

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПГУ-450Т В ТЕПЛОФИКАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Аракелян Э.К., Андришин А.В., Мезин С.В., Косой А.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия  
Edik\_arakelyan@inbox.ru, AndriushinAV@mpei.ru, MezinSV@mpei.ru, KosoyAA@mpei.ru

Пашенко Ф.Ф.

Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
Pif-70@yandex.ru

*Аннотация. Показана необходимость и сложность разработки цифровых моделей тепловых теплофикационных энергоблоков, в частности, ПГУ-450 при ее работе в теплофикационном режиме. Приведен упрощенный алгоритм построения расходных характеристик для ПГУ с одной (ГТ1) и двумя (ГТ2) газовыми турбинами с использованием цифровых моделей газовых и паровой турбин в конденсационном режиме. На базе построенных цифровых моделей выявлены особенности режимов работы ПГУ-450 при ее участии в регулировании графиков электрической нагрузки станции и энергосистемы. Для их учета разработана методика учета влияния температуры наружного воздуха на максимальную и минимальную мощность ПГУ, на расход топлива, приведены выражения для граничных значений тепловых и электрических нагрузок. Показано, что наличие цифровых моделей ПГУ в теплофикационном режиме позволяет решать ряд задач локального характера перед решением оптимизационных задач станционного уровня. Приведен пример иллюстрации использования цифровой модели при решении локальной задачи выбора состава включенного оборудования электростанции с блоками ПГУ-450.*

*Ключевые слова: цифровая модель, теплофикационный режим, сложность, разработка, упрощенный алгоритм, регрессионные уравнения, температура наружного воздуха, граничные условия, решение, локальные задачи, иллюстрационный пример.*

## Введение

Используемые в настоящее время методики оптимизации распределения нагрузок разработаны в основном для традиционного состава оборудования ТЭЦ (паротурбинные энергоблоки) и в них достаточно мало исследован вопрос учета особенностей режимов работы ПГУ (с одной или двумя работающими газовыми турбинами, при различных температурах наружного воздуха и др.) При решении данной задачи необходимо отметить, что большинство методик не ориентировано на современные условия функционирования оптового рынка электроэнергии и мощности.

Вместе с тем, в настоящее время происходит активное внедрение ПГУ на ТЭЦ, поэтому, при решении задачи оптимизации управления режимами работы станции в рамках АСУ, необходимо использовать методику, учитывающую особенности работы оборудования ПГУ. Данное обстоятельство значительно усложняет алгоритм решения оптимизационной задачи, так как при этом усложняется вид целевой функции. Особый интерес представляет параллельная работа на одной станции традиционных теплофикационных агрегатов и ПГУ.

Проблема заключается в том, что одним из основных параметров, в наибольшей степени влияющим на показатели работы ПГУ, является температура наружного воздуха, которая определяет, как вид расходных характеристик ПГУ, так и границы регулировочного диапазона нагрузок установки., тогда как для конденсационных энергоблоков такое влияние незначительно.

## 1. Алгоритм разработки цифровой модели ПГУ в теплофикационном режиме

В настоящее время характеристики ПГУ, эксплуатируемых на ТЭЦ, несмотря на достаточно широкое их внедрение, недостаточно полно отражены для теплофикационных режимов работы в различного рода отчетах и нормативных данных и тренажерах. Так, разработанная с участием авторов цифровая модель ПГУ-450 [1, 2], построенная на базе тренажера этого блока разработки ОАО «Тренажеры для электростанций» получена только для конденсационного режима. Поэтому для построения энергетических характеристик ПГУ при частичных теплофикационных нагрузках авторами разработан упрощенный алгоритм для ПГУ с одной (ГТ1) и двумя (ГТ2) газовыми турбинами с использованием цифровых моделей газовых и паровой турбин в конденсационном режиме. Предлагаемый алгоритм содержит следующие шаги [3-5]:

1. Задаются величины относительных нагрузок газовых турбин  $P_1, P_2$  и теплофикационную нагрузку паровой турбины  $Q_{ПТ}$ ;

$$P_1 = \frac{N_1}{N_{1\text{НОМ}}}, P_2 = \frac{N_2}{N_{2\text{НОМ}}},$$

где  $N_1, N_{1\text{НОМ}}; N_2, N_{2\text{НОМ}}$  – текущая и номинальная мощность соответственно ГТ1 и ГТ2.

Тепловая нагрузки паровой турбины задается на базе заводских данных в зависимости от рассматриваемого теплофикационного режима – одноступенчатый или двухступенчатый подогрев сетевой воды.

2. По заданным величинам  $P_1, P_2, Q_{\text{ПТ}}$ , определяется мощность паровой турбины  $N_{\text{ПТ}}$ , используя следующее соотношение:

$$D_{\text{КВ}}(P_1) + D_{\text{КВ}}(P_2) = D_{\text{ПТ}}(N_{\text{ПТ}}, Q_{\text{ПТ}}), \quad (1)$$

где  $D_{\text{КВ}}(P_1), D_{\text{КВ}}(P_2)$  – паровая нагрузка котлов утилизаторов 1 и 2,  $D_{\text{ПТ}}(N_{\text{ПТ}}, Q_{\text{ПТ}})$  – зависимость расхода пара на паровую турбину от ее электрической  $N_{\text{ПТ}}$  и тепловой  $Q_{\text{ПТ}}$  нагрузок;

3. Рассчитывается электрическая  $N_{\text{ПГУ}}$  и тепловая нагрузки ПГУ  $Q_{\text{ПГУ}}$  ::

$$N_{\text{ПГУ}} = N_{\text{ГТУ}}(P_1) + N_{\text{ГТУ}}(P_2) + N_{\text{ПТ}}, \quad (2)$$

$$Q_{\text{ПГУ}} = Q_{\text{ПТ}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{ГТУ}}(P)$  – зависимость электрической нагрузки ГТ от ее относительной нагрузки.

4. Вычисляется по цифровой модели ГТ расход топлива ПГУ  $B_{\text{ПГУ}}$  :

$$B_{\text{ПГУ}} = B_{\text{ГТУ}}(P_1) + B_{\text{ГТУ}}(P_2), \quad (4)$$

где  $B_{\text{ГТУ}}(P)$  – зависимость расхода топлива ГТ от ее относительной нагрузки.

5. Таким образом, с помощью выражений (1-4), задавая величины  $P_1, P_2, Q_{\text{ПТ}}$ , рассчитываются  $N_{\text{ПГУ}}, Q_{\text{ПГУ}}$  а также расхода топлива ПГУ  $B_{\text{ПГУ}}$ .

6. На основании набора данных  $N_{\text{ПГУ}}, Q_{\text{ПГУ}}, B_{\text{ПГУ}}$  путем аппроксимации определяются расходные характеристики ПГУ-450Т. при работе ее в теплофикационном режиме.

На основе данной методики проведены расчеты по построению расходных характеристик ПГУ-450Т (цифровые модели). При построении цифровой модели ПГУ-450 использовались результаты исследований в рамках диссертационных работ: [3, 4, 6], а также результаты численных экспериментов на компьютерном тренажере ПГУ-450 В результате были получены следующие регрессионные зависимости расхода условного топлива от тепловой и электрической нагрузок для режимов работы ПГУ-450Т с 1-ой и 2-мя ГТ для фиксированной температуры наружного воздуха (-2°C) при номинальных параметрах теплофикационной установки блока. Нужно отметить, хотя указанные зависимости получены для ПГУ-450Т, они пригодны и для ПГУ-450, у которых отсутствуют пиковые сетевые подогреватели. [7].

$$B_{\text{ПГУ}}^{1\text{ГТ}}(N_{\text{ПГУ}}, Q_{\text{ПГУ}}) = 0,216N_{\text{ПГУ}} - 1,778 \cdot 10^{-5} N_{\text{ПГУ}}^2 + 0,037Q_{\text{ПГУ}} - 1,192 \cdot 10^{-4} Q_{\text{ПГУ}}^2 + 1,214 \cdot 10^{-4} N_{\text{ПГУ}} \cdot Q_{\text{ПГУ}} + 7,322, \quad (5)$$

$$B_{\text{ПГУ}}^{2\text{ГТ}}(N_{\text{ПГУ}}, Q_{\text{ПГУ}}) = 0,253N_{\text{ПГУ}} - 5,084 \cdot 10^{-5} N_{\text{ПГУ}}^2 + 0,021Q_{\text{ПГУ}} - 2,72 \cdot 10^{-5} Q_{\text{ПГУ}}^2 + 4,166 \cdot 10^{-5} N_{\text{ПГУ}} \cdot Q_{\text{ПГУ}} + 7,496, \quad (6)$$

где  $B_{\text{ПГУ}}(N_{\text{ПГУ}}, Q_{\text{ПГУ}})$  – расход условного топлива ПГУ в т.у.т./ч,  $N_{\text{ПГУ}}$  – электрическая нагрузка ПГУ в МВт,  $Q_{\text{ПГУ}}$  – тепловая нагрузка ПГУ в МВт. Проведенная оценка соответствия полученных зависимостей исходным данным показала, что полученные выражения имеют коэффициенты корреляции  $R = 0,997$  (для 1ГТ) и  $R = 0,998$  (для 2ГТ), максимальное отклонение характеристик от исходных данных не превышает 1%.

## 2. Алгоритм учета температуры наружного воздуха

Как отмечается во многих исследованиях, важным отличием ПГУ от традиционных энергоустановок является значимая зависимость ее мощности от температуры наружного воздуха. Вместе с тем, получить цифровую многофакторную модель ПГУ. в том числе с учетом и температуры наружного воздуха. затруднительно. В [3] влияние температуры наружного воздуха предлагается учесть в виде поправки к расходу топлива следующим выражением:

$$B_{н.б}^{nonp}(t_{н.б}, N, Q) = B_{ПГУ}(t_{н.б}, N_j, Q_j) - B_{ПГУ}(15, N_j, Q_j). \quad (7)$$

Путем аппроксимации проведенных расчетных данных по вышеприведенной методике при различных температурах наружного воздуха для расчета поправки (7) получено следующее выражение:

$$B_{н.б}^{nonp}(t_{н.б}, N, Q) = a_1(t_{н.б}) \cdot N + a_2(t_{н.б}) \cdot N^2 + a_3(t_{н.б}) \cdot Q + a_4(t_{н.б}) \cdot Q^2 + a_5(t_{н.б}) \cdot N \cdot Q + a_6(t_{н.б}), \quad (8)$$

где  $a_i(t_{н.б}) = b_{i,1} \cdot t_{н.б} + b_{i,2}$ ,  $i = 1, \dots, 6$  – коэффициенты регрессионного уравнения (8).

Значения коэффициентов  $b_{i,1}$ ,  $b_{i,2}$  приведены в [3].

Обобщая результаты приведенных выше исследований, можно констатировать две характерные особенности ПГУ-450 при их участии в регулировании графиков электрической нагрузки станции и энергосистемы (участие в третичном регулировании):

Наличие между нижней границей регулировочного диапазона при работе ПГУ с полным составом оборудования и верхней границей при работе ее с неполным составом разрыва на 10% от номинальной мощности ПГУ, в пределах которого эксплуатация энергоблока не допускается как по критерию надежности, так и по экологическим показателям. При работе ПГУ в теплофикационном режиме, с увеличением отпуска тепла указанный разрыв растёт.

Зависимость верхней (максимальной мощности) и нижней границ (минимально допустимой мощности) и регулировочного диапазона ПГУ от температуры наружного воздуха.

Первая особенность создает определенные сложности как для эксплуатационного персонала, так и для диспетчерских служб, в связи с чем важными являются исследования, направленные на поиск технологических решений, направленные на уменьшение величины или устранения указанного разрыва.

Вторая особенность требует учета такой зависимости при прогнозировании участия ПГУ в регулировании графиков нагрузки как в суточном, так и при долгосрочном (месячном, годовом) интервалах времени.

На основании экспериментальных данных тренажера получены следующие цифровые модели в форме регрессионных уравнений максимальных и минимальных значений нагрузок ПГУ, как функции от температуры наружного воздуха  $t_{HB}$  в интервале температур от  $-20$  до  $+20$  °C при работе ПГУ-450 с полным составом [5, 6]:

для максимальных нагрузок:

- при  $-5 < t_{HB} \leq +25$  °C

$$N_{ПГУ}^{\max} = 494,64 - 1,43t_{HB} - 0,0626t_{HB}^2; \quad (9)$$

- при  $-20 < t_{HB} \leq -5$  °C

$$N_{ПГУ}^{\max} = 498,05 - 0,00483t_{HB} - 0,000167t_{HB}^3; \quad (10)$$

для минимальных нагрузок при минимально допустимой температуре пара высокого давления  $t_{0ВД} \geq 450$  °C :

$$N_{ПГУ}^{\min} = 293,1 - 1,4t_{HB} - 0,00775t_{HB}^2 \quad (11)$$

Для оценки величины регулировочного диапазона ПГУ-450, как функции от температуры наружного воздуха, получено следующее регрессионное выражение:

$$\Delta N_{PD} = \left( \frac{199,4 - 3,113t_{HB} + 0,051t_{HB}^2}{1 - 0,0172t_{HB} + 0,000578t_{HB}^2} \right). \quad (12)$$

Очевидно, что при планировании участия ПГУ в регулировании частоты и мощности в энергосистеме учет приведенных особенностей работы ПГУ в теплофикационном режиме является необходимым условием. Хотя уравнения (9)-(12) получены при работе ПГУ-450Т в конденсационном режиме, при работе ее в теплофикационном режиме они необходимы для определения исходного состояния с учетом температуры наружного воздуха.

Дело в том, что, при работе по тепловому графику, одинаковому количеству отпускаемого тепла могут соответствовать различные электрические нагрузки при различном составе оборудования и

различной нагрузке ГТУ. Если к этому еще добавить возможность работы второй ГТУ при нагрузке, отличающейся от нагрузки первой ГТУ, то понятна необходимость выбора оптимальных составов и режимов работы оборудования при заданных прогнозных значениях тепловой нагрузки и температуры атмосферного воздуха еще на этапе предварительного прогнозирования.

Для учета этих особенностей цифровой модели ПГУ-450 в теплофикационном режиме в табл. 1 приведены: выражения для граничных значений тепловых и электрических нагрузок.

Таблица 1. Граничные значения тепловых и электрических нагрузок

Величина	ПГУ-450 с полным составом оборудования	ПГУ-450 с неполным составом оборудования
$Q_{min}$	51	51
$Q_{max}$	154,8	318
$Q_{max}^{GTmin}$	113,5	226,9
$Q_{ma}^{GTmin}$	$-0,148 \cdot Q + 9,781 \cdot Q^2 + 324,87$	$-0,30 \cdot Q + 9,215 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 + 163,16$
$N_{min}^{Qmin}(Q)$	$1,229 \cdot Q + 2,187 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 + 46,908$	$1,156 \cdot Q + 1,093 \cdot Q^2 + 32,028$
$N_{ma}^{GTmax}(Q)$	$-0,197 \cdot Q + 1,504 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 + 488,58$	$-0,319 \cdot Q + 6,689 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2 + 247,24$

Обозначения в табл. 1:

- $Q_{min}$  – минимальные значения тепловых нагрузок, Гкал/ч;
- $Q_{max}$  – максимальные значения тепловых нагрузок, Гкал/ч;
- $Q_{max}^{GTmin}$  – минимальная электрическая нагрузка при минимальной загрузке ГТ, МВт;  $N_{min}^{Qmax}(Q)$  – максимальная электрическая нагрузка при максимальном отпуске тепла, МВт;  $N_{ma}^{GTmax}(Q)$  – минимальная электрическая нагрузка при максимальном отпуске тепла, МВт.

### 3. Использование цифровых моделей ПГУ для решения локальных задач

Наличие цифровых моделей ПГУ в теплофикационном режиме как раз и позволяет решать некоторые задачи локального характера перед проведением оптимизационных задач станционного уровня – выбора включенного состава генерирующего оборудования, оптимальное распределение тепловой и электрической нагрузки станции и т.д.

Предварительное решение локальных задач в пределах одного блока направлено на определение исходных параметров и условий работы оборудования ПГУ в теплофикационном режиме.

К таким задачам относятся:

- определение максимального и минимального значений тепловой нагрузки паровой турбины при требуемой электрической нагрузке или наоборот – возможные границы по выработке электрической мощности в пределах регулировочного диапазона при требуемом (прогнозном) значении тепловой нагрузки;
- прогнозирование состава оборудования внутри электростанции в составе ПГУ и традиционных теплофикационных или конденсационных установок в тех случаях, когда требуемые объемы по тепловой нагрузке могут быть получены при полном (2ГТ+2КУ+ПТ) и неполном (1ГТ+1КУ+П) составах;
- выбор состава сетевых подогревателей в случаях, когда прогнозируемый отпуск тепла может быть получен и в режиме одноступенчатого и в режиме двухступенчатого подогрева сетевой воды, а при наличии пиковых подогревателей – оптимальная их комбинация;
- при работе теплофикационной установки в двухступенчатом режиме подогрева сетевой воды предварительное распределение прогнозного объема отпуска тепла между сетевыми подогревателями с учетом их текущего технического состояния по величине недогрева сетевой воды;
- исходя их прогнозных суточных графиков отпуска тепла и выработки электроэнергии для каждого часа оперативных суток выбор критерия оптимизации – минимум выработки электроэнергии и максимальный отпуск тепла (в ночные часы) или максимальная выработка электроэнергии при

заданном объеме отпуска тепла (в утренние часы подъема электрической нагрузки и пиковые часы максимальной электрической нагрузки).

Для иллюстрации использования цифровой модели при решении локальных задач рассмотрим задачу выбора состава включенного оборудования электростанции с блоками ПГУ-450 при следующих исходных данных: прогнозируемый отпуск тепла 100 Гкал/ч (116,3 МВт), электрическая мощность 315 МВт.

Возможные варианты работы ПГУ:

- в режиме с полным составом оборудования: электрическая мощность 315 МВт, отпуск тепла – 100 Гкал/ч, при этом расход топлива в соответствии с (5) составит 84,0 т.у.т/ч, а удельный расход топлива – 0,1948 кг у.т/кВт.ч;
- в режиме с неполным составом при отпуске тепла 100 Гкал/ч электрическая мощность составит 225 МВт, при этом расход топлива в соответствии с (6) составит 59,5 т.у.т/ч, удельный расход топлива – 0,174 кг у.т/ч;
- для приведения вариантов к равным условиям по выработке электроэнергии принимаем, что недопуск выработки электроэнергии 90 МВт/ч в варианте с неполным составом вырабатывается с удельным расходом топлива 0,30 кг у.т/кВт.ч. Тогда суммарный приведенный расход топлива во втором варианте составит 86,5 т.у.т/ч. Это означает, что в этих условиях переход ПГУ в режим работы с неполным составом оборудования экономически нецелесообразен.

#### 4. Заключение

Разработана цифровая модель парогазового энергоблока ПГУ—450 при ее работе в теплофикационном режиме с учетом температуры наружного воздуха и граничных значений тепловой и электрической нагрузки.

Показано, что с помощью цифровой модели могут быть решены локальные задачи в пределах одного блока, направленные на определение исходных параметров и условий работы оборудования ПГУ в теплофикационном режиме.

#### Литература

1. *Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Mezin S.V., Pashchenko F.F., Kosoy A.A.* Using a Computer Simulator to Create a Digital Model of a CCGT Power Unit // IFAC, 2022. – № 55(9). – P. 472–478.
2. *Аракелян Э.К.* Пути повышения маневренных характеристик ПГУ при работе в режимах регулирования нагрузки (на примере ПГУ-450) // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2023. – Том 25, № 1. – С. 72–88.
3. *Болонов В.О.* Выбор оптимальных режимов электростанций с ПГУ. Автореферат канд. тех. наук. – М., 2016. – 20 с.
4. *Обуваев А.С.* Разработка и исследование аналитической модели ПГУ-450. Дисс. канд. техн. наук. – М., 2011. – 20 с.
5. *Аракелян Э.К.* Оптимальное управление режимов ПГУ и ГТУ. Учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2020. – 52 с.
6. *Хуршудян С.Р.* Оптимизация режимов ПГУ при участии ее в регулировании мощности и частоты в энергосистеме (на примере ПГУ-450). Автореферат канд. тех. наук. – М., 2014. – 20 с.
7. *Цанев С.В., Буров В.Д., Ремизов А.Н.* Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций.: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2002. – 584 с.