается путем постановки вычислительных экспериментов на основе разработанной математической модели энергоблоков с ПГУ, представленной в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих

¹ Исследования выполнялись при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-48-03215)

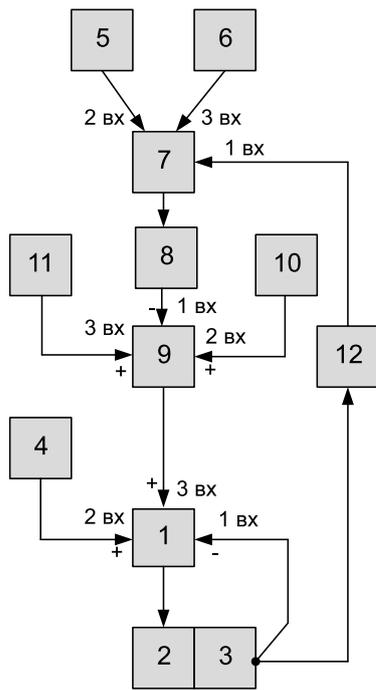


Рис. 1. Устройство регулирования расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок бинарного энергоблока, где 1 – регулятор положения входного направляющего аппарата компрессора; 2 – исполнительный механизм управления углом открытия входного направляющего аппарата компрессора; 3 – датчик положения исполнительного механизма входного направляющего аппарата компрессора; 4 – блок задания угла открытия входного направляющего аппарата компрессора; 5 – датчик температуры наружного воздуха; 6 – датчик давления наружного воздуха; 7 – блок формирования комплексированного сигнала; 8 – ограничитель скорости изменения комплексированного сигнала; 9 – корректирующий регулятор; 10 – задатчик корректирующего регулятора; 11 – блок формирования задания от системы более высокого уровня; 12 – блок вычисления текущего значения проточного сечения

уравнений состояния в виде открытого полимодельного комплекса [2]. Многопараметрическая нелинейная математическая модель доведена до уровня имитационной модели, реализованной в универсальной среде имитационного моделирования. Модель обладает единой структурой и определенной инвариантной частью, позволяющей моделировать работу энергоблока при различном составе оборудования и режимных условиях.

Постановка вычислительных экспериментов выполняется в два шага:

- 1) вывод модели на заданный режим;
- 2) исследование и анализ динамических характеристик блока по каналам влияния температуры наружного воздуха для полного диапазона нагрузок.

Проведенные поисковые исследования на математической модели, на примере блока ПГУ-325 показали, что определяющим в нарушении расчетного режима фактором является неконтролируемое при естествен-

ных колебаниях температуры и давления наружного воздуха «плавающее» изменение массового расхода воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, которое приводит к изменению фактического значения КПД ГТУ и энергоблока в достаточно широком диапазоне [7].

Предлагается повысить точность регулирования расхода воздуха и соответственно оптимизировать режим работы ГТУ и энергоблока путем устранения возникающего дисбаланса между заданным расходом топлива и необходимым расходом воздуха при естественных колебаниях температуры и давления наружного воздуха на входе в компрессор ГТУ путем стабилизации его массового расхода на входе в ГТУ.

Разработанная автоматическая система регулирования (АСР) содержит базовый регулятор расхода воздуха (угла открытия входного направляющего аппарата (ВНА)), охваченный жесткой обратной связью по положению ВНА и корректирующий регулятор с сигналом по массовому расходу воздуха G_m , который формируется в зависимости от угла открытия ВНА и параметров наружного воздуха (рис. 1) [7].

Устройство автоматического регулирования расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок бинарного энергоблока работает следующим образом (рис. 1).

Регулятор 1 поддерживает заданное блоком 4 положение исполнительного механизма 2 входного направляющего аппарата компрессора ГТУ по сигналу жесткой обратной связи от датчика 3 положения исполнительного механизма.

Корректирующий регулятор 9 с задатчиком 10 и блоком задания нагрузки компрессора от подсистемы более высокого уровня 11 при изменении параметров внешней среды воспринимает отклонение комплексированного сигнала от заданного, формирует сигнал небаланса и соответствующее корректирующее воздействие на регулятор 1, который изменяет положение направляющего аппарата ВНА, восстанавливая изменившийся при изменении температуры и/или давления расход воздуха.

Комплексированный сигнал формируется блоком 7 и является показателем изменений, связанных с вариацией температуры и давления наружного воздуха, и текущего значения проточного сечения входного направляющего аппарата компрессора, вычисляемого блоком 12 вычисления текущего значения проточного сечения входного направляющего аппарата компрессора. При этом комплексирование исходных параметров выполняется согласно выражению [8]:

$$G_m = m \cdot \frac{P_e^*}{\sqrt{T_e^*}} \cdot q(\lambda_e) \cdot F_e,$$

где G_m — оценка массового расхода воздуха, кг/с; $m=0,0404$ (кг·К/Дж)^{0,5} — размерный коэффициент, зависящий от показателя адиабаты и газовой постоянной воздуха; F_e — площадь проточной части на входе в двигатель, которая изменяется при изменении положения направляющего аппарата, м²; $q(\lambda_e)$ — относительная плотность потока; T_e^* — полная темпе-

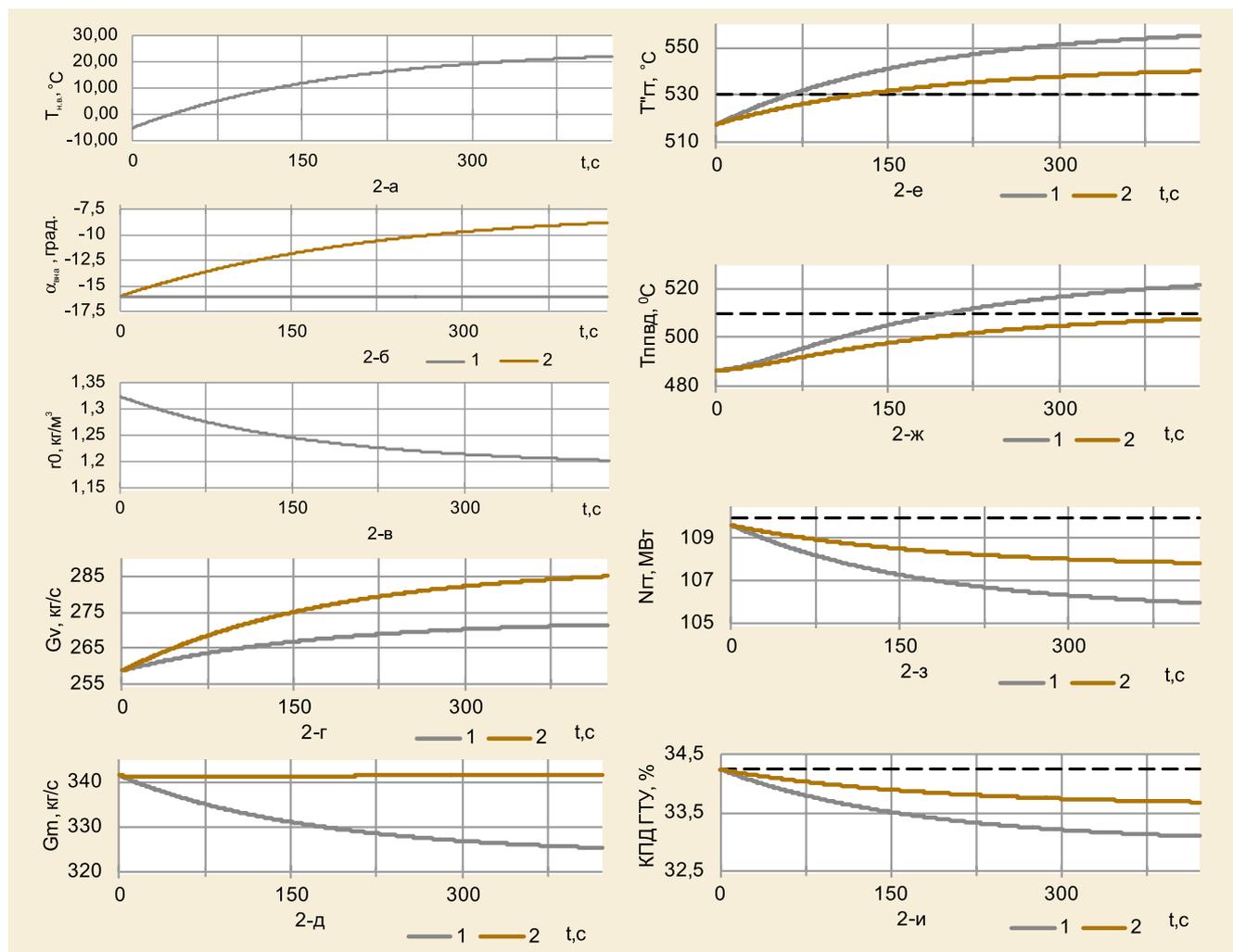


Рис. 2. Исследование эффективности управления энергоблоком ПГУ в зависимости от температуры внешней среды (в режиме полублока ПГУ-325), где 1 – влияние $T_{н.в.}$; 2 – со стабилизатором по массовому расходу воздуха G_m ; а – температура наружного воздуха; б – угол открытия ВНА; в – плотность воздуха; г – объемный расход воздуха; д – массовый расход воздуха; е – температура уходящих (дымовых) газов за ГТ; ж – температура перегретого пара контура ВД; з – электрическая мощность ГТУ; и – КПД ГТУ; горизонтальные пунктирные линии – верхние границы технологически безопасных значений параметров.

ратура воздуха ($T_b^* = T_{н.в.} + 273$), °K; $T_{н.в.}$ – температура наружного воздуха, °C; p_b^* – полное давление воздуха ($p_b^* = p_{н.в.} + h_b^* \cdot 9,81$), Па; $p_{н.в.}$ – давление наружного воздуха, Па; h_b^* – избыточное над атмосферным полное давление на входе в компрессор, мм.вод.ст.

Значение текущего проходного сечения определяется по конструктивным данным компрессора и угла открытия ВНА по регрессионной зависимости:

$$F_g = -0,001842 \cdot \alpha_{вн}^2 + 0,025 \cdot \alpha_{вн} + 11,097,$$

где F_g – площадь проточной части на входе в двигатель, м²; $\alpha_{вн}$ – угол открытия ВНА, град.

Исследования эффективности работы АСР массового расхода общего воздуха при вариации температуры наружного воздуха

Эффективность работы АСР с коррекцией по массовому расходу общего воздуха в компрес-

сор газотурбинных установок бинарного энергоблока при изменениях температуры внешней среды подтверждают результаты выполненных исследований (рис. 2).

Результаты исследования показывают, что при изменении температуры наружного воздуха (рис. 2-а), например, в сторону ее увеличения, угол открытия ВНА (рис. 2-б график 1) не изменяется (расход топлива задан постоянным 6,44 кг/с, что соответствует нагрузке ГТУ 110 МВт). Однако плотность забираемого воздуха (рис. 2-в) при этом снижается. Изменение плотности воздуха вызывает изменение его объемного (рис. 2-г график 1) и массового расходов (рис. 2-д график 1) на входе в компрессор, при этом объемный расход растет, а массовый – снижается. Изменение массового расхода приводит к изменению температур и за компрессором, и за ГТ в сторону роста (рис. 2-е график 1). При этом имеет место превышение тех-

нически безопасных значений параметров: температура уходящих газов за ГТУ отклоняется на 45 °С, а температура перегретого пара контура высокого давления — на 40 °С (рис. 2-ж график 1). При этом происходит снижение электрической мощности ГТУ (рис. 2-з график 1) приблизительно на 4,5 МВт и значения КПД ГТУ (рис. 2-и график 1) приблизительно на 1,25%. Температура перегретого пара контура высокого давления растет вслед за температурой уходящих газов за ГТ. На практике это ведет к тому, что требуется разгрузка блока, изменение его режима, чтобы ввести технологические параметры в расчетные диапазоны, что приводит к снижению эффективности работы ПГУ.

Использование рассматриваемого устройства регулирования расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок бинарного энергоблока позволяет удерживать технологические параметры энергоблока в расчетных диапазонах эффективного управления.

Сравнение результатов влияния температуры наружного воздуха без стабилизатора (на рис. 2 графики 1) и со стабилизатором (корректором) массового расхода воздуха в компрессоре ГТУ (на рис. 2 графики 2) говорит о достаточно высокой эффективности найденного технического решения.

Нетрудно видеть, что стабилизация массового расхода воздуха (в условиях нерасчетной температуры воздуха на всасе компрессора) возвращает практически все параметры в расчетные диапазоны эффективного управления. В частности, температура уходящих газов за ГТ (рис. 2-е график 2) при этом устанавливается на желаемом для паросиловой части энергоблока значении в 540 °С, что на 10 °С выше рабочего (расчетного) диапазона от 455 до 530 °С, определенного надежностью работы ГТУ согласно инструкциям по эксплуатации; температура перегретого пара контура высокого давления остается на расчетном уровне 510 °С (рис. 2-ж график 2), а потери электрической мощности и КПД ГТУ снизились в 2 раза, КПД КУ при этом на уровне расчетного — 85%, КПД ПТ — 32,5%, а КПД ПГУ на расчетном уровне (51...52%).

Полученные в работе результаты и независимые расчетно-аналитическое исследование воздухозаборного тракта газотурбинной установки ГТЭ-110 [9] говорят о необходимости проведения соответствующей экспертизы компрессоров ГТУ на вновь введенных энергоблоках с ПГУ, режим работы которых отличается от расчетного, на соответствие условиям, в которых они используются. При этом проектировать компрессоры для ГТУ необходимо не из условий расчетного режима, а из условия максимальной температуры наружного воздуха (фактического климатического местоположения станции).

Выводы

1. Показано, что ключевым (критическим) фактором влияния изменений температуры наружного воздуха на параметры блока является неконтролируемое изменение массового расхода общего воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ. Стабилизация массового расхода воздуха возвращает технологические параметры в расчетные диапазоны эффективного управления и создает предпосылки эффективного регулирования энергоблока в широком диапазоне изменения нагрузки.

2. Результаты анализа проведенных многосторонних исследований показали, что использование математической и имитационной моделей энергоблоков с ПГУ позволяют выполнить оценку соответствия эффективности работы технологического оборудования (прежде всего — компрессора ГТУ) заявленным режимным условиям и определять необходимые конструктивные характеристики объектов проектирования. Другими словами, проводить полноценную экспертизу всего теплоэнергетического оборудования станции с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов по местоположению станции.

Список литературы

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн.1. Проблемы и задачи. Кн.2. Проектирование. Кн.3. Моделирование/Под общей ред. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». — Иваново, 2013. — Кн.1—260 с. — Кн.2—436 с. — Кн.3—176 с.
2. *Тверской Ю.С., Муравьев И.К.* Технология разработки и оценка адекватности имитационной модели энергоблока ПГУ при изменении режимных и внешних факторов//Сб. трудов VII Всероссийской научно-практ. Конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). — М.: ИПУ РАН, 2015. Том 2. С. 357–360.
3. *Тверской Ю.С., Муравьев И.К.* Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбин энергоблока с ПГУ// Автоматизация в промышленности. 2016. №1. С. 53-57.
4. *Боднер В.А., Рязанов Ю.А., Шаймарданов Ф.А.* Системы автоматического управления двигателями летательных аппаратов. М.: «Машиностроение», 1973. С.181, рис.4.6.
5. Системы автоматического управления авиационными ГТД: энциклопедический справочник / Под ред. д.т.н., проф. О.С. Гуревича. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. — 208 с.: ил.
6. *Мельникова Н.С.* Определение расхода воздуха через двигатель в полете в реальном масштабе времени для использования в перспективных законах управления // Вестник УГАТУ. 2010. Т.14. №4 (39). С. 36-41.
7. *Тверской Ю.С., Муравьев И.К.* Об одном способе обеспечения расчетной эффективности энергоблоков ПГУ // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1. С. 30-36.
8. *Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М.* Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. М.: Машиностроение. 1977. 312 с.
9. *Будаков И.В., Буданов В.А.* Расчетно-аналитическое исследование воздухозаборного тракта газотурбинной установки ГТЭ-110 // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 3. С. 12-19.

Тверской Юрий Семенович — д-р техн. наук, проф.,

Муравьев Игорь Константинович — старший преподаватель кафедры систем управления ФГБОУВО

«Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».

Контактный телефон (4932) 26-97-58.

E-mail: kafs@su.ispu.ru