

УДК 681

## Математическая модель энергоблока ПГУ-325 и ее использование для расчета КПД установки

Ю.С. Тверской, д-р техн. наук, И.К. Муравьев, инж.

Приводятся результаты разработки математической модели энергоблока ПГУ-325, методика ее настройки на расчетные и экспериментальные данные, а также результаты исследования влияния некоторых определяющих факторов, характеризующих эффективность работы блока.

*Ключевые слова:* энергоблок, математическая модель, имитационное моделирование, ПГУ, КПД, мощность.

## CCGT Power unit Mathematical Model and its Application for Calculation of Plant Efficiency

Yu.S. Tverskoy, Doctor of Technical Sciences, I.K. Myravev, Engineer

In the article CCGT-325 MW Power Unit mathematical model, the technique of its settings in the calculated and experimental data. Investigation influence some determining factors that characterize the efficiency of the unit.

*Key words:* power unit, mathematical model, simulation, CCGT, efficiency, power, coefficient.

Основной тенденцией развития современной энергетики является сооружение парогазовых установок электростанций (ТЭС ПГУ). Это обусловливается существенно меньшей металлоемкостью, меньшей потребностью в охлаждающей воде, малыми вредными выбросами, возможностями высокой маневренности, в целом – меньшими капиталовложениями. При этом главным преимуществом ПГУ, по сравнению с ПТУ, является высокая экономичность. Для утилизационных ПГУ, выполненных по двухконтурной схеме, расчетный КПД составляет 50–52 % [1–3].

Однако известно, что экономическая эффективность блока ПГУ существенно зависит от многих режимных факторов, исследование влияния которых в эксплуатационных условиях практически невозможно: во-первых, по причине существенных рисков, а во-вторых, вследствие невозможности непосредственного контроля многих технологических параметров.

Различают две задачи расчета значения КПД [4, 5]. Первая решается на уровне информационно-вычислительного комплекса АСУТП, в базовом программном обеспечении которой содержатся прикладные функциональные блоки, производящие расчеты: КПД котла, КПД турбоустановки и блока в целом, внутренних относительных КПД цилиндров турбины и т.д. Вторая задача решается при расчетах технико-экономических показателей установки. Так, ежемесячный показатель КПД определяется на основании соответствующих суммарных или средних значений КПД за отдельный месяц. При этом проблема оптимизации КПД блока ПГУ в одном темпе с процессом и варьируемых внешних факторов остается не решенной. Совершенствование сложных функций АСУТП возможно путем включения в структуру системы динамических моделей [6–8]. Основная

трудность моделирования теплоэнергетических объектов состоит в том, чтобы обоснованно выбрать степень сложности модели, приемлемую для интеграции в структуру ПТК и адекватную решаемой задаче [9–11].

Ниже приводятся результаты разработки математической модели энергоблока ПГУ-325, методика многопараметрической настройки модели на расчетные и экспериментальные данные. При этом ставится задача исследования влияния некоторых определяющих факторов на эффективность работы энергоблока.

**Разработка математической модели энергоблока ПГУ.** Функциональная структура математической модели энергоблока ПГУ-325 охватывает следующее технологическое оборудование:

- газотурбинную установку ГТУ-110;
- контур низкого давления КУ П-88;
- контур высокого давления КУ П-88;
- паровую турбину К-110-6.5;
- конденсационную установку 110КП-1000-1.

Модель разработана для каждого технологического участка оборудования, имеет открытую структуру, что позволяет в случае необходимости усложнить ее элементы.

*Разработка математической модели котла-утилизатора.* Модель КУ представляет собой математические модели последовательно включенных поверхностей нагрева: пароперегревателя высокого давления (ППВД), испарителя высокого давления (ИВД), экономайзера высокого давления (ЭВД), пароперегревателя низкого давления (ППНД), испарителя высокого давления (ИНД), газового подогревателя конденсата (ГПК), барабанов высокого и низкого давлений (рис. 1). При этом барабаны вынесены за пределы котла, а остальные поверхности греются уходящими газами из газовой турбины, что позволяет рас-

смаывать их в качестве пассивных теплообменников.

Математическая модель КУ представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих физические законы сохранения массы, количества движения и энергии [12]. Полагая при этом, что каждый из элементов расчетной схемы представлен в виде модели с сосредоточенными параметрами [13–16].

Особенностью модели КУ является то, что элементы технологического оборудования включены согласно расчетной схеме (рис. 1). При этом:

1) в качестве циркуляционных контуров служат испарители высокого и низкого давлений для барабанов ВД и НД соответственно;

2) в математической модели КУ учтены также расход воды на рециркуляцию, наличие питательных электронасосов и узла смешения ГПК;

3) принято, что в ходе работы модели уровни воды в барабанах ВД и НД поддерживаются на заданных значениях.

Исходные данные модели принимались по конкретным проектным характеристикам оборудования.

**Разработка математической модели газотурбинной установки.** В процессе разработки математической модели ГТУ представляется как единый энергетический двигатель (компрессор – камера сгорания – камера смешения – газовая турбина), при этом расчет модели выполняется с привлечением проектных данных. Скорость нагнетания определяется программатором задания скорости изменения расхода топлива в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

Основными параметрами в моделируемой системе принимаются мощность генера-

тора, расход и температура уходящих газов за турбиной.

В основу математической модели газотурбинной установки также должны быть положены уравнения законов сохранения. Однако, поскольку газотурбинная установка обладает малой инерционностью процессов, скоростью изменения параметров моделируемого объекта, как правило, пренебрегают. В результате одномерная модель с сосредоточенными параметрами принимает вид статических уравнений состояний [17].

Особенности разработанной математической модели ГТУ:

1) учтен расход воздуха на охлаждение проточной части газовой турбины;

2) в зависимости от расхода топлива рассчитываются перепады давлений в компрессоре, камере сгорания и газовой турбине.

**Разработка математической модели паровой турбины.** Модель паровой турбины (ПТ) как термодинамической системы состоит из двух подсистем: непосредственно пара и оболочки канала, по которому движется рабочее тело (пар) [11, 18, 19].

В ПТ входит перегретый пар из контуров высокого и низкого давлений, параметры которого определяются режимом работы газотурбинных агрегатов, выходит отработанный пар. По полученным значениям паропроизводительности контуров высокого и низкого давлений КУ выполняется расчет математической модели ПТ. Основным выходным параметром в модели является мощность генератора паровой турбины.

Математическая модель ПТ разрабатывается на основе уравнений теплового баланса первого порядка [17, 19].

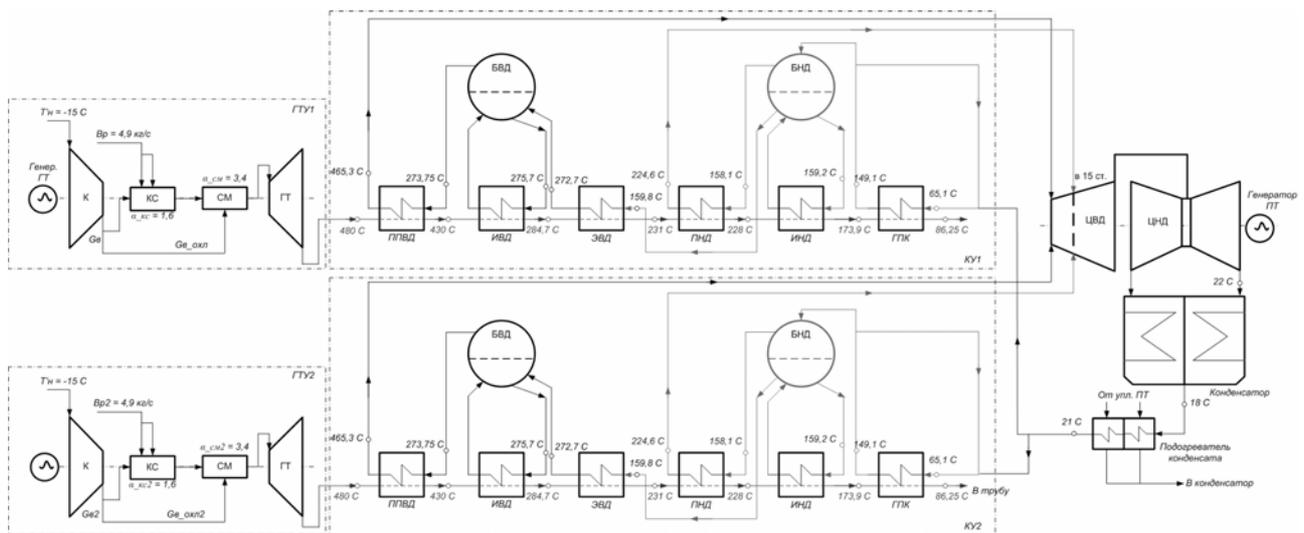


Рис. 1. Расчетная схема энергоблока ПГУ

Особенность модели ПТ в том, что пар низкого давления от ППНД КУ поступает в 15-ю ступень цилиндра высокого давления (ЦВД), образуя при этом условную камеру смешения. В связи с этим мощность всей ПТУ суммируется из трех составляющих: мощности в ЦВД, мощности в камере смешения ЦВД и мощности цилиндра низкого давления (ЦНД).

*Разработка математической модели конденсатора паровой турбины.* Математическая модель конденсатора позволяет проследить зависимость расхода конденсата на входе в ГПК КУ от изменения расходов пара на выходе ПТ. Математическая модель построена на законах сохранения массы, количества движения и энергии [13–16] при следующих допущениях:

- пренебрегаем работой эжекторной установки. Полагаем, что весь пар конденсируется; система циркуляционной воды полностью отводит тепло, полученное при конденсации пара;
- давление пара в конденсаторе постоянно, т.е.  $P_{пар} = const$ ;
- плотность пара постоянна, т.е.  $\rho_{пар} = const$ ;
- расход циркуляционной воды постоянен;
- поперечное сечение конденсатора в конденсатосборнике постоянно.

Таким образом, математическая модель ПГУ характеризуется следующим:

- соблюдается заданная скорость нагружения газовой турбины путем соответствующей подачи газа;
- в модели КУ учтены расход конденсата на рециркуляцию и наличие узла смешения ГПК, что позволит правильно настроить модель для соблюдения материального баланса расхода воды и пара;
- модель паровой турбины разработана с учетом наличия камеры смешения в ЦВД.

Реализована математическая модель в универсальной среде имитационного моделирования Vis\_Sim (рис. 2).

Интеграция большой модели ПГУ выполняется путем сборки согласно расчетной схеме (рис. 1), при этом две нити ГТУ+КУ приняты одинаковыми. Модель формируется из разработанных макроблоков технологических объектов: ГТУ, КУ, ПТУ и конденсатора, с учетом физических законов.

Таким образом, с учетом принятых допущений разработанная математическая модель энергоблока ПГУ представляется в виде

системы нелинейных дифференциальных уравнений и уравнений состояния. В целом математическая модель является многопараметрической.

Настройка модели на заданный режим работы производится путем последовательного уточнения коэффициентов модели в пределах допустимого диапазона в целях приближения ее свойств к расчетным или экспериментальным оценкам [20, 21].

*Настройка математической модели энергоблока на тепловой расчет ЗИО.* Настройка математической модели осуществляется в три шага.

*Шаг 1.* Разработанная математическая модель ПГУ-325 выводится на статический тепловой расчет ЗИО. Для этого уточняются коэффициенты модели согласно статическим данным, полученным по результатам теплогидравлических расчетов котла-утилизатора П-88 для ПГУ-325 ОАО «Ивановские ПГУ» при нагрузке ГТУ 75 % [22].

*Шаг 2.* Разработанная математическая модель ПГУ-325 выводится на тепловой расчет ЗИО при нагрузке ГТУ, равной 100 % [22].

*Шаг 3.* Выполняется переход со статического режима на динамический при изменении нагрузки ГТУ с 75 до 100 %. Расход топлива изменяется согласно заданной скорости, которая определяется скоростью нагружения ГТ.

Получившиеся характеристики модели представлены на рис. 3.

*Особенности настройки математической модели энергоблока на экспериментальные характеристики.* Настройка математической модели ПГУ-325 выполняется в три шага.

*Шаг 1.* Математическая модель ПГУ-325 настраивается согласно экспериментальным данным (протокол испытания ГТУ-12 и КУ-12 от 19.01.2011), для чего необходимо уточнить коэффициенты модели при нагрузке ГТУ, равной 75 %. Основными уточняемыми коэффициентами являются теплоемкости уходящих газов и сред, их плотности. Статические данные берутся из протокола испытания на момент времени 4 ч 20 мин.

*Шаг 2.* Модель выводится в режим, зафиксированный протоколом испытаний на момент времени 4 ч 47 мин, при этом нагрузка ГТУ увеличивается до 100 %.

В ходе настройки математической модели ГТУ температура наружного воздуха, расход воздуха на охлаждение проточной части ГТ и коэффициент избытка воздуха не изменяются.

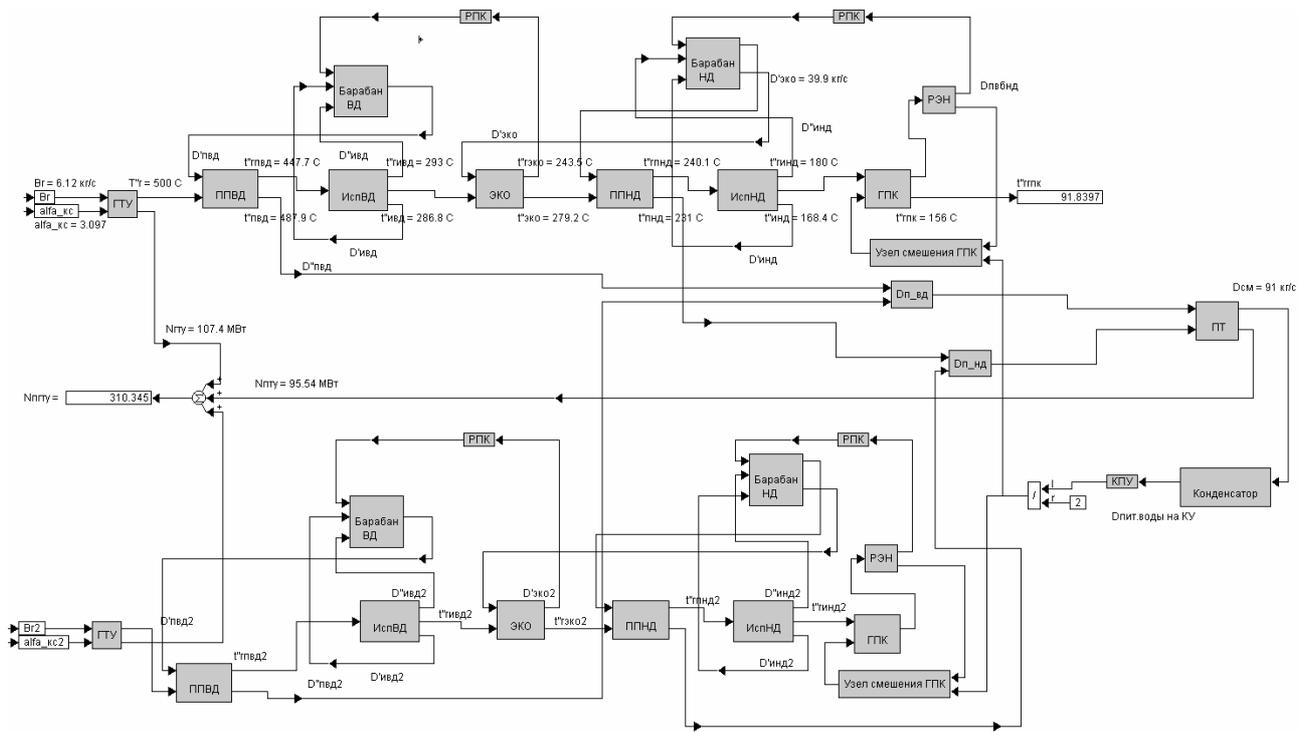


Рис. 2. Имитационная модель энергоблока ПГУ-325

**Шаг 3.** В модели осуществляется переход со статического режима на динамический при изменении нагрузки ГТУ с 75 до 100 %.

Расход топлива увеличивается с 4,936 до 6,124 кг/с. Значения коэффициентов модели принимаются такими же, как и в настройке энергоблока на тепловой расчет ЗИО, в соответствии с нагрузкой ГТУ. Получившиеся характеристики модели представлены на рис. 4.

Наличие протокола испытания ГТУ-12 и КУ-12 позволяет провести сравнение расчетных характеристик, полученных в результате работы математической модели, и экспериментальных характеристик:

- по расходу топлива наблюдается совпадение графиков, что говорит о верном задании скорости изменения расхода топлива в ГТ;
- температура газа за турбиной по результатам модели получилась несколько ниже (412,7 °С – модель, 426 °С – эксперимент), что объясняется постоянным значением показателя изэнтропии ( $\kappa = 1,36$ ), принятым в модели. Несмотря на это, график изменения электрической мощности ГТУ совпадает с экспериментом достаточно точно (значение электрической мощности в модели получилось равным 109,34 МВт, а эксперимента – 109,86 МВт);

– скорость изменения расхода пара контура ВД в модели превышает скорость изменения согласно протоколу испытания, характеристика расхода пара контура НД противоречит экспериментальной характеристике. Это объясняется, по-видимому, завышенным и заниженным парообразованием разработанных пассивных теплообменников ППВД и ППНД соответственно.

Анализ характеристик, полученных при возмущении топливом (увеличение на 1,192 кг/с), и сравнение их с экспериментальными показывает, что математическая модель ГТУ функционирует качественно правильно.

Таким образом, при выбранной степени сложности модели получили достаточно хорошее совпадение по ряду основных параметров. Несовпадение уровней связано, по-видимому, с низким качеством работы АСР питания в условиях эксплуатации. С учетом этого можно принять разработанную математическую модель для расчета КПД.

КПД выражается как отношение полезной работы к затраченной энергии [14]

$$\eta_{\text{КПД}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\text{ПГУ}}}{Q_{\text{КС1}} + Q_{\text{КС2}}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{Э}}^{\text{ПГУ}}$  – электрическая мощность ПГУ, кВт;  $Q_{\text{КС1}}$  – тепло, подводимое с топливом в КС ГТУ (причем  $Q_{\text{КС1}} = Q_{\text{КС2}}$  вследствие равного расхода воздуха и газа, подаваемого в КС ГТУ1 и ГТУ2 – допущение модели), кВт.

В АСУТП расчет КПД выполняется по формуле

$$\eta_{\text{Э}}^{\text{КПД}} = \frac{N_{\text{Э}} \cdot 1000}{[(F_r \cdot 0,716) / 3600][49664,7 + (2,265 + 0,0028 \cdot t_r) t_r]}, \quad (2)$$

где  $t_r$  – максимальная из температур топливного газа перед ГТЭ-11 и ГТЭ-12, 0С;  $N_{\text{Э}}$  – общая электрическая мощность ПГУ, МВт;  $F_r$  – суммарный расход газа к ГТ1 и ГТ2, м<sup>3</sup>/ч.

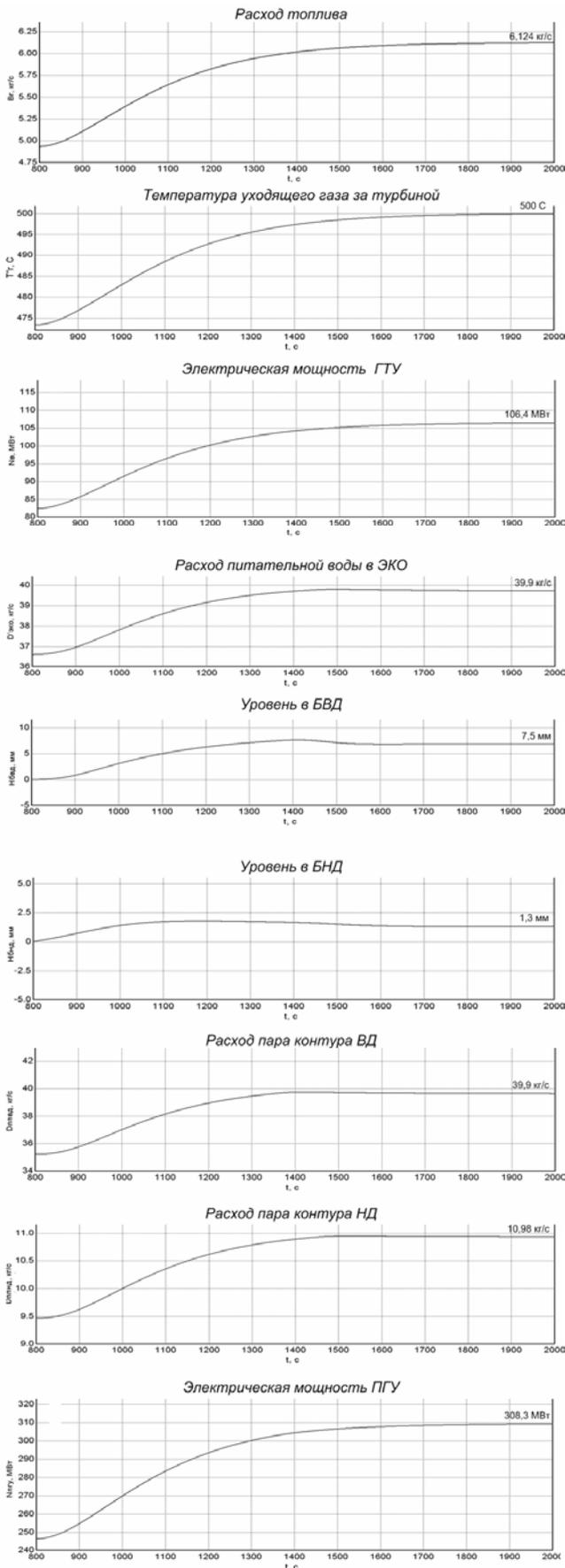


Рис. 3. Характеристика математической модели энергоблока при настройке на тепловой расчет ЗИО ( $t_{н.в} = -15^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_{ГТУ} = 3,421$  при нагрузке ГТ 75 %;  $\alpha_{ГТУ} = 3,097$  при нагрузке ГТ 100 %)

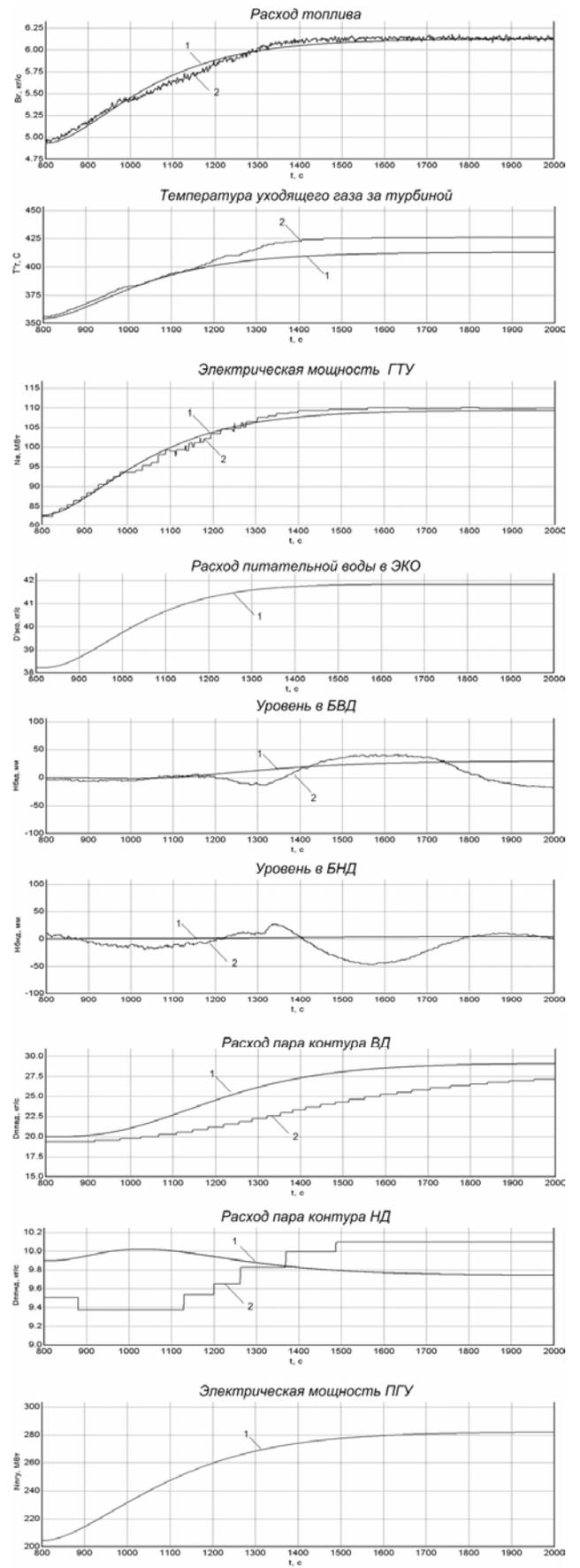


Рис. 4. Характеристики математической модели энергоблока при настройке на экспериментальные характеристики: 1 – модель; 2 – эксперимент ( $t_{н.в} = -15^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_{ГТУ} = 3,097$ )

КПД газовой турбины, котла-утилизатора и паровой турбины выражены по [1]:

$$\eta_{ГТУ} = \frac{\mathcal{E}_{ГТУ}}{Q_{КС}}; \quad (3)$$

$$\eta_{КУ} = \frac{T'_r - T_{yx}}{T'_r - T_{н.в}}; \quad (4)$$

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

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

**Результаты вычислительного эксперимента.** Исследование влияния температуры наружного воздуха и коэффициента избытка воздуха за ГТУ на КПД блока выполняется по математической модели в три шага.

**Шаг 1.** Математическая модель энергоблока ПГУ-325 выводится на значения экспериментальных характеристик. При этом степень открытия регулирующего клапана ГТ 78 %. Значения КПД энергоблока по (1) получились равным 41,7 %, а по (2) – 41,6 %

**Шаг 2.** После того как в установившемся режиме определено значение КПД в соответствии с нагрузкой, расчет КПД энергоблока будем проводить в двух сериях.

**Первая серия** – расчет коэффициента КПД блока при переходе с одной нагрузки на другую (нагрузка ГТУ изменяется с 75 до 100 %) (рис. 5).

Согласно рассмотренному режиму, при нагрузке ГТУ 100 % КПД составил: для ГТУ – 36 % (рис. 6, кривая 1), для КУ – 79 % (рис. 7, кривая 1), для ПТУ – 41 % (рис. 8, кривая 1).

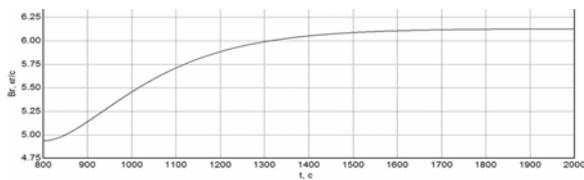


Рис. 5. Изменение расхода топлива

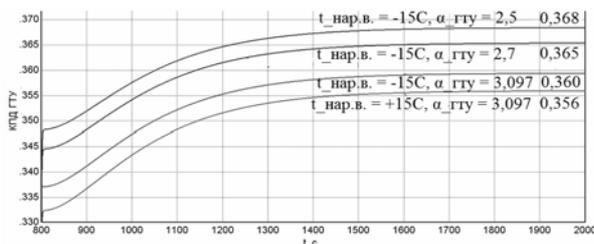


Рис. 6. Изменение КПД ГТУ при переходе с одной нагрузки на другую

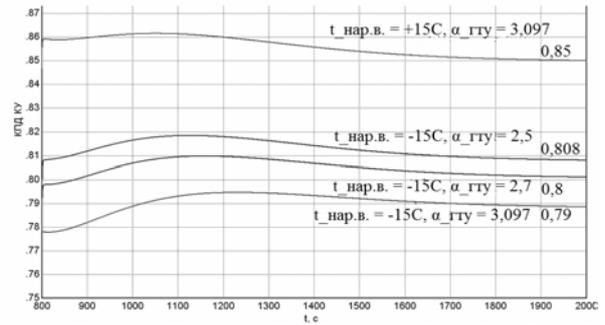


Рис. 7. Изменение КПД КУ при переходе с одной нагрузки на другую

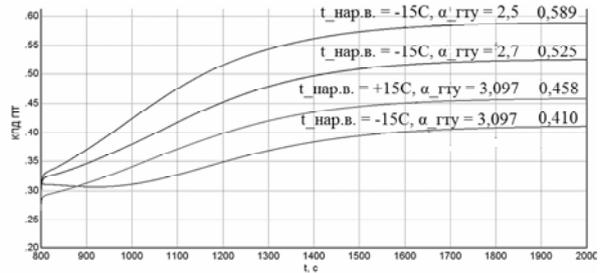


Рис. 8. Изменение КПД ПТУ при переходе с одной нагрузки на другую

Значение КПД энергоблока по (1) получилось равным 46,3 % при нагрузке ГТУ 100 % (рис. 9, кривая 1). Значение КПД ПГУ по (2) при степени открытия регулирующего клапана ГТ 78 % составило 41,6 %, а при выходе на номинальную нагрузку – возросло до 46,2 % (рис. 9, кривая 2). При этом получены следующие параметры значений характеристик КПД ПГУ при переходе с одной нагрузки на другую  $\eta_{\alpha}^{ПГУ}$  (рис. 9): коэффициенты усиления изменяются в пределах 14,3 % ( $K_1 = K_2 = 0,44$ ,  $K_3 = 0,73$ ,  $K_4 = 0,81$ ,  $K_5 = 0,63$ ), а постоянные времени – в пределах 6,7 % ( $T_1 = T_2 = 8,9$  мин,  $T_3 = 8,3$  мин,  $T_4 = 7,6$  мин,  $T_5 = 8,3$  мин).

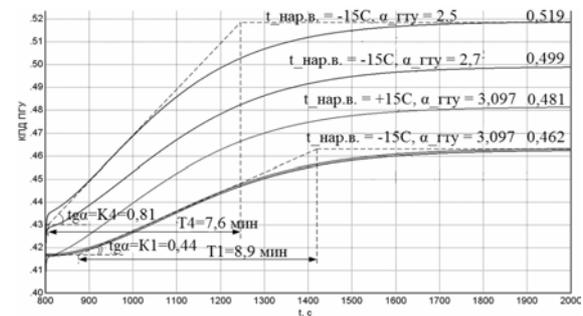


Рис. 9. Изменение КПД ПГУ-325 при переходе с одной нагрузки на другую

КПД блока по модели изменяется с 46,2 до 51,9 %.

**Вторая серия** – расчет коэффициента КПД блока при одной нагрузке ГТУ (отдельно для 75 и 100 %).

Значение КПД энергоблока по (1) получилось равным 41,7 % при нагрузке ГТУ 75 % (рис. 10, кривая 1). Значение КПД ПГУ при на-

грузке ГТУ 100 % составило 46,3 % (рис. 11, кривая 1). При этом получаем следующие динамические характеристики  $\eta_{\text{ПГУ}}$  (рис. 10–12).

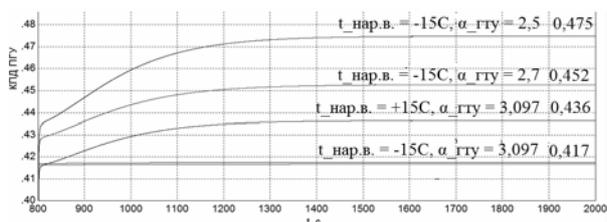


Рис. 10. Динамические характеристики КПД ПГУ при нагрузке ГТУ 75 %

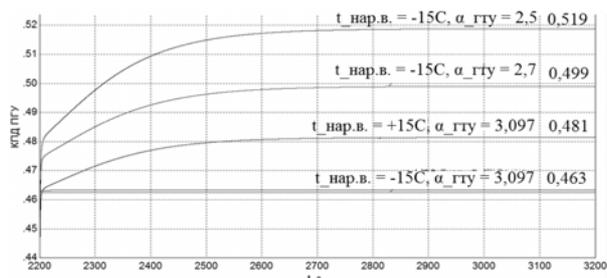


Рис. 11. Динамические характеристики КПД ПГУ при нагрузке ГТУ 100 %

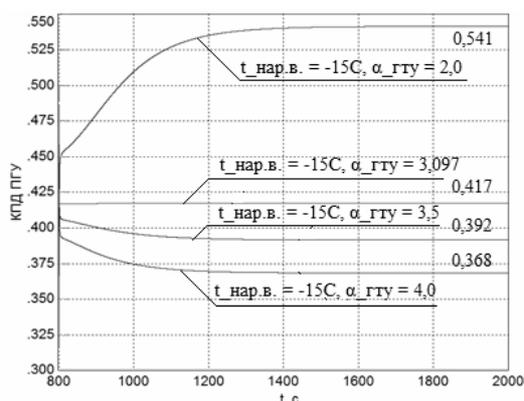


Рис. 12. Динамические характеристики КПД ПГУ при нагрузке ГТУ 75 %

Анализ результатов проведенных исследований показывает зависимость изменения КПД от условий эксперимента – коэффициента избытка воздуха за ГТУ и температуры наружного воздуха (рис. 6–12). Иными словами, КПД как интегральный критерий оценки эффективности работы блока чувствителен к изменению режима.

### Заключение

Показано, что при выбранной степени сложности характеристики модели имеют достаточно хорошее совпадение по ряду основных параметров, значение КПД блока критично к изменению основных варьируемых параметров: температуры наружного воздуха и коэффициента избытка воздуха за ГТУ (присадка холодного

воздуха). Значение КПД может изменяться в очень широком диапазоне от 35 до 52 %.

Для обеспечения расчетного КПД в широком диапазоне нагрузок требуется решение задачи автоматической многокритериальной оптимизации режима работы блока путем разработки соответствующей функции АСУТП.

### Список литературы

1. Трухний А.Д., Макаров А.А., Клименко В.В. Основы современной энергетики. Ч. 1 / под ред. Е.В. Амелистова. – М.: МЭИ, 2002. – С. 199–205.
2. Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Жамлиханов Т.А. Режимные характеристики ГТЭ-110 для энергоблока ПГУ-325 // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 7–10.
3. Давыдов А.В., Радин Ю.А. Опыт освоения парогазовых энергоблоков ПГУ-450Т // Электрические станции. – 2009. – № 9. – С. 22–26.
4. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества электроэнергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. – М., 1996.
5. РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. – М., 2006.
6. Дементьев В.А. Работы ЦНИИКА по созданию интеллектуальных функций АСУТП объектов энергетики: тр. Междунар. науч. конф. – М.: МЭИ, 2000. – С. 24.
7. Тверской Д.Ю., Тверской Ю.С. Задачи и проблемы совершенствования АСУТП энергоблоков в направлении их интеллектуализации: сб. докл. IV Всерос. науч. конф. «Управление и информационные технологии». – СПб.: ЛЭТИ, 2006. – С. 230–237.
8. Тверской Ю.С., Таламанов С.А. О новом классе АСУТП, оснащаемых математическими моделями управляемого технологического оборудования // Теория и практика построения и функционирования АСУТП: тр. Междунар. науч. конф. – М.: МЭИ, 2003. – С. 217–220.
9. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
10. Тверской Ю.С. Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
11. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Машиностроение, 1982. – 311 с.
12. Тверской Д.Ю. Особенности построения нелинейной динамической модели пылесистем прямого вдувания котлов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 83–89.
13. Математическое моделирование пусковых режимов энергоблока ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2 / Ю.А. Радин, А.С. Рубашкин, А.В. Давыдов, В.А. Рубашкин // Теплоэнергетика. – 2005. – № 10. – С. 61–64.
14. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика парогенераторов. – М.: Энергия, 1972. – 160 с.
15. Рубашкин А.С. Компьютерные тренажеры для операторов тепловых электростанций // Теплоэнергетика. – 1995. – № 10. – С. 38–46.
16. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973.
17. Рабенко В.С., Будаков И.В., Алексеев М.А. Тепловой расчет двухконтурной парогазовой установки утилизационного типа: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008.
18. Кирилов И.И. Автоматическое регулирование паровых турбин и газотурбинных установок: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1988. – 447 с.
19. Щегляев А.В. Паровые турбины. Кн. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.
20. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
21. Тверской Ю.С. Методологические аспекты машинной аппроксимации частотных характеристик с оцен-

кой меры адекватности объектов управления // Теплоэнергетика. – 1990. – № 11. – С. 34–39.

22. **P-91328PP**. Результаты теплогидравлических расчетов. Котел-утилизатор П-88 для ПГУ-325 ОАО «Ива-

новские ПГУ», ОАО «Инжиниринговая компания “ЗИО-МАР”», 2005.

*Муравьев Игорь Константинович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
инженер кафедры систем управления,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

*Тверской Юрий Семенович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой систем управления,  
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru