

Об одном способе обеспечения расчетной эффективности энергоблоков ПГУ

Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Одной из основных тенденций развития современной энергетики является сооружение парогазовых установок электростанций. Однако эффективность блоков ПГУ критична к температуре окружающей среды. Ее отклонение от расчетной величины (принятой $+15^{\circ}\text{C}$) приводит к существенному снижению эффективности использования топлива и неоправданным потерям. Таким образом, задача по обеспечению расчетной эффективности энергоблока ПГУ в условиях изменяющихся внешних и режимных факторов представляется весьма актуальной. Методы математического моделирования и вычислительного эксперимента позволяют уже на ранних стадиях функционального проектирования автоматизированного оборудования исследовать влияние ключевых факторов и оценить степень их влияния на расчетную эффективность. В связи с этим актуальной является задача по обеспечению расчетной эффективности энергоблока ПГУ в условиях изменяющихся внешних и режимных факторов.

Материалы и методы: Решение поставленной задачи осуществлено с применением методов неравновесной термодинамики, теории автоматического управления, математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Результаты: Разработана расширенная всережимная математическая модель энергоблока ПГУ в аспекте исследований влияния температуры наружного воздуха на его эффективность. Впервые показано, что ключевым фактором влияния изменений температуры наружного воздуха на параметры блока является неконтролируемое изменение массового расхода общего воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ. Выполнен синтез структуры САУ массового расхода общего воздуха. Проведено исследование эффективности САУ при вариации температуры наружного воздуха.

Выводы: Стабилизация массового расхода общего воздуха практически вводит технологические параметры блока, в том числе КПД, в расчетные диапазоны при изменяющейся температуре наружного воздуха.

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

On one of the ways to ensure calculated efficiency of combined-cycle power units

Yu.S. Tverskoy, I.K. Muravyov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Abstract

Background: One of the main trends in modern power generation industry development is construction of combined cycle gas turbines for power plants (CHP CCGT). However, the efficiency of CCGT units depends strongly on the ambient temperature. Its deviation from the calculated value (we assume it to be equal to $+15^{\circ}\text{C}$) leads to a significant reduction in fuel utilization efficiency and to unjustified losses. Mathematical model approaches and methods of computational experiments allow us as early as at the stage of functional design of automated equipment to investigate the influence of key factors and to estimate their influence on the calculated efficiency. Thus, it is particularly important now to ensure CCGT power unit calculated efficiency under the changing external and operational factors.

Materials and Methods: The formulated problem was solved by the methods of non-equilibrium thermodynamics, automated control theory, mathematical modeling and computational experiment.

Results: We have designed an extended fully-variable CCGT power unit mathematical model with an account of external air temperature influence on its efficiency. We are the first to show that the key factor of external air temperature variation influence on the unit parameters is uncontrolled variation of the total mass flow of the air fed to the gas-turbine compressor. We have designed an automatic control system of total air mass flow rate and studied its efficiency under external air temperature variations.

Conclusions: Stabilization of total air mass flow rate under the changing external air temperature brings the power unit process parameters, including the efficiency factor, practically to the design values.

Key words: control system design technology, thermal power plant, gas-turbine power unit, gas-vapor technologies, power unit efficiency, operating and external factors, mathematical and simulation models, automatic control system design.

Современные энергоблоки, построенные на базе парогазовых технологий, существенно

поднимают эффективность использования топливно-энергетических ресурсов (расчетные

оценки КПД энергоблоков ПГУ достигают более 50–60 %).

Однако опыт эксплуатации и экспериментальные исследования энергоблоков ПГУ показывают, что эффективность использования топлива весьма чувствительна к вариации множества режимных и внешних факторов: техническому состоянию тепломеханического оборудования, климатическим условиям и др. [1–4]. Одним из таких климатических факторов является температура наружного воздуха, ее естественные отклонения от расчетной (+15 °С) ведут к снижению эффективности использования топлива и к неоправданным потерям [5, 6].

Ниже приведены результаты аналитических исследований влияния температуры наружного воздуха на эффективность технологического процесса в ПГУ.

Математическая модель. Исследования выполнялись на математической модели [7, 8] энергоблока ПГУ-325.

В основу нелинейной (всережимной) математической модели положены законы сохранения неравновесной термодинамики. Использование фундаментальных физико-математических основ позволяет строго оценивать влияние принимаемых допущений, внешних и режимных факторов на качество результата. Математическая модель имеет открытую структуру, элементы которой представляют собой технологические участки оборудования. В тепловой схеме блока ПГУ ключевым элементом является газотурбинная установка (рис. 1).

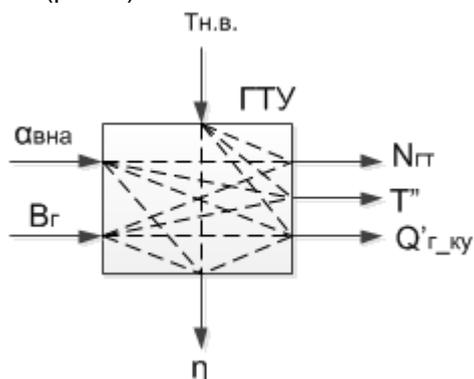


Рис. 1. Схема функциональных связей газотурбинной установки как многосвязного переопределенного объекта управления: $\alpha_{вн}$ – угол открытия направляющего аппарата компрессора (ВНА), град; B_r – расход топлива (природный газ), кг/с; $N_{г}$ – активная мощность ГТУ, МВт; $T_{г}$ – температура уходящих газов за ГТУ, °С; $Q'_{г_ку}$ – тепловой поток перед КУ, кДж/с; $T_{н.в.}$ – температура наружного воздуха, °С; η – КПД ГТУ, %

В математической модели не учитывалось изменение параметров воздушного потока, поступающего из компрессора ГТ в газотурбинный двигатель, который является как окислителем (для процесса горения в камере сгорания ГТ), так и охладителем/теплоносителем (для лопаток ГТД) и теплоносителем

(для котла-утилизатора). Модель [7, 8] дополнена следующими уравнениями:

– дифференциальным уравнением для расчета температур выхлопных газов в камере сгорания (КС) ГТУ

$$\frac{dT_{КС}}{dt} = \frac{G_{КС} c_{в}'' T_{в}'' + B_r Q_{нр} - (G_{КС} + B_r) c_{КС}'' T_{КС}}{M_{КС}}, \quad (1)$$

где $G_{КС}$ – расход воздуха в КС, кг/с; B_r – расход топлива, кг/с; $c_{в}$, $c_{КС}$ – теплоемкости воздуха за компрессором и газов в КС соответственно, Дж/(кг·К); $Q_{нр}$ – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг; $M_{КС}$ – термическая масса камеры сгорания, Дж/°С; $T_{в}''$ – температура воздуха на выходе компрессора, К;

– выражением для расчета температуры выхлопных газов перед газовой турбиной

$$T_{г}' = \frac{(G_{КС} + B_r) c_{КС}'' T_{КС} + (G_{об15} + G_{см}) c_{в}'' T_{в}''}{(G_{об15} + G_{см} + G_{КС} + B_r) c_{г}'}, \quad (2)$$

где $G_{об15}$ – расход воздуха на охлаждение, отбираемый за 15-й ступенью компрессора, кг/с; $G_{см}$ – расход воздуха на охлаждение температуры выхлопных газов на выходе из КС, кг/с; $c_{г}'$ – теплоемкость выхлопных газов на входе в ГТ, Дж/(кг·К).

При изменении температуры наружного воздуха меняется его плотность, а значит, изменяется и массовый расход воздуха на входе в компрессор при одной и той же степени открытия входного направляющего аппарата (ВНА). Для расчета значения массового расхода воздуха $G_{в}$ по углу открытия ВНА в зависимости от параметров наружного воздуха использовалось выражение [9]

$$G_{в} = m \frac{p_{в}^*}{\sqrt{T_{в}^*}} q(\lambda_{в}) F_{в}, \quad (3)$$

где $m = 0,0404$ (кг·К/Дж)^{0,5} – размерный коэффициент, зависящий от показателя адиабаты и газовой постоянной воздуха; $F_{в}$ – площадь проточной части на входе в двигатель, м²; $q(\lambda_{в})$ – относительная плотность потока; $T_{в}^*$ – полная температура воздуха, К; $p_{в}^*$ – полное давление воздуха, Па.

Расчет КПД блока ПГУ выполняется по формуле [4]

$$\eta_{ПГУ} = \eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ}) \eta_{КУ} \eta_{ПТУ}, \quad (4)$$

где $\eta_{ГТУ}$, $\eta_{КУ}$, $\eta_{ПТУ}$ – значения КПД газотурбинной установки, котла-утилизатора и паротурбинной установки соответственно.

Расчет коэффициентов полезного действия оборудования ПГУ (газовой турбины, котла-утилизатора и паровой турбины) ведется по формулам [4, 7], которые согласуются с результатами обобщенного термодинамического анализа эффективности оборудования:

$$\eta_{ГТУ} = \frac{\mathcal{E}_{ГТУ}}{Q_{КС}}; \quad (5)$$

$$\eta_{КУ} = \frac{T_{г}'' - T_{ух}}{T_{г}'' - T_{н.в.}} \quad \text{или} \quad \eta_{КУ} = \frac{Q'_{КУ} - Q''_{КУ}}{Q_{КУ} - Q_{н.в.}}; \quad (6)$$

$$\eta_{\text{ПТУ}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ПТУ}}}{Q_{\text{ПТУ}}}, \quad (7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ГТУ}}$ – количество электроэнергии, полученной в ГТУ, МВт·ч; $Q_{\text{КС}}$ – количество теплоты, полученной в КС ГТУ, МВт·ч; $T''_{\text{г}}$, T_{yx} – температуры уходящих газов за ГТУ и КУ соответственно, °С; $T_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С; $\mathcal{E}_{\text{ПТУ}}$ – количество электроэнергии, полученной в ПТУ, МВт·ч; $Q_{\text{ПТУ}}$ – количество теплоты, поступающей в ПТУ, МВт·ч; $Q'_{\text{КУ}}$, $Q''_{\text{КУ}}$ – количество теплоты на входе и на выходе КУ соответственно, МВт·ч; $Q_{\text{н.в}}$ – количество теплоты, поступающей с наружным воздухом, МВт·ч.

Таким образом, построение математической модели энергоблока ПГУ выполнено в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния. При этом в качестве исходных параметров используется, как правило, конструктивные и режимные параметры реального оборудования. В целом динамическая модель блока обладает открытой структурой с выделенной инвариантной и изменяемой для разных блоков ПГУ частями, что обеспечивает ее широкое использование, в том числе, для расчетов технико-экономических показателей в режиме реального времени.

Исследование влияния изменений температуры наружного воздуха на параметры блока ПГУ. *Постановка вычислительного эксперимента.* 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. Особенно существенно влияние температуры наружного воздуха при работе ПГУ в режиме полублока.

Исследование влияния температуры наружного воздуха на работу ПГУ в режиме полублока выполнялось в 3 этапа (рис. 2):

1. *Запуск математической модели блока ПГУ и вывод ее на заданный режим* ($T_{\text{н.в}} = -5$ °С, на графиках участок кривых – до момента подачи возмущения $t = 0$ с, давление наружного воздуха принято постоянным 101,3 кПа).

2. *Исследование динамических характеристик блока по каналам влияния температуры наружного воздуха для полного диапазона нагрузок* (115, 96 и 74 МВт) (момент нанесения внешнего возмущения на графиках показан вертикальной жирной пунктирной линией).

3. *Анализ результатов эксперимента* (в проведенном вычислительном эксперименте принято, что температура изменяется экспоненциально с постоянной времени 180 с):

1. При изменении температуры наружного воздуха (рис. 2,а), например в сторону ее увеличения, угол открытия ВНА (рис. 2,б) и объемный расход воздуха на входе в компрессор (рис. 2,в) не изменяются (расход топлива задан постоянным).

Однако плотность забираемого воздуха при этом снижается (рис. 2,г). Изменение плотности воздуха вызывает изменение его массового расхода на входе в компрессор (рис. 2,д), что приводит к изменению температур и за компрессором (рис. 2,ж), и за ГТ (рис. 2,з) в сторону роста.

Нетрудно видеть, что при этом имеет место превышение технически безопасных значений параметров. Температура перегретого пара контура ВД (рис. 2,м) растет вслед за температурой уходящих газов за ГТ. При этом значение теплового потока на выходе ГТ (рис. 2,и) несколько увеличивается, мощность ГТ (рис. 2,к) снижается, мощность ПТ (рис. 2,р) возрастает.

Таким образом, на примере блока ПГУ-325 показано, что причиной изменений параметров блока является фактор неконтролируемого и неучитываемого изменения массового расхода общего воздуха. При этом, если обратить внимание, что тепловой поток на выходе ГТУ зависит не только от температуры, но и от расхода и теплоемкости уходящих газов, требование поддержания температуры уходящих газов за ГТ (перед КУ) на постоянном уровне в 517 °С¹ [4] является недостаточно корректным.

2. Результаты математического моделирования показывают, что при увеличении температуры наружного воздуха (рис. 2,а) происходит снижение значения КПД ГТУ приблизительно на 1 % (рис. 2,л). При этом КПД КУ (рис. 2,п) за счет более высоких температур на входе теоретически возрастает на 6,5 %, ПТ – на 2 % (рис. 2,с), а КПД ПГУ (рис. 2,т) в целом на 2 % выше.

Последнее согласуется с опытом эксплуатации [2, 3], который говорит о том, что определяющим является эффективность утилизационной части блока.

Выявленным ключевым фактором в поиске решения этой проблемы является фактор неконтролируемого изменения массового расхода воздуха.

¹ Производственная инструкция по эксплуатации газотурбинной установки ГТД-110 в составе энергоблока ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ». – Комсомольск, 2007.

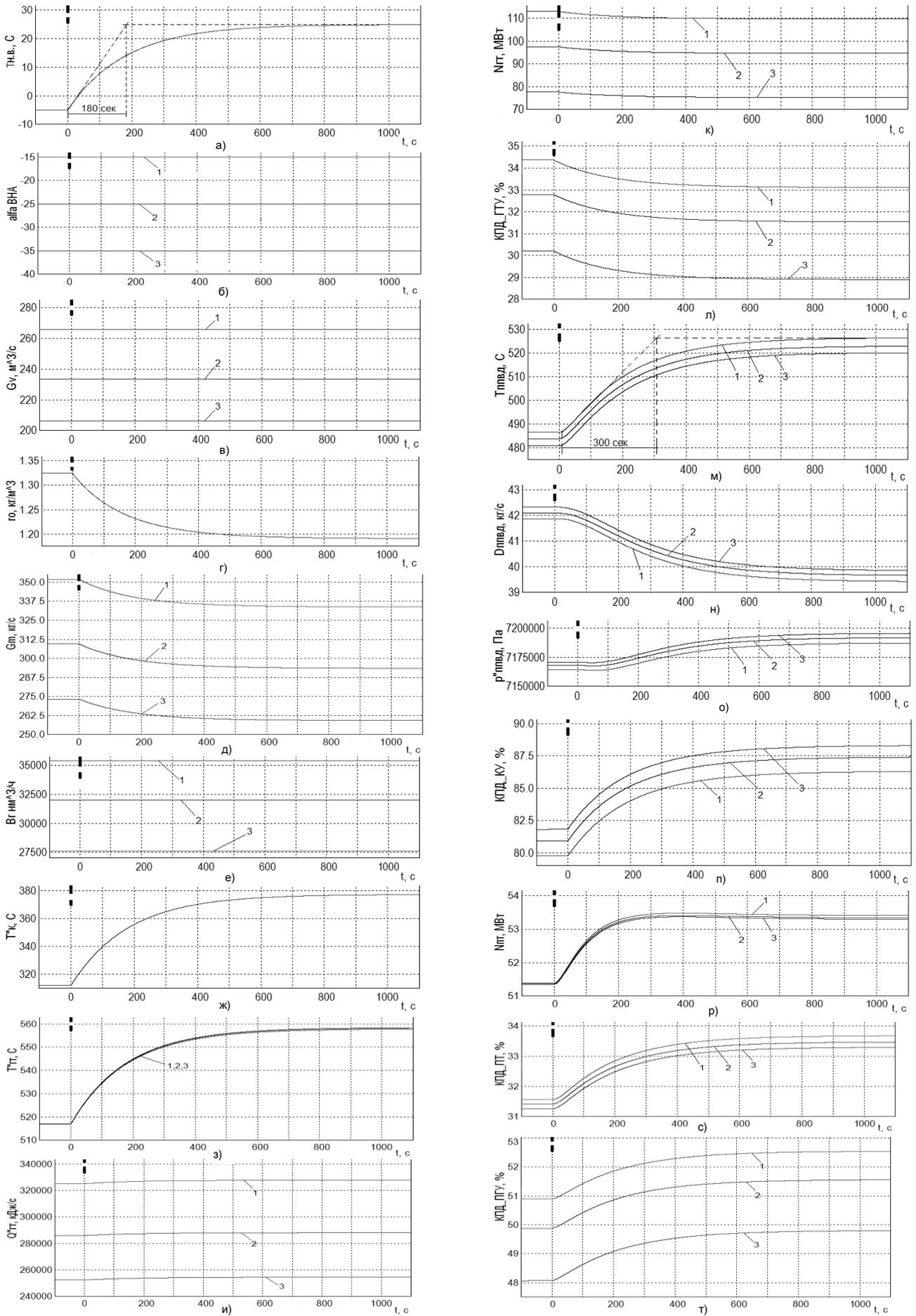


Рис. 2. Исследование влияния температуры наружного воздуха при работе ПГУ в режиме полублока на разных нагрузках: 1 – N = 115 МВт; 2 – N = 96 МВт; 3 – N = 74 МВт

Исследование влияния температуры наружного воздуха на эффективность оборудования при стабилизации массового расхода воздуха. Задачу предлагается решить путем стабилизации массового расхода воздуха на входе в ГТУ. Для этого разработана САУ, содержащая регулятор расхода воздуха (угла открытия ВНА), охваченный жесткой обратной связью по положению ВНА. Сигнал по массовому расходу воздуха G_v в зависимости от угла открытия ВНА и параметров наружного воздуха сформирован согласно выражению (3). Стабилизация осуществляется посредством соответствующего корректора (рис. 3).

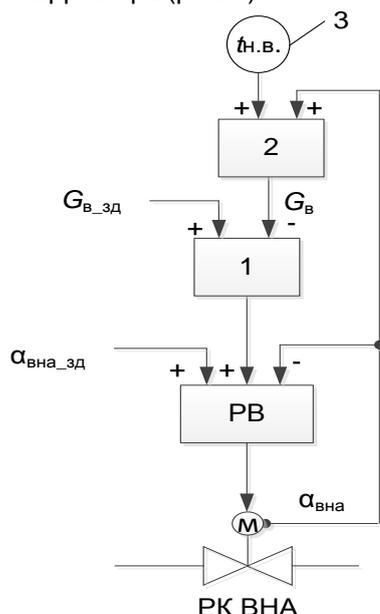


Рис. 3. Информационная структура САУ со стабилизатором массового расхода воздуха: 1 – блок коррекции; 2 – блок формирования сигнала по массовому расходу воздуха; 3 – датчик температуры наружного воздуха; РК ВНА – регулирующий клапан угла открытия ВНА; РВ – регулятор воздуха (угла открытия ВНА)

Сравнение результатов влияния температуры наружного воздуха без стабилизатора (рис. 4, графики 1) и со стабилизатором (корректором) массового расхода воздуха в компрессоре ГТУ (рис. 4, графики 2) говорит о достаточно высокой эффективности найденного технического решения.

При высокой температуре наружного воздуха (рис. 2,а) и, как следствие, высокой температуре воздуха на входе и выходе компрессора (рис. 2,ж) ВНА открывается (рис. 4,а, график 2).

Массовый расход воздуха (рис. 4,в) стабилизирован, а объемный расход воздуха (рис. 4,б), соответственно, увеличился. Так как расход топлива задан постоянным, то активная мощность ГТУ (нагрузка) также не изменяется.

Нетрудно видеть, что температура уходящих газов за ГТ (рис. 4,г) при этом практиче-

ски остается в рабочем (расчетном) диапазоне от 455 до 530°C (определен надежностью работы блока в целом согласно инструкциям).

Обращает на себя внимание поведение теплового потока уходящих газов на выходе ГТУ (рис. 4,д): в проведенном вычислительном эксперименте тепловой поток перед КУ несколько увеличился.

Отклонения других технологических параметров ГТУ, КУ, ПТ и блока ПГУ в целом, вызванные влиянием температуры наружного воздуха, также остаются в пределах расчетных диапазонов. В частности, температура перегретого пара контура ВД остается на расчетном уровне 510 °С (рис. 4,ж), КПД КУ – на уровне 85 % (рис. 4,к), КПД ПТ – 32,5 % (рис. 4,л), а КПД ПГУ – также на расчетном уровне 51–52 % (рис. 4,м).

Заключение

Разработана расширенная в аспекте исследования влияния температуры наружного воздуха всережимная математическая модель энергоблока ПГУ.

Математическая модель доведена до уровня имитационной модели, реализованной в универсальной среде имитационного моделирования.

Проведены вычислительные эксперименты по поиску и анализу критических факторов влияния температуры наружного воздуха на эффективность энергоблока.

Результаты поисковых исследований показали, что ключевым (критическим) фактором влияния изменений температуры наружного воздуха на параметры блока является неконтролируемое изменение массового расхода общего воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ.

Осуществлена автоматическая коррекция (стабилизация) массового расхода воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ.

В результате технологические параметры блока, в том числе КПД оборудования, при изменяющейся температуре наружного воздуха введены в расчетные диапазоны эффективного управления.

Список литературы

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3 кн. Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование / под ред. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн. 1. – 260 с. – Кн. 2. – 436 с.
2. **Давыдов А.В., Радин Ю.А.** Опыт освоения парогазовых энергоблоков ПГУ-450Т // Электрические станции. – 2009. – № 9. – С. 22–26.

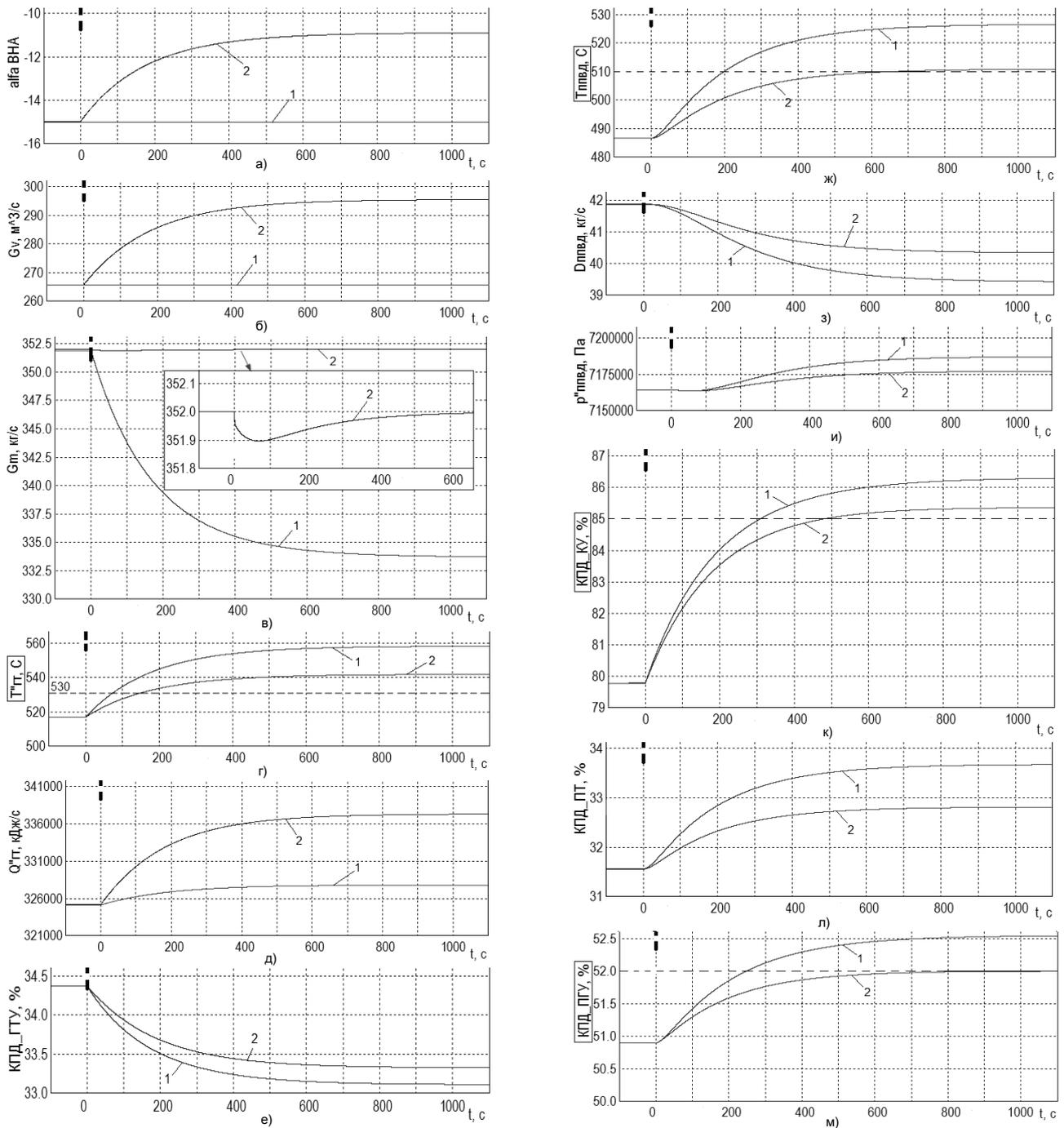


Рис. 4. Исследование эффективности управления энергоблоком ПГУ в зависимости от температуры внешней среды (в режиме полублока): 1 – влияние $T_{н.в.}$; 2 – со стабилизатором по массовому расходу воздуха G_m ; параметры в прямоугольниках – параметры, значения которых находятся за пределами допустимых требований; горизонтальные пунктирные линии – верхние границы технологически безопасных значений параметров

3. **Определение** допустимого регулировочного диапазона нагрузок энергоблока ПГУ-450Т при его работе в конденсационном режиме / Ю.А. Радин, А.В. Давыдов, А.В. Чугин, И.Н. Писковацков // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 47–52.

4. **Трухний А.Д., Макаров А.А., Клименко В.В.** Основы современной энергетики. Ч. 1 / под ред. Е.В. Аметистова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 368 с.

5. **Шельгин Б.Л., Мошкарин А.В.** Котлы-утилизаторы парогазовых электростанций / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 284 с.

6. **Рабенко В.С., Будаков И.В., Неумин В.М.** Об особенностях эксплуатации энергоблоков ПГУ в климатических условиях России // Энергосбережение и водоподготовка. – 2010. – № 6. – С. 7–18.

7. **Тверской Ю.С., Муравьев И.К.** Математическая модель энергоблока ПГУ-325 и ее использование для расчета КПД установки // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 12–18.

8. **Муравьев И.К., Тверской Ю.С.** Создание математической модели и расчет характеристик энергоблока ПГУ // Сборник трудов конференции «Моделирование – 2012». – Киев, 2012. – С. 297–303.

9. **Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М.** Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч.1. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.

References

1. Tverskoy, Yu.S. *Teoriya i tekhnologiya sistem upravleniya. Mnogofunktsional'nye ASUTP teplovykh elektrostantsiy*

в 3 kn., kn. 1 (*Problemy i zadachi*), kn. 2 (*Proektirovanie*) [Theory and technology of control systems. Multifunction process control systems of thermal power plants. In 3 books. Book 1. Problems and Objectives. Book 2. Design]. Ivanovo, 2013, book 1, 260 p., book 2, 436 p.

2. Davydov, A.V., Radin, Yu.A. Opyt osvoeniya parogazovykh energoblokov PGU-450T [Experience in the development of combined cycle power units CCGT-450T]. *Elektricheskie stantsii*, 2009, issue 9, pp. 22–26.

3. Radin, Yu.A., Davydov, A.V., Chugin, A.V., Piskovatskov, I.N. Opredelenie dopustimogo regulirovochnogo diapazona nagрузок energobloka PGU-450T pri ego rabote v kondensatsionnom rezhime [Determination of allowable load adjustment range of CCGT-450T power unit in condensing mode]. *Teploenergetika*, 2004, no. 5, pp. 47–52.

4. Trukhniy, A.D., Makarov, A.A., Klimenko, V.V. *Osnovy sovremennoy energetiki. Chast' 1* [Fundamentals of modern power engineering. Part 1]. Moscow, Izd-vo MEI, 2002. 368 p.

5. Shelygin, B.L., Moshkarin, A.V. *Kotly-utilizatory parogazovykh elektrostantsiy* [Recovery boilers of combined-cycle power plants]. Ivanovo, 2012. 284 p.

6. Rabenko, V.S., Budakov, I.V., Neuymin, V.M. Ob osobennostyakh ekspluatatsii energoblokov PGU v klimaticheskikh usloviyakh Rossii [On operation of CCGT power units in Russian climatic conditions]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2010, no. 6, pp. 7–18.

7. Tverskoy, Yu.S., Muravyov, I.K. Matematicheskaya model' energobloka PGU-325 i ee ispol'zovanie dlya rascheta KPD ustanovki [CCGT Power Unit mathematical model and its application to calculation of plant efficiency]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 12–18.

8. Murav'ev, I.K., Tverskoy, Yu.S. Sozdanie matematicheskoy modeli i raschet kharakteristik energo-bloka PGU [Development of a mathematical model and calculation of CCGT power unit characteristics]. *Sbornik trudov konferentsii «Modelirovanie – 2012»* [Collection of works of the conference «Modelling – 2012»]. Kiev, 2012, pp. 297–303.

9. Nechaev, Yu.N., Fedorov, R.M. *Teoriya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley. Ch.1* [Theory of aircraft gas turbine engines. Part 1]. Moscow, Mashinostroenie, 1977. 312 p.

Тверской Юрий Семенович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

доктор технических наук, профессор кафедры систем управления,

адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. А, ауд. 220,

телефон (4932)26-97-58,

e-mail: tverskoy@su.ispu.ru

Муравьев Игорь Константинович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

ассистент кафедры систем управления,

адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. А, ауд. 215,

телефон (4932)26-97-57,

e-mail: kafsu@su.ispu.ru