

УДК 621.311.22; 620.9:007

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-20-30

Способы расширения регулировочного диапазона парогазовых установок и их сравнительная эффективность по показателям экономичности, маневренности и надежности на примере ПГУ–450. Обзор литературы

Э.К. Аракелян, А.В. Андрияшин, С.Ю. Бурцев, К.А. Андрияшин

Работа посвящена техническим решениям и анализу результатов исследований способов расширения регулировочного диапазона парогазовых установок (ПГУ), предлагаемых в технической литературе, на примере ПГУ-450 при базовой нагрузке 210...220 МВт. Проведено сравнение установок по критериям экономичности и маневренности при условии сохранения полного состава оборудования ПГУ. Показана актуальность проблемы расширения регулировочного диапазона ПГУ при их привлечении к системным услугам регулирования частоты и мощности в энергосистеме, установлены существующие технические и параметрические ограничения, мешающие этим процессам, на основе чего сформулированы основные трудности в решении поставленной задачи.

Описаны предлагаемые различными организациями и учеными исследования технических решений, направленные на расширение регулировочного диапазона ПГУ. Проанализированы их основные параметры и характеристики, указаны преимущества и недостатки. Для сравнения способов расширения регулировочного диапазона между собой по экономичности введен новый обобщенный показатель — характеристика относительного прироста удельного расхода топлива (ХОПУРТ), показывающий прирост удельного расхода топлива на выработку электроэнергии при расширении регулировочного диапазона ПГУ на единицу мощности. Представлены результаты расчетов этого показателя при различных величинах расширения регулировочного диапазона применительно к ПГУ-450. Определены целесообразные границы применения каждого из рассмотренных способов по критерию минимума ХОПУРТ.

Ключевые слова: парогазовая установка, расширение регулировочного диапазона, система антиобледенения, обводное парораспределение, моторный режим, экономичность, маневренность.

Для цитирования: Аракелян Э.К., Андрияшин А.В., Бурцев С.Ю., Андрияшин К.А. Способы расширения регулировочного диапазона парогазовых установок и их сравнительная эффективность по показателям экономичности, маневренности и надежности на примере ПГУ-450. Обзор литературы // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 20—30. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-20-30.

Methods for Expanding the Adjustment Range of Combined-Cycle Plants and Their Comparative Efficiency in Terms of Their Economic, Maneuverability and Reliability Indicators (taking the PGU-450 unit as an example). A Review of Publications

E.K. Arakelyan, A.V. Andryushin, S.Yu. Burtsev, K.A. Andryushin

The article is devoted to technical solutions and analysis of the results of research on ways to expand the adjustment range of combined-cycle plants (CCPs) proposed in the technical literature, using the example of PRU-450 combined-cycle plant at a basic load of 210 ... 220 MW.

Different CCPs are compared in terms of economic efficiency and maneuverability subject to keeping the full composition of CCP equipment.

It is shown that expansion of the CCP adjustment range becomes a topical issue if CCPs are involved in performing the system services of controlling the frequency and power in the grid. The existing technical and parametric constraints hampering the involvement of CCPs in these services are analyzed, and the main difficulties that are expected to be faced in solving the above-mentioned problem are formulated.

A variety of technical solutions aimed at expanding the CCP adjustment range that have been proposed by different organizations and scientists is described. The main parameters and features of these solutions are analyzed, and their advantages and drawbacks are pointed out. For comparing different adjustment range expansion methods with each other in terms of economic efficiency, a new generalized indicator is introduced, called the characteristic of relative increase in specific fuel consumption (CRISFC), which shows the increase in the specific fuel consumption for electricity generation in expanding the CCP adjustment by unit of CCP capacity. The results obtained from calculations of this indicator for

different adjustment range expansion ratios as applied to the PGU-450 combined-cycle plant are presented. The expedient application boundaries for each of the considered methods are determined according to the minimum CRISFC criterion.

Key words: combined-cycle plant, adjustment range expansion methods, anti-icing system, bypass steam admission, motor mode, economic efficiency, maneuverability.

For citation: Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Burtsev S.Yu., Andryushin K.A. Methods for Expanding the Adjustment Range of Combined-Cycle Plants and Their Comparative Efficiency in Terms of Their Economic, Maneuverability and Reliability Indicators (taking the PGU-450 unit as an example). A Review of Publications. MPEI Vestnik. 2017; 6:20—30. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-20-30.

В настоящее время ПГУ активно привлекаются к регулированию частоты и мощности энергосистемы, участвуют в оперативном и нормированном первичном регулировании частоты (ОПРЧ и НПРЧ), которое осуществляется с постоянным составом оборудования ПГУ в рамках определенного сертификационными испытаниями регулировочного диапазона, а для дубль-блоков — верхнего и нижнего полудиапазонов. При этом остро стоит вопрос обеспечения надежной и экономичной работы оборудования в максимально широком диапазоне нагрузок. При работе электростанций в рыночных условиях к показателям надежности и маневренности предъявляются жесткие требования, обеспечить которые в условиях эксплуатации оборудования с переменными режимами работы значительно сложнее, чем при использовании режимов глубокого разгрузки или остановочно-пусковых.

Степень разработанности проблем маневренности и эффективности ПГУ определяется прежде всего работами ведущих организаций страны (ОАО «ВТИ», ОАО «Фирма ОРГРЭС», НИУ «МЭИ», АО «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ», ИГЭУ и др.), а также зарубежными компаниями (Siemens Aktiengesellschaft, Alstom, Mitsubishi Heavy Industries, General Electric и др.), которые ведут интенсивные исследования по решению задач управления работой газотурбинных двигателей, маневренности ПГУ при участии в регулировании общесистемных параметров, оценке влияния климатических факторов, разного рода технологических ограничений [1—16].

Проанализированы технологические и параметрические ограничения теплофикационных ПГУ с дубль-блочным составом оборудования (2ГТ + 2КУ + ПТ, где ГТ, ПТ — газовая и паровая турбины, КУ — котел-утилизатор) при работе в конденсационном и теплофикационном режимах. Представлены предлагаемые различными организациями способы расширения регулировочного диапазона, а также проведено их сравнение между собой по показателям маневренности и экономичности. Результаты исследований показаны на примере энергоблока ПГУ-450.

Постановка проблемы

Традиционно под маневренностью оборудования тепловых электростанций [3—5] понимаются характеристики, определяющие быстроту и надежность

выполнения различных режимных функций для обеспечения надежной работы системы в нормальных и аварийных условиях.

Для парогазового энергоблока регулировочным диапазоном является диапазон изменения электрической мощности парогазового энергетического блока без изменения количества работающего электрогенерирующего оборудования и при сохранении нормативных экологических показателей по выбросам вредных веществ [16, 17].

В отличие от паротурбинных установок, где регулировочный диапазон — постоянная величина, у ПГУ он переменный, обусловленный переменными величинами как максимальной, так и минимальной нагрузки. Это связано с особенностями работы газотурбинной установки (ГТУ), поэтому для энергоблоков ПГУ нельзя провести однозначные границы допустимого регулировочного диапазона.

Верхняя граница регулировочного диапазона ПГУ, помимо зависимости от температуры наружного воздуха, зависит от типа ГТУ, ее характеристик и фактических условий работы энергоблока, в частности, от расхода топлива. Для ее оценки были предложены достаточно простые зависимости для конкретных энергоблоков ПГУ, как правило, от температуры наружного воздуха [3, 5, 7, 9].

Так, по результатам опытов, проведенных на тренажере энергоблока ПГУ-450, в [9] приведены следующие зависимости для оценки максимальных значений нагрузок ПГУ, ГТУ и ПТ, как функции от температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$:

$$-5 < t_{\text{нв}} \leq +25 \text{ } ^\circ\text{C}:$$

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{max}} = 494,64 - 1,43t_{\text{нв}} - 0,0626t_{\text{нв}}^2;$$

$$N_{\text{ГТУ}}^{\text{max}} = 341,96 - 1,379t_{\text{нв}} - 0,057t_{\text{нв}}^2;$$

$$N_{\text{ПТ}} = 152,7 - 0,05t_{\text{нв}} - 0,0056t_{\text{нв}}^2;$$

$$-20 < t_{\text{нв}} \leq -5 \text{ } ^\circ\text{C}:$$

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{max}} = 498,05 - 0,00483t_{\text{нв}} - 0,000167t_{\text{нв}}^3;$$

$$N_{\text{ГТУ}}^{\text{max}} = 343,6 - 0,41t_{\text{нв}} - 0,0113t_{\text{нв}}^2;$$

$$N_{\text{ПТ}} = 154,3 + 0,433t_{\text{нв}} + 0,011t_{\text{нв}}^2.$$

В технической литературе описан ряд способов увеличения мощности верхней границы регулировочного диапазона, но в настоящем обзоре они не рассматриваются.

Нижнюю границу регулировочного диапазона нагрузок ПГУ обуславливает ряд факторов.

Снижение надежности работы паровой турбины при работе ПГУ в конденсационном режиме при температуре пара контура высокого давления ниже $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызвано увеличением влажности пара в зоне последних ступеней цилиндра низкого давления паровой турбины, что приводит к появлению повышенного эрозийного износа рабочих лопаток [3, 12, 15]. В диапазоне нагрузок 154...90 МВт мощность ГТУ понижается за счет одновременного снижения расходов топливного газа и воздуха на входе в компрессор (регулируется входным направляющим аппаратом (ВНА)), при этом температура газа за ГТУ практически не меняется. Таким образом, нагрузка ПГУ-450 на нижней границе регулировочного диапазона по приведенному условию температуры пара высокого давления при работе блока с полным составом оборудования (2 ГТУ и ПТ) и температуре наружного воздуха, близкой к $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, должна составлять не менее 275 МВт и 145 МВт при работе блока с неполным составом оборудования (1 ГТУ и ПТ).

При работе ПГУ в теплофикационном режиме с закрытой диафрагмой, когда в конденсатор пропускается лишь небольшое количество пара для охлаждения последних ступеней ЦНД, данное ограничение не действует.

Ухудшение экологических характеристик связано с переходом ГТУ из режима с предварительным смешением в диффузионный режим горения, который протекает при снижении нагрузки газовых турбин примерно до 85 МВт, что приводит к резкому росту оксидов азота и СО (рис. 1).

Таким образом, по условию обеспечения экологических показателей ПГУ в допустимых пределах нижняя граница регулировочного диапазона ГТ и ПГУ составляет соответственно 56,7 и 60 %.

Как по надежности работы паровой турбины, так и по экологическим показателям между нижней границей регулировочного диапазона при работе ПГУ с полным составом оборудования и верхней при работе ее с неполным составом существует разрыв примерно в 10 %.

На рис. 2 приведены расходные характеристики ПГУ-450Т при различных значениях тепловой нагрузки и полном и неполном составе оборудования. В данном случае видно, что при увеличении тепловой нагрузки указанный выше разрыв увеличивается.

Ухудшение экономичности оборудования ПГУ при ее работе на пониженных нагрузках ниже определенной мощности (примерно 60 % от номинальной) обусловлено снижением КПД ГТУ, которое связано с тем, что при падении ее мощности увеличивается доля мощности, потребляемая компрессором. При нагруз-

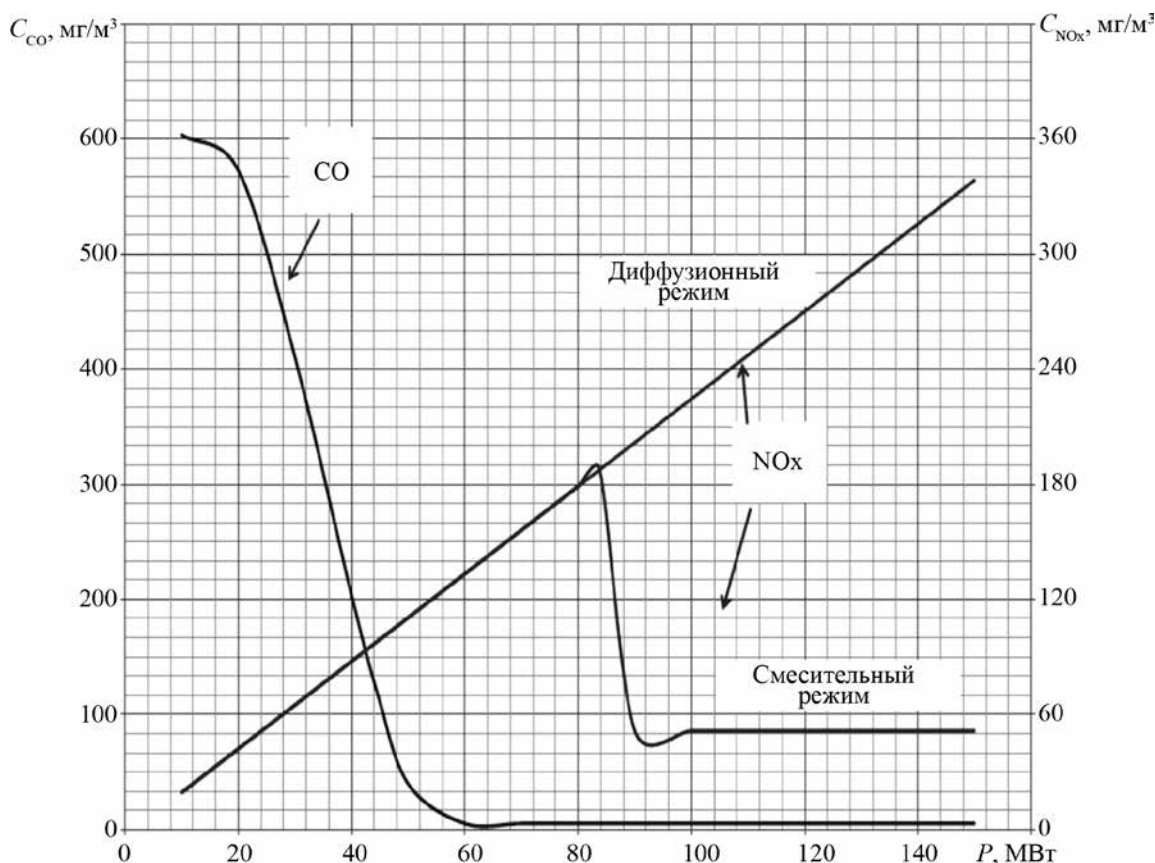


Рис. 1. Зависимость выбросов оксида азота и СО от мощности ГТ

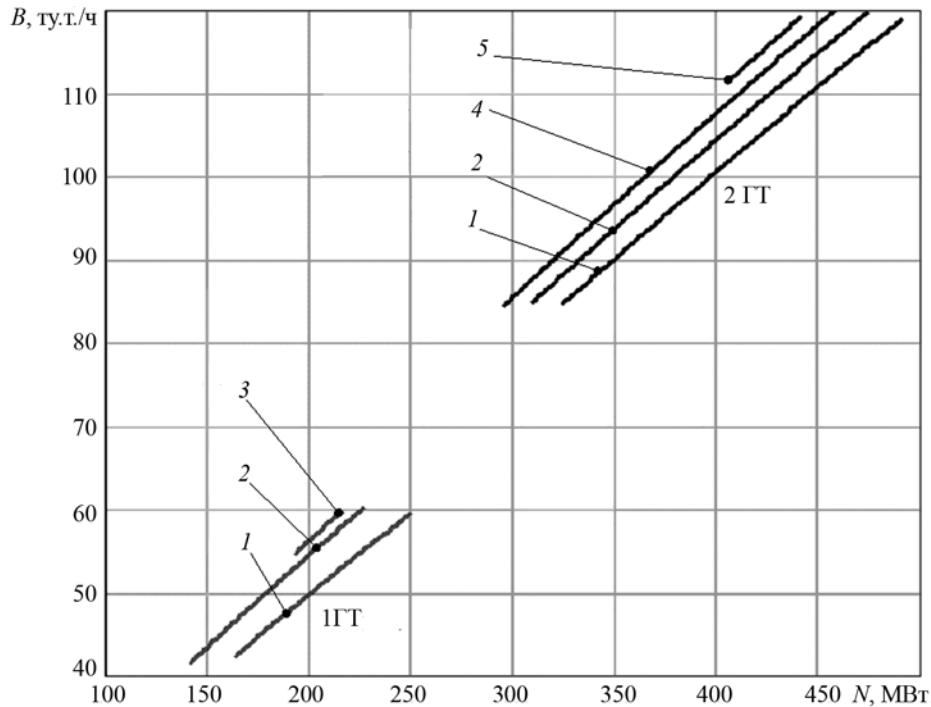


Рис. 2. Расчетные зависимости расхода топлива ПГУ-450Т от электрической мощности при значениях тепловой нагрузки $Q = 0$ (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 300 (5) Гкал/ч

как ГТУ, соответствующих режиму газовых турбин с закрытым ВНА, экономичность (КПД блока) падает также из-за снижения параметров пара высокого давления после котла-утилизатора, что приводит к снижению экономичности паротурбинной установки. Таким образом, после закрытия ВНА КПД ПГУ падает по совокупности уменьшения КПД газовых и паровой турбин одновременно (рис. 3).

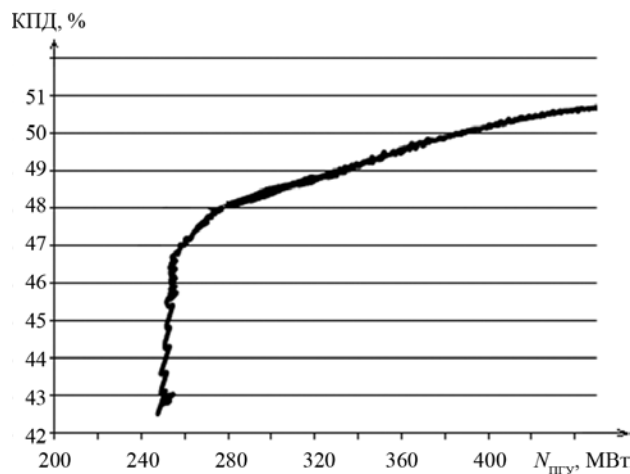


Рис. 3. Зависимость КПД ПГУ-450 от ее мощности в конденсационном режиме, полученная на тренажере ПГУ

Четкого критерия определения нижней границы регулировочного диапазона по условию снижения экономичности не существует, однако в технической литературе рекомендуется в качестве его принять допустимое

снижение КПД блока примерно на 5 % от номинального значения. Такое снижение при температуре наружного воздуха 15 °С достигается при нагрузке ПГУ-450 на уровне 289,5 МВт при работе паровой турбины на постоянном давлении пара высокого давления перед паровой турбиной и 294,6 МВт при скользящем давлении, что составляет соответственно 65,5 и 64,3 % от номинальной мощности ПГУ и находится в пределах регулировочного диапазона по надежности работы ПГУ. Полученный диапазон носит условный характер, так как эффективность участия ПГУ в регулировании нагрузки и частоты в энергосистеме определяется с учетом системных факторов.

Найти зависимости мощности нижней границы регулировочного диапазона или величины регулировочного диапазона ПГУ от температуры наружного воздуха в практических условиях сложно, поэтому на основании данных с тренажера энергоблока ПГУ-450 для режима работы установки с полным составом оборудования для мощности нижней границы регулировочного диапазона и величины регулировочного диапазона (МВт) в интервале температур $-20 \dots +20$ °С получены следующие уравнения при $t_{\text{овд}} \geq 450$ °С:

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{min}} = 293,1 - 1,4t_{\text{НВ}} - 0,00775t_{\text{НВ}}^2;$$

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

Таким образом, верхняя (максимальной мощности) и нижняя (минимально допустимой мощности) границы и регулировочный диапазон ПГУ зависят от темпе-

ратуры наружного воздуха. Это следует учитывать при прогнозировании участия ПГУ в регулировании графиков нагрузки как в суточном, так и при долгосрочном (месячном, годовом) интервалах времени.

При работе ПГУ-450 в конденсационном режиме регулировочный диапазон составляет 268...453 МВт (для полублока — 123...230 МВт), а в теплофикационный — 264...431 МВт (для полублока — 129...215 МВт). Следовательно, нижняя граница регулировочного диапазона ПГУ-450 находится на уровне 59...62 % от максимальной нагрузки, а величина регулировочного диапазона при полном составе оборудования составляет 35...40 %, что значительно уступает аналогичному показателю конденсационных энергоблоков на газомазутном топливе, для которых эти границы составляют соответственно 40...45 и 55...60 %.

Между нижней границей регулировочного диапазона при работе ПГУ с полным составом оборудования и верхней границей при работе с неполным составом имеется разрыв в 10 % от номинальной мощности ПГУ, в пределах которого эксплуатация энергоблока не допускается как по критерию надежности, так и по экологическим показателям. Эта особенность создает определенные сложности как для эксплуатационного персонала, так и для диспетчерских служб, в связи с чем особо важны исследования, направленные на поиск технологических решений и уменьшение величины или устранение указанного разрыва.

Стоит отметить, что применение полиблочных ПГУ позволяет получить более высокий КПД энергоблока на частичных нагрузках за счет отключения одной ГТ. Так, на энергоблоке ПГУ-450Т отключение одной ГТ позволяет достичь мощности ПГУ 270...280 МВт с КПД 48...49 % [3 — 5,14].

Вместе с тем использование режима останова части оборудования (одной из газовых турбин и соответствующего котла-утилизатора) с целью расширения регулировочного диапазона ПГУ-450 связано со снижением маневренности и надежности работы газовых турбин и ПГУ в целом.

Итак, проблема расширения регулировочного диапазона ПГУ заключается в поиске возможных технических решений, позволяющих расширить регулировочный диапазон ПГУ путем снижения мощности нижней границы регулировочного диапазона с одновременным соблюдением режимных и параметрических ограничений.

Анализ предлагаемых способов расширения регулировочного диапазона ПГУ-450

Представлены результаты исследования предлагаемых в технической литературе способов расширения регулировочного диапазона ПГУ-450 при базовой нагрузке 210...220 МВт и проведено их сравнение между собой по вышеуказанным параметрам при различных значениях требуемой по системным условиям величины снижения мощности ПГУ при условии сохранения полного состава оборудования установки.

Выбор нагрузки 210...220 МВт обусловлен тем, что при ней температура пара высокого давления соответствует ее минимальному допустимому значению, при этом обеспечиваются ограничения по экологии и надежной работе паровых собственных нужд.

Способ, предложенный Всероссийским теплотехническим институтом [3, 5, 18]

Суть предложения заключается во включении штатной системы антиобледенения (САО), предусмотренной для исключения обледенения при температурах наружного воздуха от +5 до -5 °С, во всем диапазоне температур наружного воздуха при условии поддержания температуры пара выше 440 °С. Это приводит к снижениям температуры газов вследствие затрат части теплоты топлива на прогрев наружного воздуха перед его подачей в компрессор, нагрузки газовой и паровой турбин на 7...8 и 2...3 МВт и ПГУ в целом на 16...19 МВт. Данный метод позволяет расширить регулировочный диапазон примерно на 4 %, но при этом КПД газовой турбины падает на 1,4...1,6 %, а также экономичность паровой турбины на 1,3...1,7 % вследствие снижения температуры пара высокого давления. По ПГУ в целом снижение КПД составляет 4,0 ... 5,0 %.

При базовой мощности 210 МВт и температуре наружного воздуха 15 °С включение САО снижает мощность ПГУ в целом на 16 МВт, при этом прирост удельного расхода топлива составляет 25,3 г у.т./кВт·ч.

Способ перевода части ступеней цилиндра высокого давления паровой турбины в малопаровой режим [1, 8]

Суть способа заключается в том, что часть ступеней цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины (до подачи пара низкого давления) переводится в малопаровой режим (МПР). Под МПР условно понимается такой режим работы ступени или группы ступеней турбины, при котором в ступенях отсутствует положительный теплоперепад в движущемся вдоль проточной части потоке пара, который в этом случае подается специально для охлаждения ступеней (или возникает вследствие протечки пароплотнения). Для предложенной схемы в качестве охлаждающего используется пар низкого давления, который по схеме противотока движется от 16-й ступени ЦВД к 1-й ступени и далее сбрасывается в ЦВД паровой турбины. Пар высокого давления, ранее поступавшего в головную часть ЦВД, сбрасывается частично (20,4 кг/с) через специальный теплообменник в линию подачи пара низкого давления, частично (53,27 кг/с) — в проточную часть ЦВД (рис. 4). Параметры ПГУ-450 для предложенной технологической схемы: мощность ПГУ до и после перевода в МПР — 210 и 179,6 МВт; мощность паровой турбины до и после перевода в МПР — 85,6 и 55,2 МВт; расширение регулировочного диапазона ПГУ — 30,4 МВт (6,75 % от номинальной мощности ПГУ); удельный расход условного топлива ПГУ при базовой нагрузке (при температуре наружного воздуха 15 °С) и в режиме МПР — 0,307 и 0,3589 г у.т./кВт·ч.

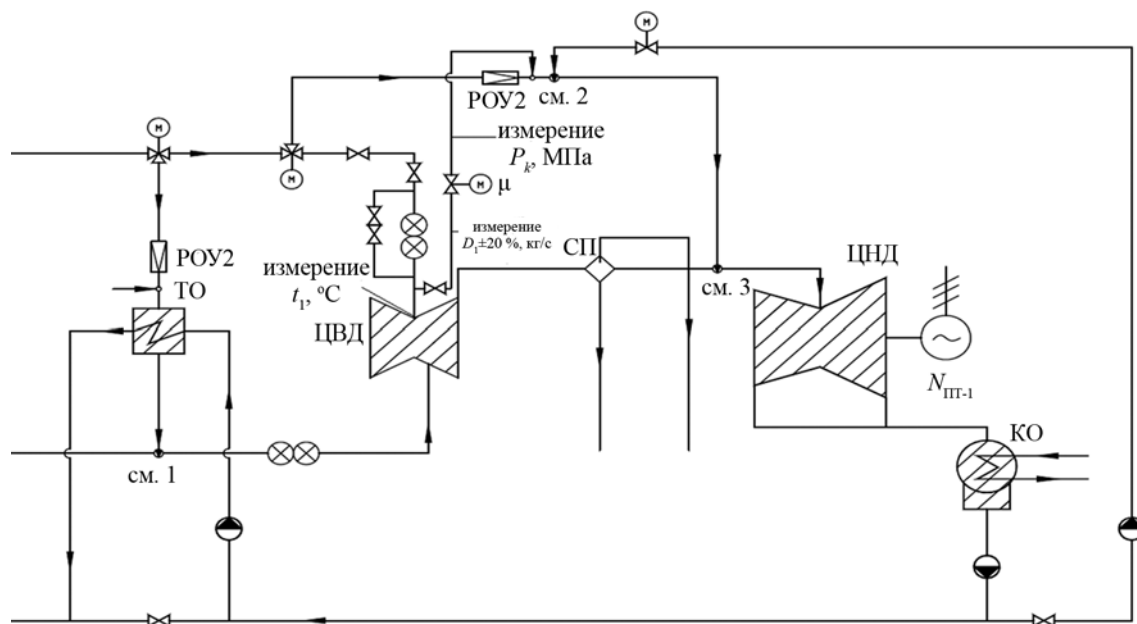


Рис. 4. Упрощенная схема перевода части ЦВД паровой турбины Т-125/150 в малопаровой режим и режим с обводным парораспределением пара высокого давления

Недостаток такого режима помимо низкой эффективности заключается в необходимости проведения конструктивных и схемных изменений в тепловой схеме паровой турбины и в том, что он может применяться в основном как способ резервирования мощности ПГУ или регулирования мощности с постоянной величиной нижней границы мощности ПГУ.

Способы с применением обводного парораспределения пара высокого давления [7—9]

Режим 1. Сброс части пара высокого давления через редуциционно-охлаждающую установку РОУ2 и пароводяной теплообменник (ТО) в линию подачи пара низкого давления в максимально допустимом количестве — 20,05 кг/с, при этом расход пара низкого давления равен максимально допустимому расходу 41,67 кг/с (150 т/ч); остальной расход пара высокого давления в количестве 53,27 кг/с (191,8 т/ч) поступает в ЦВД по штатной схеме (см. рис. 4). Расчеты показали, что при этом мощность паровой турбины снижается на 4,9 МВт. Таким образом, данный способ можно использовать для расширения регулировочного диапазона ПГУ на 4,9...5,0 МВт.

Режим 2. Часть пара высокого давления в количестве 20,4 кг/с сбрасывается через РОУ1 в ЦВД, при этом он предварительно охлаждается до температуры пара на входе в ЦВД путем впрыска основного конденсата из конденсатора. Остальная часть пара высокого давления — 53,28 кг/с поступает в ЦВД по штатной схеме (см. рис. 4). Мощность ПТ снижается на 9,2 МВт. При сбросе пара высокого давления по этой схеме в максимальном количестве (59,78 кг/с) и подаче пара высокого давления по штатной схеме в ЦВД в минимально допустимом количестве 13,89 кг/с (50 т/ч) снижение мощности ПТ составило 36,4 МВт. Таким

образом, снижение мощности ПГУ возможно в пределах 0...36,4 МВт.

Режим 3. В нем совместно применяются первый и второй режимы. Подача пара высокого давления в ЦВД по штатной схеме может быть снижена до минимально допустимой величины 13,89 кг/с (50 т/ч), сброс пара высокого давления в линию пара низкого давления может быть увеличен до максимальной величины, как в режиме 1, т. е. до 20,05 кг/с, остальная часть пара высокого давления — сброс в ЦВД (39,38 кг/с). Мощность паровой турбины понижается до 62,1 МВт, мощность ПГУ составляет 186,5 МВт, и таким образом регулировочный диапазон мощности ПГУ увеличивается на 23,5 МВт.

Режим 4. При работе ПГУ-450 в теплофикационном режиме пределом обводного парораспределения является перевод ПГУ в режим ГТУ–ТЭЦ со сбросом пара высокого и низкого давления в сетевые подогреватели помимо паровой турбины с ее остановом или переводом в моторный режим [2, 18]. С точки зрения маневренности и надежности работы паровой турбины предпочтителен ее перевод в моторный режим, так как при обратном включении турбины в режим генерации мощности ее нагружение занимает всего 10...15 мин вместо 25...30.

Следует отметить, что данный режим позволяет снизить нижнюю границу мощности ПГУ до уровня 150...155 МВт, но он может применяться в основном как способ резервирования мощности ПГУ или как способ регулирования мощности с постоянной величиной нижней границы мощности ПГУ.

Способ, описанный в [11]

Идея, изложенная в [11], состоит в подогреве сжатого компрессором воздуха паром высокого давления, отбираемого перед турбиной.

Итоговая мощность ПГУ определяется количеством отбираемого пара и в режиме паровой турбины с поддержанием давления «до себя» нижняя граница регулировочного диапазона может быть расширена. В результате для режимов, близких к номинальному, КПД ГТУ с учетом аэродинамических потерь можно повысить на 4,5...5,0 % с учетом уменьшения (вследствие применения регенерации) мощности паровой части ПГУ на 1,5...2,0 %, что на 3,0...3,5 % снизит удельный расход топлива. Однако при снижении нагрузки ПГУ уменьшаются температура и расход пара высокого давления, поэтому возможное расширение регулировочного диапазона составит 10 МВт.

В [12, 13] для расширения регулировочного диапазона дубль-блочных ПГУ (на примере ПГУ-450) предложено включить в схему парогазовой установки дополнительный газовый котел для подогрева пара высокого давления перед паровой турбиной, позволяющий регулировать температуру пара высокого давления на пониженных нагрузках ПГУ и достичь поставленной цели расширения регулировочного диапазона ПГУ в пределах, отвечающих требованиям энергосистемы при участии их в регулировании мощности и частоты системы при условии работы с полным составом оборудования (рис. 5).

Для каждой базовой нагрузки ПГУ оптимальная температура подогрева пара высокого давления находится на границе ограничения либо по сухости пара за последней ступенью ЦНД, либо по допустимой температуре пара высокого давления на входе в ЦВД

паровой турбины. Так, применительно к ПГУ-450, максимальной эффективностью обладает режим ПГУ с базовой мощностью 220 МВт и подогревом пара высокого давления с 445 до 470 °С, при этом увеличение расхода топлива и снижение КПД ПГУ составляют соответственно 1,44 г/кВт·ч и 0,32 %.

При снижении мощности нижней границы регулировочного диапазона до 140 МВт и обеспечении температуры пара высокого давления на уровне 450 °С указанные величины составляют соответственно 3,11 и 0,32 %.

В [16, 17] для расширения регулировочного диапазона ПГУ-450Т рекомендуется углубление регулирования расхода воздуха с помощью ВНА компрессора, перепуска части сжатого в компрессоре воздуха на его вход при поддержании значений коэффициента избытка воздуха и температуры горения в камере сгорания, при которых обеспечивается достаточная устойчивость горения гомогенной предварительно подготовленной топливоздушной смеси с малой концентрацией NOx и CO в продуктах сгорания.

Углубление регулирования позволяет уменьшить нагрузку ПГУ-450Т до 180...220 МВт, соответствующих технологическому минимуму в 0,40...0,48 от номинальной нагрузки. При снижении нагрузки ГТУ перекрытие ВНА позволяет повысить температуру перегретого пара высокого давления (при одинаковой нагрузке) на 40 °С, увеличить мощность паровой турбины, тем самым снизив удельный расход теплоты примерно на 3 %, при этом проблем с влажностью

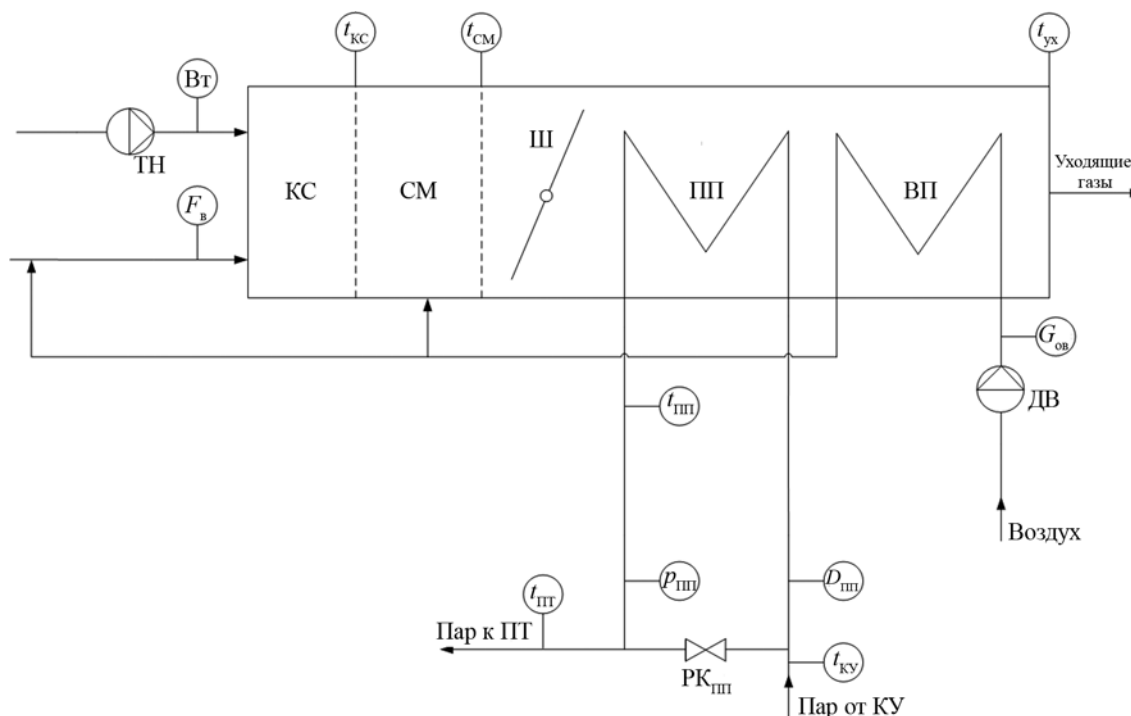


Рис. 5. Упрощенная тепловая схема включения дополнительного котла в тепловую схему ПГУ-450:

КС — камера сжигания; СМ — смеситель воздуха и дымовых газов; Ш — шибер; ПП — промежуточный пароперегреватель пара высокого давления; ВП — воздухоподогреватель; ДВ — дополнительный дутьевой вентилятор

пара за последней ступенью ЦНД не возникает. Вместе с тем углубление регулирования расхода воздуха с помощью ВНА с поддержанием температуры отработавших в ГТУ газов сопровождается снижением перепада температур и коэффициента избытка воздуха в камере сгорания, поэтому возможность ее работы в малоэмиссионном смесительном режиме при этих условиях сомнительна и должна быть подтверждена испытаниями.

Перепуск части сжатого в компрессоре воздуха на его вход при поддержании температуры отработавших в ГТУ газов сопровождается увеличением избытка воздуха в камере сгорания, и, таким образом, его максимально допустимое значение, соответствующее переходу камеры сгорания из смесительного в диффузионный режим горения с существенным увеличением концентрации NOx в продуктах горения, ограничивает возможности разгрузки ПГУ с помощью рассматриваемого способа.

Каждый из способов расширения регулировочного диапазона ПГУ имеет свои особенности, преимущества и недостатки.

Так, особенность технологических решений расширения регулировочного диапазона ПГУ-450 заключается в следующем:

- расширение регулировочного диапазона ПГУ проходит при постоянном расходе топлива на ГТУ за счет снижения в основном мощности паровой турбины;
- снижение мощности паровой турбины проводится с определенной «базовой» мощности ПГУ, определяемой конденсационным или теплофикационным режимом работы ПГУ, и ограничениями по факторам надежности и экологии;
- уменьшение мощности ПГУ при постоянном расходе топлива на ГТУ приводит к потере экономичности вырабатываемой электроэнергии по причине сниже-

ния электрической мощности, т. е. к снижению КПД блока или увеличению удельного расхода топлива на выработку электроэнергии.

Таким образом, в качестве критерия сравнения различных способов расширения регулировочного диапазона ПГУ между собой по экономичности в [18] вместо общепринятой характеристики относительных приростов топлива (ХОПТ) предложено использовать характеристику относительного прироста удельного расхода топлива (ХОПУРТ, (г/кВтч)/кВт), рассчитываемую по выражению

$$\partial b_{\text{рд}} = \frac{d\Delta b_{\text{рд}}(\Delta N_{\text{рд}})}{d\Delta N_{\text{рд}}},$$

где $\Delta b_{\text{рд}}(\Delta N_{\text{рд}})$ — функция прироста удельного расхода топлива на ПГУ от величины расширения регулировочного диапазона $N_{\text{рд}}$ для рассматриваемого способа расширения регулировочного диапазона, определяемого как

$$\begin{aligned} \Delta b_{\text{рд}}(\Delta N_{\text{рд}}) &= b_{\text{ПГУ}}(N_6 - \Delta N_{\text{рд}}) - b_{\text{ПГУ}}(N_6) = \\ &= \frac{B_{\text{ПГУ.б}}}{N_6 - \Delta N_{\text{рд}}} - \frac{B_{\text{ПГУ.б}}}{N_6} = \frac{b_{\text{ПГУ.б}} \Delta N_{\text{рд}}}{N_6 \left(1 - \frac{\Delta N_{\text{рд}}}{N_6}\right)}, \end{aligned}$$

$B_{\text{ПГУ}}(N_6)$ — расход условного топлива на ПГУ при базовой мощности N_6 ; $b_{\text{ПГУ.б}}$ — удельный расход топлива при базовой нагрузке.

Данный показатель позволяет сравнивать между собой варианты расширения регулировочного диапазона ПГУ по отношению к «базовой» нагрузке по экономичности.

В таблице и на рис. 6 приведены результаты расчетов показателей паровой турбины и ПГУ-450 в конден-

Результаты расчетов показателей паровой турбины и ПГУ-450 в конденсационном режиме для основных способов регулирования

Режим	Параметры								
	$D_0^{\text{НД}}$, кг/с	$D_0^{\text{ЦНД}}$, кг/с	$D_0^{\text{ВД}}$, кг/с	$N_{\text{ПТ}}$, МВт	$N_{\text{ГТУ}}$, МВт	$N_{\text{ПГУ}}$, МВт	$\Delta N_{\text{рд}}$, МВт	$\Delta b_{\text{рд}}$, г/кВт·ч	$b_{\text{рд}}$, кг/кВт·ч
ИС	—	—	63,67	85,6	124,4	210	—	—	0,307
1	5	—	58,67	84,2	124,4	208,6	1,4	2,06	0,30906
	10	—	53,67	83,4	124,4	207,8	2,2	3,25	0,31025
	20,0 5	—	43,62	80,7	124,4	205,1 9,9	4,9	7,334	0,31433
2	—	10	53,67	81,3	124,4	205,7	4,3	6,418	0,313418
	—	20,05	43,62	76,4	124,4	200,8	9,2	14,066	0,32107
	—	59,78	13,89	49,2	124,4	173,6	36,4	64,37	0,37137
3	10	10	43,67	77,3	124,4	201,7	8,3	12,633	0,31963
	20,05	20	23,62	71,14	124,4	195,5	14,46	22,702	0,3297
	20,05	39,38	13,89	62,09	124,4	186,5	23,51	38,702	0,3457
CAO	—	—	63,67	83,6	110,4	194,0	16,0	25,3	0,3323
МПП	20,05	43,61	—	55,23	124,4	179,63	30,37	51,9	0,3589

Обозначения: ИС — исходное состояние при базовой мощности ПГУ; $D_0^{\text{НД}}$ — пропуск пара высокого давления в линию подачи пара низкого давления; $D_0^{\text{ЦНД}}$ — пропуск пара высокого давления в цилиндр низкого давления; $D_0^{\text{ВД}}$ — пропуск пара высокого давления в ЦВД по штатной схеме; 1 — 3 — режимы обводного парораспределения

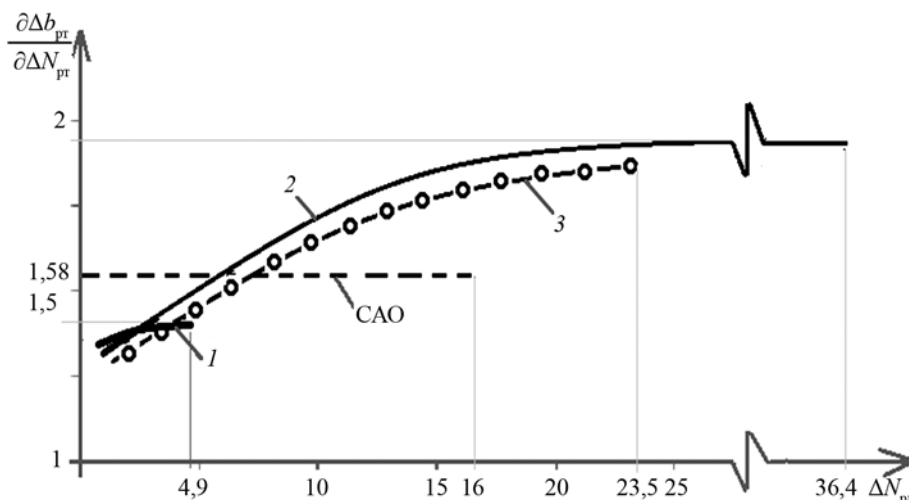


Рис. 6. Графики зависимости характеристики относительного прироста удельного расхода топлива на ПГУ-450 для следующих способов расширения регулировочного диапазона:

1, 2, 3 — режимы обводного парораспределения; CAO — включение системы антиобледенения

сационном режиме для основных способов регулирования (при температуре наружного воздуха 15 °С). Из графиков, изображенных на рис. 6, следует, что если критерием выбора способа резервирования при различных значениях расширения регулировочного диапазона принять минимальное значение ХОПУРТ, то можно выделить четкие границы применения каждого из рассмотренных способов. Так, обводные способы регулирования целесообразно использовать при необходимости расширения регулировочного диапазона до 6...7 МВт и выше 16 МВт; в промежутке этих мощностей выгоден способ CAO.

Приведенные данные показывают, что при выбранных исходных условиях работы ПГУ-450 при мощности 210 МВт совместное использование приведенных способов расширения регулировочного диапазона ПГУ позволяет значительно уменьшить мощность нижней границы регулировочного диапазона и регулировать нагрузку ПГУ в достаточно широких пределах при ее работе с полным составом оборудования с обеспечением требуемых эксплуатационных условий по экологии и надежности.

Каждый из рассмотренных способов расширения регулировочного диапазона имеет определенные границы, т.е. минимальное и максимальное значения величины снижения мощности ПГУ. Если требуемая системой величина регулировочного диапазона ПГУ больше, чем может обеспечить какой-либо из способов, то появляется необходимость одновременного применения нескольких способов с оптимальным распределением требуемой величины расширения регулировочного диапазона между ними.

Таким образом, сравнение способов расширения регулировочного диапазона по принятому критерию экономичности показало, что наиболее эффективным является первый способ (сброс части пара высокого давления в линию подачи пара низкого давления), но

при этом снижение мощности нижней границы регулировочного диапазона небольшое — до 10 МВт (2,2 %).

При работе ПГУ-450 в конденсационном режиме применение способов обводного парораспределения пара высокого давления позволяет снизить нижнюю границу регулировочного диапазона до 186,6 МВт (41,6 %) и расширить регулировочный диапазон ПГУ до 58,5 %, при этом КПД ПГУ снижается до уровня 37 %.

Применение малопарового режима позволяет достичь более глубокого разгружения ПГУ — до уровня 178,6 МВт (39,7 %), но при этом КПД ПГУ снижается до уровня 35,7 %, вместе с тем данный режим можно рассматривать не как способ регулирования, а как способ резервирования мощности ПГУ.

Применение режима ПГУ ГТУ-ТЭЦ с переводом паровой турбины в моторный режим позволяет максимально снизить мощность ПГУ в теплофикационном режиме до уровня 150 МВт с одновременным улучшением маневренных характеристик паровой турбины.

Литература

1. Аракелян Э.К., Сахаров К.В. Исследование температурного состояния ступеней ЦВД паровой турбины Т-125/150 ПГУ-450 при работе в малопаровом режиме // Новое в российской электроэнергетике. 2013. №1. С. 5—17.
2. Аракелян Э.К., Андришин К.А., Безделгин И.Ю. Исследование температурного состояния проточной части паровой турбины Т-125/150 при работе ее в беспаровом и моторном режимах // Электрические станции. 2015. № 6. С. 21—26.
3. Радин Ю.А. Исследование и улучшение маневренности парогазовых установок: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2013.
4. Цанев С.В., Буров В.Д., Гончаренко Д.В., Вараксина Н.В. Определение нижней границы нагруз-

ки парогазового теплофикационного энергоблока ПГУ-450Т // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 6. С. 31—35.

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

6. **Аракелян Э.К., Болоннов В.О., Сахаров К.В.** Выбор оптимальных режимов работы бинарных ПГУ на пониженных нагрузках // Новое в российской электроэнергетике. 2011. № 11. С. 5—13.

7. **Аракелян Э.К., Хуршудян С.Р.** Выбор оптимальных режимов газовых турбин ПГУ-450Т при пониженных нагрузках // Новое в российской электроэнергетике. 2013. № 7. С. 5—14.

8. **Сахаров В.К.** Выбор оптимальных режимом энергоблоков ПГУ при участии их в регулировании мощности энергосистемы: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013.

9. **Хуршудян С.Р.** Оптимизация режимов ПГУ при участии ее в регулировании мощности и частоты в энергосистеме (на примере ПГУ-450): дисс. ... канд. техн. наук. М., 2014.

10. **Пат. С12144619 РФ.** Парогазовая установка / П.А. Березинец, Г.Г. Ольховский // Бюл. изобрет. 2000. № 2.

11. **Сахаров В.К.** Выбор оптимальных режимом энергоблоков ПГУ при участии их в регулировании мощности энергосистемы: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013.

12. **Коршикова А.А.** Выбор оптимальных параметров, схемы и режимов работы дубль-блочной ПГУ с целью максимального расширения регулировочного диапазона (применительно к ПГУ-450Т): дисс. ... канд. техн. наук. М., 2014.

13. **Аракелян Э.К., Коршикова А.А., Хуршудян С.Р.** Эффективность применения дополнительной камеры сгорания низкого давления для совершенствования режимов энергоблока ПГУ-450 на пониженных нагрузках // Вестник МЭИ. 2013. № 3. С. 32—37.

14. **Обуваев А.С.** Разработка и исследование аналитической модели энергоблока ПГУ-450: дисс. ... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2011.

15. **Ольховский Г.Г., Радин Ю.А.** Расширение регулировочного диапазона парогазовых установок ПГУ-450 // Тепловые электрические станции. 2015. № 3. С. 2—9.

16. **Пат. 2536458 РФ.** Способ уменьшения мощности маневренной энергетической газотурбинной установки ниже регулировочного предела / Г.Г. Ольховский, В.П. Трушечкин, И.И. Гладких // Бюл. изобрет. 2014. № 36.

17. **Давыдов А.В.** Исследование режимов бинарных ПГУ с целью повышения маневренности: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2009.

18. **Аракелян Э.К., Старшинов В.А.** Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. М.: Изд-во МЭИ, 1993.

References

1. **Arakelyan E.K., Saharov K.V.** Issledovanie Temperaturnogo Sostoyaniya Stupeney TSVD Parovoy Turbiny T-125/150 PGU-450 pri Rabote v Maloparovom Rezhime. Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike. 2013;1:5—17. (in Russian).

2. **Arakelyan E.K., Andryushin K.A., Bezdelgin I.Yu.** Issledovanie Temperaturnogo Sostoyaniya Protochnoy Chasti Parovoy Turbiny T-125/150 pri Rabote ee v Besparovom i Motornom Rezhimakh. Elektricheskie Stantsii. 2015;6:21—26. (in Russian).

3. **Radin Yu.A.** Issledovanie i Uluchshenie Manevrennosti Parogazovykh Ustanovok: Avtoref. Diss. ... Doktora Tekhn. Nauk. M., 2013. (in Russian).

4. **TSanev S.V., Burov V.D., Goncharenko D.V., Varaksina N.V.** Opredelenie Nizhney Granitsy Nagruzki Parogazovogo Teplofikatsionnogo Energobloka PGU-450T. Energoberezhenie i Vodopodgotovka. 2008;6:31—35. (in Russian).

5. **Radin Yu.A., Davydov A.V., Chugin A.V., Piskovatskov I.N.** Opredelenie dopustimogo Regulirovochnogo Diapazona Nagruzok Energobloka PGU-450T pri Rabote v Kondensatsionnom Rezhime. Teploenergetika. 2004;5:47—52. (in Russian).

6. **Arakelyan E.K., Bolonov V.O., Saharov K.V.** Vyor Optimal'nykh Rezhimov Raboty Binarnykh PGU na Ponizhennykh Nagruzkakh. Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike. 2011;11:5—13. (in Russian).

7. **Arakelyan E.K., Hurshudyan S.R.** Vyor Optimal'nykh Rezhimov Gazovykh Turbin PGU-450T pri Ponizhennykh Nagruzkakh. Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike. 2013;7:5—14. (in Russian).

8. **Saharov V.K.** Vyor Optimal'nykh Rezhimom Energoblokov PGU pri Uchastii ih v Regulirovanii Moshchnosti Energosistemy: Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2013. (in Russian).

9. **Hurshudyan S.R.** Optimizatsiya Rezhimov PGU pri Uchastii ee v Regulirovanii Moshchnosti i Chastoty v Energosisteme (na Primere PGU-450): Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2014. (in Russian).

10. **Pat. С12144619 RF.** Parogazovaya Ustanovka / P.A. Berezinets, G.G. Ol'hovskiy. Byul. Izobret. 2000;2. (in Russian).

11. **Saharov V.K.** Vyor Optimal'nykh Rezhimom Energoblokov PGU pri Uchastii ih v Regulirovanii Moshchnosti Energosistemy: Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2013. (in Russian).

12. **Korshikova A.A.** Vyor Optimal'nykh Parametrov, Skhemy i Rezhimov Raboty Dubl'-blochnoy PGU s Tsel'yu Maksimal'nogo Rasshireniya Regulirovochnogo Diapazona (Primenitel'no k PGU-450T): diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2014. (in Russian).

13. **Arakelyan E.K., Korshikova A.A., Hurshudyan S.R.** Effektivnost' Primeneniya Dopolnitel'noy Kamery Sgoraniya Nizkogo Davleniya dlya Sovershenstvovaniya Rezhimov Energobloka PGU-450 na Ponizhennyh Nagruzkah. Vestnik MPEI. 2013;3:32—37. (in Russian).

14. **Obuvaev A.S.** Razrabotka i Issledovanie Analiticheskoy Modeli Energobloka PGU-450: diss. ... Kand. Tekh. Nauk. M.: NRU «MPEI», 2011. (in Russian).

15. **Ol'hovskiy G.G., Radin Yu.A.** Rasshirenie Regulirovochnogo Diapazona Parogazovyh Ustanovok PGU-450. Teplovye Elektricheskie Stantsii. 2015;3:2—9. (in Russian).

16. **Pat. 2536458 RF.** Sposob Umen'sheniya Moshchnosti Manevrennoy Energeticheskoy Gazoturbinoy Ustanovki Nizhe Regulirovochnogo Predela / G.G. Ol'hovskiy, V.P. Trushechkin, I.I. Gladkih. Byul. Izobret. 2014;36. (in Russian).

17. **Davydov A.V.** Issledovanie Rezhimov Binarnykh PGU s Tsel'yu Povysheniya Manevrennosti: Diss... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2009. (in Russian).

18. **Arakelyan E.K., Starshinov V.A.** Povyshenie Ekonomichnosti i Manevrennosti Oborudovaniya Teplovyh Elektrostantsiy. M.: Izd-vo MPEI, 1993. (in Russian).

Сведения об авторах

Аракелян Эдик Койрунович — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: Edik_arakelyan@inbox.ru

Андрюшин Александр Васильевич — доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: AndriushinAV@mpei.ru

Бурцев Святослав Юрьевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, e-mail: burtsevsv@yandex.ru

Андрюшин Кирилл Александрович — аспирант кафедры тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: AndriushinAV@mpei.ru

Information about authors

Arakelyan Edik K. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: Edik_arakelyan@inbox.ru

Andryushin Aleksandr V. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: AndriushinAV@mpei.ru

Burtsev Svyatoslav Yu. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of All-russian Research Institute of Physico-technical and Radio Engineering Measurements, e-mail: burtsevsv@yandex.ru

Andryushin Kirill A. — Ph.D.-student of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: AndriushinAV@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 31.03.2017