

УДК 621.311

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-11-19

### Оценка технической возможности и целесообразности использования паровой турбины ПГУ-450 для регулирования частоты в энергосистеме

Э.К. Аракелян, С.Ю. Бурцев

В состав бинарной парогазовой установки (ПГУ) дубль-блочной компоновки входят два активных элемента регулирования нагрузки: газовая и паровая турбины. В настоящее время ПГУ активно привлекают к регулированию частоты в энергосистеме. Большие скорости набора и сброса нагрузки в сочетании с малой инерционностью обеспечивают газовой турбине (ГТ) высокие показатели маневренности и выводят ее на первое место в системе управления мощностью ПГУ. С другой стороны, низкая зависимость КПД паровой турбины (ПТ) от текущей нагрузки и ее высокая маневренность за счет использования аккумулирующей способности барабанов котлов-утилизаторов позволяют использовать паровую турбину во время регулирования частоты энергосистемы.

Приведены результаты моделирования на тренажерной компьютерной модели энергоблока ПГУ-450 процессов ее участия в регулировании частоты в энергосистеме с активным привлечением паровой турбины ПГУ к изменению мощности ПГУ в начальные, наиболее сложные моменты изменения нагрузки в соответствии с требованиями энергосистемы за счет использования аккумулированного в барабанах котлов-утилизаторов тепла.

В результате проведенных исследований показаны техническая возможность и целесообразность предлагаемой технологии. Техническая целесообразность активного привлечения паровой турбины ПГУ к регулированию частоты путем упреждающего воздействия на паровую турбину обусловлена высокой маневренностью турбины за счет значительной аккумулирующей способности барабанов котла, а экономическая составляющая — незначительным изменением КПД как ПТ, так и ГТУ при изменениях нагрузки в требуемых пределах изменения мощности ПГУ.

*Ключевые слова:* парогазовая и газотурбинная установки, барабаны котла-утилизатора, маневренность, аккумулированное тепло, резерв мощности, регулирование частоты, системные требования, моделирование.

*Для цитирования:* Аракелян Э.К., Бурцев С.Ю. Оценка технической возможности и целесообразности использования паровой турбины ПГУ-450 для регулирования частоты в энергосистеме // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 11—19. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-11-19.

### Evaluating the Technical Feasibility and Advisability of Using the PGU-450 Combined-Cycle Plant's Steam Turbine for Frequency Control in the Power System

E.K. Arakelyan, S.Yu. Burtsev

A binary combined cycle plant (CCP) with the twin power unit configuration includes two active load control components: a gas turbine and a steam turbine. At present, CCPs are actively involved in frequency control in the power system. High load pickup and decreasing rates in combination with a low inertia impart high maneuverability indicators to the gas turbine, due to which it plays the leading role in the CCP power output control system. On the other hand, owing to a low dependence of the steam turbine efficiency on the current load and its high maneuverability due to using the storage capacity of the heat-recovery steam generator drums, the steam turbine can also be used in controlling the power system frequency.

The article presents the results from modeling the PGU-450 power unit participation processes in controlling the power system frequency on the power unit's computerized training simulator model with active involvement of the CCP steam turbine in adjustment of the CCP power output in the initial (most complex) load variation stage in accordance with the power system requirements through using the heat stored in the drums of heat-recovery steam generators.

As a result of the accomplished studies, the technical feasibility and advisability of the proposed technology are shown. The technical advisability of actively involving the CCP steam turbine in control of frequency by using feed-forward control of the steam turbine is stemming from its high maneuverability due to a significant storage capacity of the steam generator drums, and the economic feasibility is due to the fact that both the steam turbine and gas turbine efficiencies change only slightly in changing the load within the required CCP power output variation limits.

*Key words:* combined-cycle plant, gas turbine unit, heat-recovery steam generator drums, maneuverability, stored heat, power capacity reserve, frequency control, system requirements, simulation.

*For citation:* Arakelyan E.K., Burtsev S.Yu. Evaluating the Technical Feasibility and Advisability of Using the PGU-450 Combined-Cycle Plant's Steam Turbine for Frequency Control in the Power System. Bulletin of MPEI. 2019;3:11—19. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-11-19.

Ключевая задача развития парогазовой отрасли — привлечение парогазовых установок (ПГУ) к регулированию частоты и мощности энергосистемы. Основным препятствием является попытка применить требования к ПГУ, разработанным для паросиловых энергоблоков.

В паросиловых установках (ПСУ) реакция на изменение частоты в энергосистеме достигается воздействием на регулирующие клапаны (РК) паровой турбины (ПТ). При неполном разгрузении или наборе мощности мгновенная реакция паровой турбины на внешнее возмущение сменяется затяжным процессом стабилизации части параметров, обусловленной высокой инерционностью котла.

Традиционно мощность ПГУ регулируется благодаря малоинерционным газовым турбинам (ГТ) с высокой маневренностью и отсутствием ограничения темпа изменения нагрузки. Следует заметить, что при изменении нагрузки ГТ необходимо поддержание определенного соотношения топливо – воздух, подаваемых в камеру сгорания. Расход топлива на горелки регулируется посредством топливного клапана (РТК) и меняется практически мгновенно, что нельзя сказать про расход воздуха, который контролируется при помощи входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора ГТУ. Например, ВНА газотурбинной установки ГТЭ-160 имеет постоянную скорость перемещения 5,6%/УП/с. Таким образом, в наиболее ответственный начальный момент отклонения частоты скорость изменения нагрузки ГТ сильно уступает скорости реакции ПТ.

Совершаемая полезная работа (выдаваемая активная мощность) — это результат затрачиваемой энергии в виде сжигания топлива, соответственно, переход на новую нагрузку возможен только за счет изменения расхода топлива. Следовательно, в ПГУ роли ГТУ и ПТ можно конкретизировать следующим образом: ГТУ обеспечивает быстрое изменение интегральной мощности, а паровая турбина за счет аккумулированной энергии барабанов котлов-утилизаторов (КУ) позволяет мгновенно отреагировать на отклонение частоты.

Отличие динамических свойств турбоагрегатов порождает задачу поиска оптимального способа регулирования нагрузки энергоблока ПГУ с учетом характеристик маневренности, экономичности и надежности работы оборудования.

В выпущенном в 2012 г. стандарте [1] о привлечении ПГУ к нормированному первичному регулированию

нию частоты (НПРЧ) прописаны следующие ключевые требования:

- резерв первичного регулирования блока ПГУ должен составлять не менее 5% от верхней границы регулировочного диапазона;
- начало оказания услуг по нормированному первичному регулированию частоты (НПРЧ) — не позднее 5 с;
- изменение мощности на  $\pm 5\%$  от  $N_{\text{ном}}$  — не позднее чем за 30 с, а на  $\pm 10\%$  — не позднее чем за 120 с.

Известно, что проведение исследований на работающем объекте сопровождается рядом сложностей, связанных в первую очередь с вмешательством в технологический процесс. Эксперимент может с легкостью снизить надежность оборудования, нарушить безопасность его работы, вызвать срабатывание защит и блокировок и дальнейшую аварийную остановку установки. Один из возможных путей решения задачи без нанесения ущерба для самого объекта — использование моделей технологического процесса и оборудования, реализованных в тренажерах [2].

Для изучения переменных режимов работы ПГУ при различных внешних условиях эксплуатации был взят полномасштабный компьютерный тренажер энергоблока ПГУ-450Т Калининградской ТЭЦ-2, разработанный ЗАО «Тренажеры для электростанций» [3]. Упрощенная тепловая схема ПГУ-450Т изображена на рис. 1.

Применительно к ПГУ-450, минимальная скорость нагружения/разгружения для удовлетворения требований системного оператора первые 30 с должна быть не менее 45 МВт/мин, последующие 1,5 мин — 15 МВт/мин.

Исследование динамики ПГУ-450 на тренажере показали, что суммарная скорость изменения мощности блока равна 23,9 МВт/мин с соблюдением ограничений завода-изготовителя газовой турбины (скорость изменения нагрузки не должна превышать 11 МВт/мин). Данной скорости на участке изменения мощности  $\pm 5\%$  от  $N_{\text{ном}}$  недостаточно для участия ПГУ в нормированном первичном регулировании. Проведенные расчеты и испытания сотрудниками ОАО «ВТИ» показали, что в начале переходного процесса из-за большой аккумуляции тепла металлом со сравнительно высокими постоянными времени возможны значительно большие скорости изменения мощности (27...28 МВт/мин) до достижения предельно допустимых напряжений в критических деталях [4]. Однако не следует пренебрегать

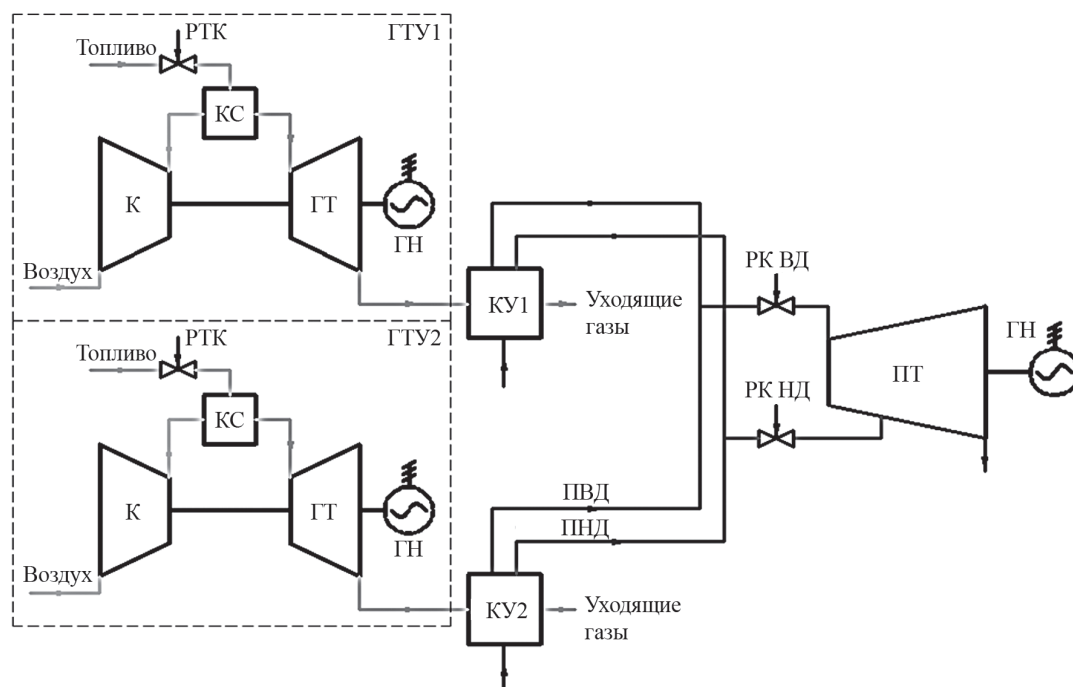


Рис. 1. Упрощенная тепловая схема ПГУ 450Т:

ГТУ1, ГТУ2 — газотурбинные установки; РТК — регулирующий топливный клапан; КС — камера сгорания; К — компрессор; ГТ — газовая турбина; ГН — газодынный подогреватель низкого давления; КУ1, КУ2 — котлы-утилизаторы; РКВД, РКНД — регулирующие клапаны высокого и низкого давления; ПТ — паровая турбина

ограничениями для сохранения гарантийного обслуживания и надежности работы оборудования.

Идея управления мощностью большинства бинарных дублируемых ПГУ сводится к основному воздействию на регулятор мощности ГТ, а система управления паровой турбиной контролирует давление острого пара по принципу «до себя» или положение регулирующих клапанов.

Применяемый в целях исследования возможности привлечения энергоблоков ПГУ к НПРЧ полномасштабный компьютерный тренажер ПГУ-450 обладает одним небольшим недостатком — из-за высокой сложности моделирования взаимодействия работы с энергосистемой отсутствуют внешние возмущения по частоте, в том числе и с помощью корректора частоты. Указанный недостаток можно легко сгладить, приняв во внимание, что статическая характеристика турбоагрегата является настроечным параметром. Тогда отклик изменения мощности на отклонение частоты при участии энергоблока в НПРЧ моделируется за счет простого регулирования мощности, не привязываясь к величине отклонения частоты.

Для сравнения систем управления мощностью выбраны два способа регулирования нагрузки.

Первый способ выполняется за счет ГТУ, а ПТ работает на скользких параметрах пара при полностью открытых регулирующих клапанах. Он наиболее экономичен для ПТ и на сегодняшний день реализован для ПГУ с высокотемпературными турбинами [4, 5].

Его особенность заключается в том, что при уменьшении частоты требуется обеспечить больший резерв мощности газовых турбин, чья верхняя граница рабочего диапазона определяется температурой наружного воздуха, а КПД на частичных нагрузках снижается. Он может также применяться с частично открытыми клапанами. Тогда отклонение частоты, как правило, в пределах  $\pm 50$  мГц, подавляется благодаря регулирующим клапанам ПТ [4 — 9].

По технологии второго способа, предлагаемого авторами, реакция энергоблока ПГУ на отклонение частоты сети максимально возможно воспринимается паровой турбиной, а ГТУ работают в стерегущем режиме и помогают ПТ скомпенсировать отклонение частоты в энергосистеме.

Исследование системы управления мощностью ПГУ с целью получения информации велось для четырех исходных нагрузок: 360, 375, 390 и 405 МВт. Выбор четырех значений базовой мощности обоснован с точки зрения экономичности (работа блока ПГУ предпочтительна до снижения КПД установки на 5% от номинального значения) и учетом проверки выполнения требований системного оператора по возможности набора мощности ПГУ  $\pm 10\%$  от  $N_{\text{ном}}$  (45 МВт для ПГУ-450).

Исходя из огромного влияния температуры наружного воздуха на показатели и работу ПГУ, выбраны следующие температуры [6, 7]:

- $+15$  °С — для анализа расчетных внешних условий;

- $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  — ниже нее максимальная мощность ПГУ-450 остается постоянной;
- $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  — промежуточная точка.

Моделирование работы системы автоматического управления мощностью (САУМ) ПГУ при участии ее в регулировании частоты энергосистемы за счет газовых турбин на тренажере ПГУ-450 дало следующие результаты.

Типовой график изменения первичной мощности ПГУ за счет газовых турбин при снижении и повышении частоты в сети представлен на рис. 2 (в соответствии с требованиями системного оператора линией 3 ограничена область требуемой первичной мощности

ПГУ, а линией 4 показано допустимое отклонение в 1% от  $N_{\text{ном}}$ ).

Тренды мощности турбоагрегатов ПГУ во время нагружения и разгружения при температуре наружного воздуха  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и базовой нагрузке энергоблока 405 МВт изображены на рис. 3, 4.

Высокая инерционность паровой турбины вынуждает всю необходимую мощность, для исключения отклонения частоты в энергосистеме, покрывать за счет ГТУ. При этом первые 30 с ГТЭ-160 работает с превышением скорости, ограниченной заводом-изготовителем.

Если блок, следуя диспетчерскому графику, работает на нагрузке 405 МВт, то при снижении частоты (на-

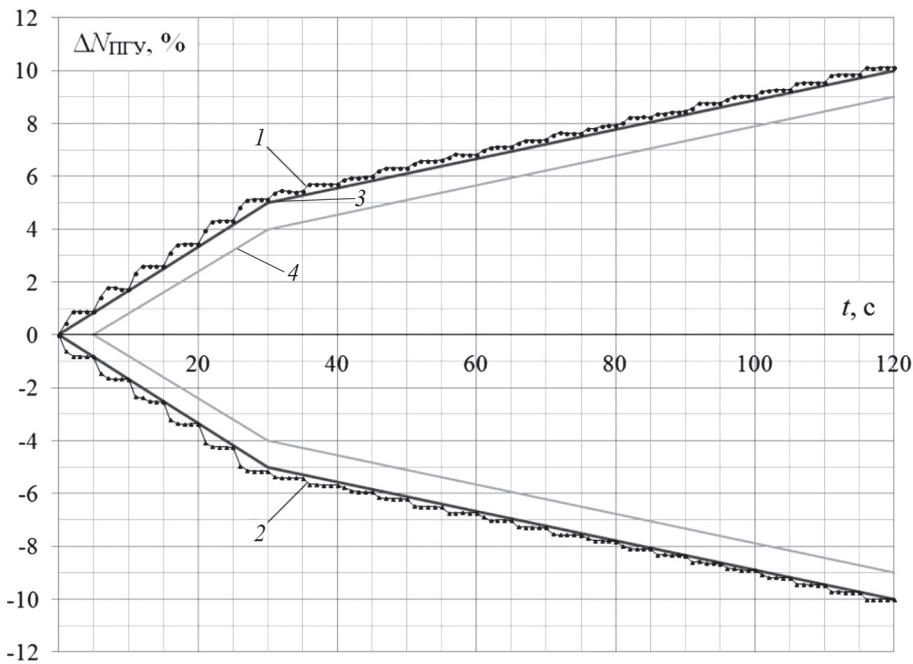


Рис. 2. Изменение первичной мощности ПГУ за счет газовых турбин при снижении (1) и повышении (2) частоты в энергосистеме (способ 1). Линией 3 ограничена область требуемой первичной мощности ПГУ, линией 4 — допустимое отклонение в 1% от  $N_{\text{ном}}$

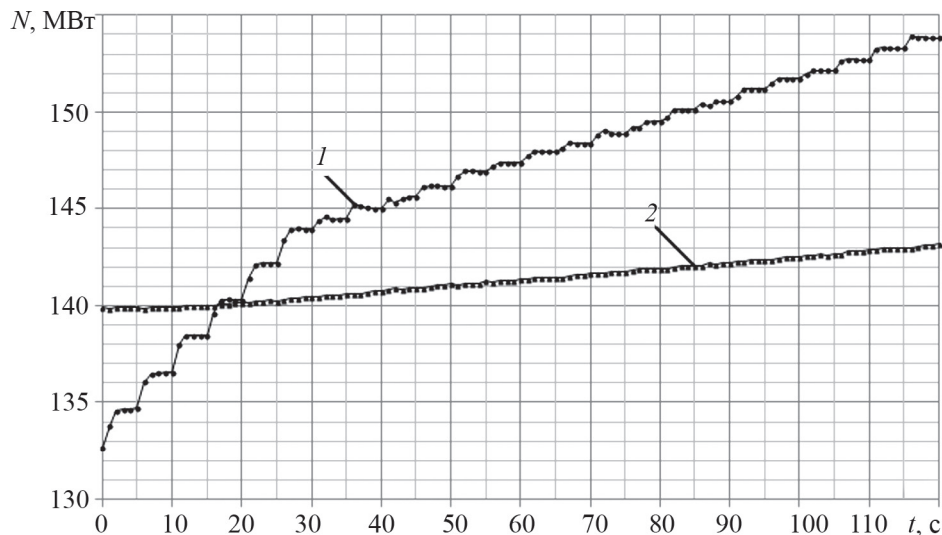


Рис. 3. Изменение мощности газовой (1) и паровой (2) турбин при нагружении энергоблока (способ 1)

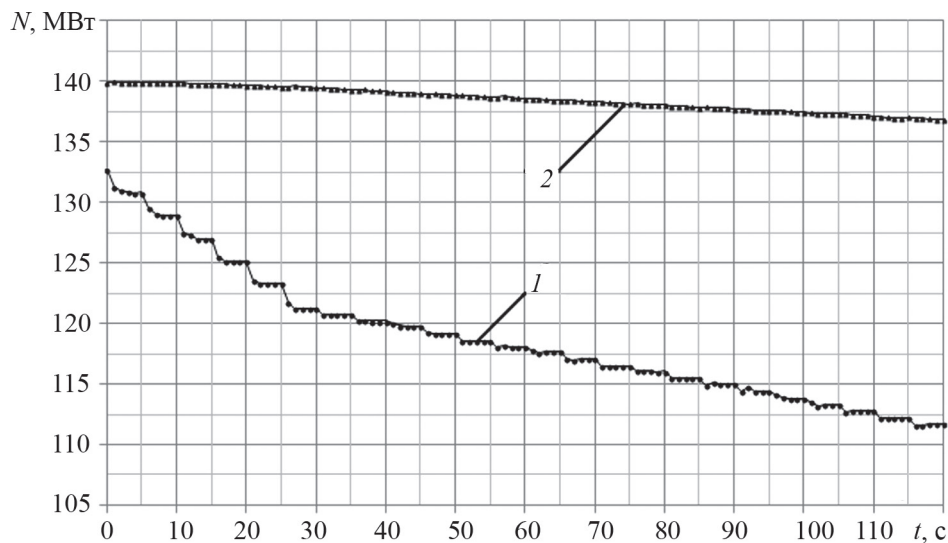


Рис. 4. Изменение мощности газовой (1) и паровой (2) турбин при разгрузке энергоблока (способ 1)

грузке энергоблока на 10% от  $N_{\text{ном}}$ ) газовым турбинам приходится выходить на максимальную мощность.

Моделирование процесса регулирования частоты энергосистемы за счет максимального привлечения паровой турбины приводит к нескольким иным результатам.

Согласно правилам технической эксплуатации при возмущении со стороны энергосистемы по частоте, турбоагрегат обязан незамедлительно отреагировать на внешнее воздействие посредством органов регулирования частоты вращения вала турбины.

Наибольшие проблемы возникают с увеличением необходимой скорости изменения нагрузки ГТУ. Это связано с тем, что для поддержания температуры дымовых газов на выходе газовой турбины расходы топлива и воздуха должны изменяться синхронно, поэтому в целях обеспечения надежности скорость воздействия на задатчики мощности ГТУ ограничивают.

Минимальная скорость набора мощности ГТУ при отклонении частоты в сети — 0,1 МВт/мин, а при разгрузке — 1,5 МВт/мин. Различие в скоростях обусловлено надежностью входных коллекторов газового тракта котла-утилизатора и объясняется тепловосприятием поверхностей нагрева.

Отклонение частоты, требующее нагружения энергоблока на 10%  $N_{\text{ном}}$ , вызывает изначальное чрезмерное прикрытие регулирующего клапана паровой турбины, что приводит к экономическим потерям из-за малого коэффициента дросселирования. Следовательно, выбор исходного положения клапана основывается на покрытии паровой турбиной самой крутой части графика (увеличении мощности ПГУ на 5% от  $N_{\text{ном}}$ ).

В ходе экспериментов на тренажере ПГУ-450 для различных температур наружного воздуха и базовых нагрузок исходное положение регулирующего клапана высокого давления (РК ВД) установлено на уровне 69%.

Разгрузка энергоблока ведется за счет прикрытия РК ВД ПТ и разгрузки ГТУ1 и ГТУ2 со скоро-

стью 1,5 МВт/мин, что соответствует требованиям системного оператора.

Типовой график изменения первичной мощности ПГУ за счет газовых турбин при снижении и повышении частоты в сети представлен на рис. 5. Графики мощности ГТУ и ПТУ во время нагружения и разгрузки энергоблока с базовой нагрузкой 405 МВт при температуре наружного воздуха 15°C даны на рис. 6, 7.

Для четырех выбранных нагрузок энергоблока (360, 375, 390, 405 МВт) и трех температур наружного воздуха (+15, +5, -10 °C) результаты исследования показали, что при нагружении время полного хода исполнительного механизма (ИМ) РК ВД ПТ составляет 96,8 с. Равномерное открытие регулирующего клапана позволяет покрыть 5% от номинальной мощности ПГУ. Данные разгрузки ПГУ с максимальным привлечением ПТ приведены в таблице.

Таким образом, отметим низкую чувствительность перемещения регулирующего клапана как во время нагружения, так и разгрузки к вариации исходной нагрузки и температуре наружного воздуха, что должно облегчить наладку системы регулирования мощности.

Моделирование работы САУМ ПГУ при участии ее в регулировании частоты и мощности энергосистемы с преимущественным влиянием паровой турбины на тренажере ПГУ-450 проходило при следующих условиях:

- устанавливалась температура наружного воздуха и исходная нагрузка энергоблока;
- регулирующий клапан высокого давления отключался от системы поддержания давления «до себя» и переводился в исходную позицию, обеспечивая необходимый резерв по мощности;
- регулирующие топливные клапаны ГТУ1 и ГТУ2 отсоединялись от автоматической системы регулирования мощности газовых турбин и переводились в ручной режим управления;

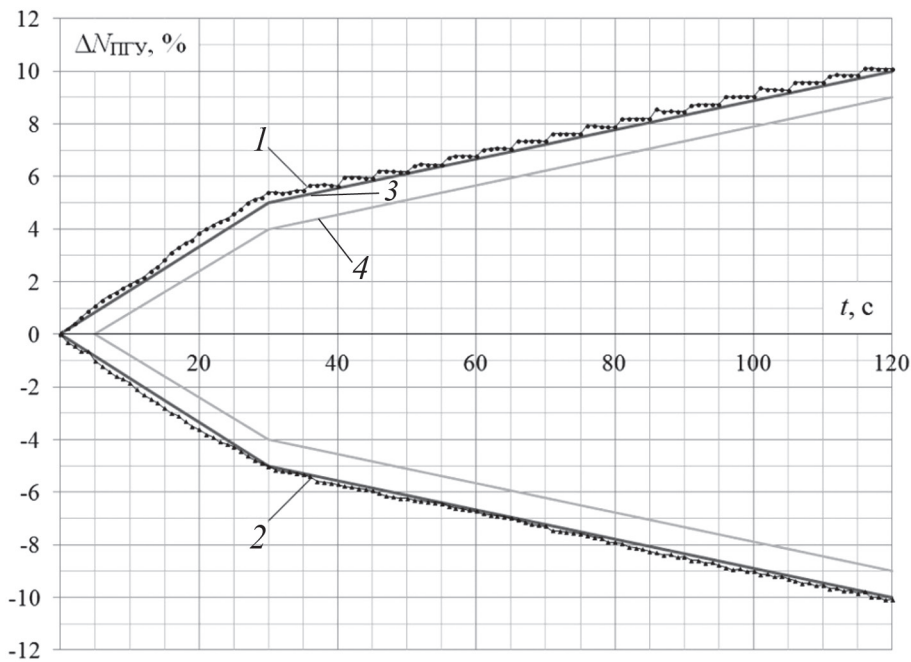


Рис. 5. Типовое изменение первичной мощности ПГУ с максимальным привлечением паровой турбины в регулировании частоты при ее снижении (1) и повышении (2) в энергосистеме (способ 2). Линией 3 ограничена область требуемой первичной мощности ПГУ, линией 4 — допустимое отклонение в 1% от  $N_{\text{ном}}$

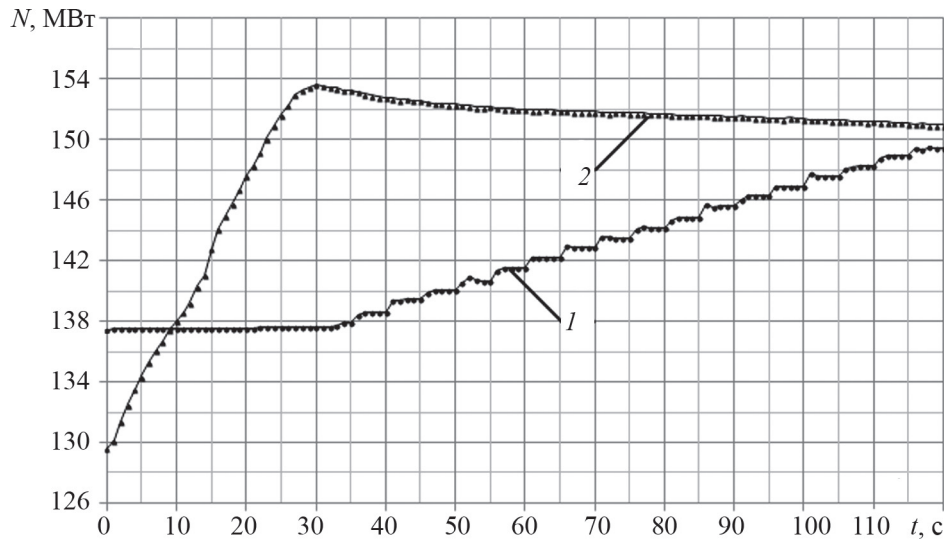


Рис. 6. Изменение мощности газовой (1) и паровой (2) турбин при нагружении энергоблока (способ 2)

- локальные системы управления ГТУ, КУ и ПТУ со всеми защитами и блокировками работали в штатном режиме.

В качестве примера на рис. 8 для барабана высокого давления КУ даны графики изменения уровня воды и давления пара высокого давления на выходе из барабана при моделировании участка ПГУ в НПРЧ (нагружение с 390 МВт на 10% от  $N_{\text{ном}}$  при температуре окружающего воздуха +15 °С). Из графиков рис. 8 следует, что указанные параметры находятся в допустимых пределах.

Проведенное моделирование доказывает высокую маневренность паровой турбины, благодаря которой

можно пройти наиболее сложные участки требований системного оператора к скорости и величине изменения нагрузки ПГУ при ее участии в НПРЧ без нарушения требований завода-изготовителя ГТЭ-160.

Использование аккумулированного тепла в барабанах высокого давления котлов-утилизаторов экономически эффективно, поскольку при нагружении расход топлива на газовую турбину остается постоянным, а при разгрузке КПД ГТУ снижается незначительно.

Весомым аргументом в пользу предложенного метода стали успешные сертифицированные испытания

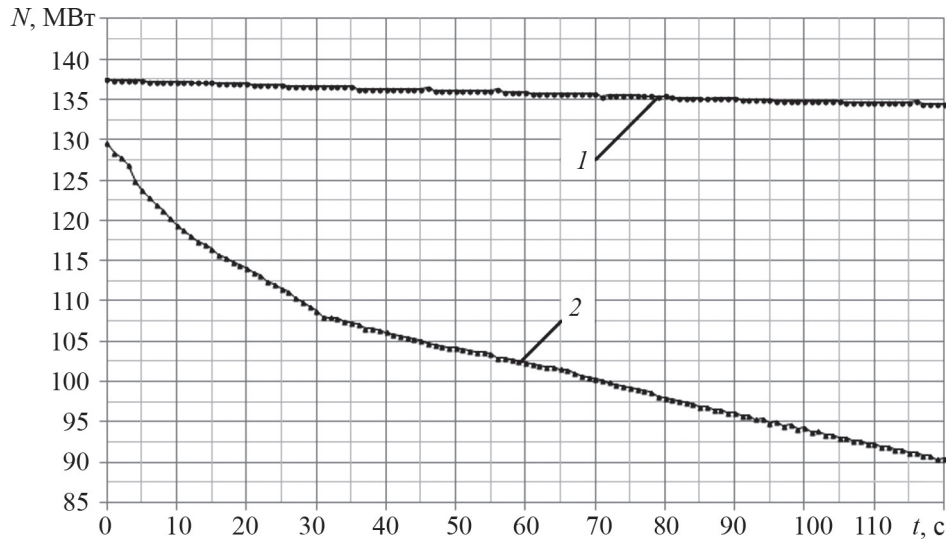


Рис. 7. Изменение мощности газовой (1) и паровой (2) турбин при разгрузке энергоблока (способ 2)

**Результаты моделирования САУМ ПГУ при повышении частоты в сети**

Температура наружного воздуха, $t_{\text{нв}}$ , °С	Характеристика	Исходная нагрузка, МВт				Среднее значение
		360	375	389	405	
15	Время полного хода ИМ РК ВД за 30 с, с	44,50	43,40	43,40	44,50	44,00
	Положение РК ВД после 30 с, %	55,66	55,97	55,97	55,65	55,81
	Время полного хода ИМ РК ВД за 30...120 с, с	23,10	23,90	23,50	22,60	23,30
	Положение РК ВД после 120 с, %	48,72	48,80	48,91	48,88	48,83
5	Время полного хода ИМ РК ВД за 30 с, с	41,70	43,60	43,40	41,80	42,60
	Положение РК ВД после 30 с, %	56,48	55,94	55,98	56,45	56,21
	Время полного хода ИМ РК ВД за 30...120 с, с	26,20	23,80	23,90	24,90	24,70
	Положение РК ВД после 120 с, %	48,62	48,80	48,80	48,99	48,80
-10	Время полного хода ИМ РК ВД за 30 с, с	45,60	43,50	43,50	43,70	44,10
	Положение РК ВД после 30 с, %	55,33	55,95	55,95	55,90	55,78
	Время полного хода ИМ РК ВД за 30...120 с, с	24,90	24,90	24,30	23,40	24,40
	Положение РК ВД после 120 с, %	47,85	48,49	48,65	48,87	48,47

парогазовых блоков на станциях № 1 ТЭЦ-12 Мосэнерго и Кировской ТЭЦ-3 в части НПРЧ, проводимые ОАО «ВТИ» по технологии упреждающего воздействия на паровую турбину [10]. Результаты испытаний показали, что энергоблоки полностью соответствуют требованиям стандарта [11].

Немаловажным является и тот факт, что в предлагаемой технологии скорость изменения нагрузки газовых турбин не превышает скорости, регламентированной заводом-изготовителем, что положительно влияет на долгосрочную надежность ГТУ [12].

Таким образом, анализ результатов моделирования процесса регулирования частоты энергосистемы за счет максимального привлечения паровой турбины ПГУ-450 в начальные моменты изменения мощности

показал техническую состоятельность данной технологии как при снижении, так и при увеличении частоты в энергосистеме.

Техническая целесообразность активного привлечения паровой турбины ПГУ к регулированию частоты путем упреждающего воздействия на паровую турбину обусловлена высокой маневренностью паровой турбины за счет значительной аккумулирующей способности барабанов котла.

Экономическая эффективность предлагаемой технологии привлечения ПГУ к регулированию частоты энергосистемы обусловлена незначительным изменением КПД как ПТ, так и ГТУ при изменениях нагрузки в требуемых пределах изменения мощности.

Мощность ПГУ, МВт

Давление, МПа

Уровень, мм

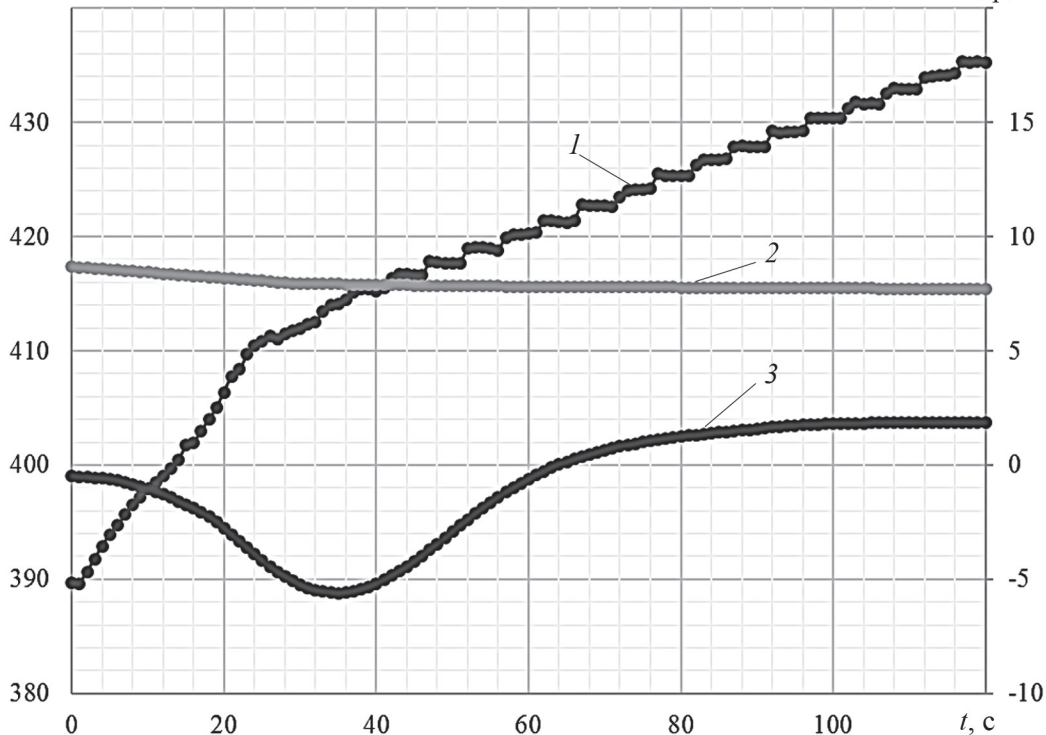


Рис. 8. Процесс моделирования участия ПГУ в НПРЧ:

1 — мощность ПГУ; 2 — давление в паропроводе ВД; 3 — уровень в барабане КУ ВД

## Литература

## References

1. **СТО 59012820.27.100.004—2012.** Нормы участия парогазовых установок в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности.

2. **Аракелян Э.К., Андрияшин А.В., Бурцев С.Ю.** Использование компьютерных тренажеров для проведения модельных исследований в энергетике // Вестник МЭИ. 2015. № 2. С. 50—55.

3. **Обуваев А.С.** Разработка и исследование аналитической модели энергоблока ПГУ-450: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2011.

4. **Радин Ю.А.** Исследование и улучшение маневренности парогазовых установок: дис. ... докт. техн. наук. М.: Всерос. теплотехн. науч.-исслед. ин-т, 2013.

5. **Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.** Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010.

6. **Муравьев И.К., Тверской Ю.С.** Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбин энергоблока с ПГУ // Автоматизация в промышленности. 2016. № 1. С. 53—57.

1. **СТО 59012820.27.100.004—2012.** Normy Uchastiya Parogazovykh Ustanovok v Normirovannom Per-vichnom Regulirovanii Chastoty i Avtomaticheskome Vto-richnom Regulirovanii Chastoty i Peretokov Aktivnoy Moshchnosti. (in Russian).

2. **Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Burtsev S.Yu.** Ispol'zovanie Komp'yuternykh Trenazherov dlya Provedeniya Model'nykh Issledovaniy v Energetike. Vestnik MEI. 2015;2:50—55. (in Russian).

3. **Obuvaev A.S.** Razrabotka i Issledovanie Analiticheskoy Modeli Energobloka PGU-450: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: MEI, 2011. (in Russian).

4. **Radin Yu.A.** Issledovanie i Uluchshenie Manevrennosti Parogazovykh Ustanovok: Dis. ... Dokt. Tekhn. Nauk. M.: Vseros. Teplotekh. Nauch.-issled. In-t, 2013. (in Russian).

5. **Vaynshteyn R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V.** Osnovy Upravleniya Rezhimami Energosistem po Chastote i Aktivnoy Moshchnosti, po Napryazheniyu i Reaktivnoy Moshchnosti. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politekh. Un-ta, 2010. (in Russian).

6. **Murav'ev I.K., Tverskoy Yu.S.** Issledovanie na Matematicheskoy Modeli Effektivnosti Sovmestnoy Raboty Gazovoy i Parovoy Turbin Energobloka s PGU. Avtomatizatsiya v Promyshlennosti. 2016;1:53—57. (in Russian).



7. Тверской Ю.С., Муравьев И.К. Регулирование расхода воздуха в компрессоре газотурбинных установок бинарного энергоблока при изменяющихся климатических условиях // Энергетик. 2017. № 2. С. 49—51.

8. Радин Ю.А. Влияние типа парораспределения паровых турбин ПГУ на эффективность их эксплуатации // Теплоэнергетика. 2012. № 9. С. 58—62.

9. Ackenheil R., Zaviska O. Primary Frequency Control for Combined Cycle Power Plants // VGB Power Techn. 2006. No. 3. Pp. 76—78.

10. Пат. № 2361092 РФ. Система автоматического регулирования мощности парогазовой установки с воздействием на регулирующие органы газотурбинной установки и паровой турбины / Н.И. Давыдов, Н.В. Зорченко, Н.Д. Александрова // Бюл. Изобрет. 2009. № 19.

11. СТО 59012820.27.100.004—2016. Нормы участия парогазовых и газотурбинных установок в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности.

12. Радин Ю.А., Которович Т.С. Использование принципа эквивалентной наработки для оценки надежности оборудования ПГУ // Электрические станции. 2012. № 1. С. 16—18.

7. Tverskoy Yu.S., Murav'ev I.K. Regulirovanie Raskhoda Vozdukha V Kompessore Gazoturbinykh Ustanovok Binarnogo Energobloka Pri Izmenyayushchikhsya Klimaticheskikh Usloviyakh. Energetik. 2017;2:49—51. (in Russian).

8. Radin Yu.A. Vliyanie Tipa Paroraspredeleniya Parovykh Turbin PGU na Effektivnost' Ikh Eksploatatsii. Teploenergetika. 2012;9:58—62. (in Russian).

9. Ackenheil R., Zaviska O. Primary Frequency Control for Combined Cycle Power Plants. VGB Power Techn. 2006;3:76—78.

10. Pat. № 2361092 RF. Sistema Avtomaticheskogo Regulirovaniya Moshchnosti Parogazovoy Ustanovki s Vozdeystviem na Reguliruyushchie Organy Gazoturbinoynoy Ustanovki i Parovoy Turbiny. N.I. Davydov, N.V. Zorchenko, N.D. Aleksandrova. Byul. Izobret. 2009; 19. (in Russian).

11. STO 59012820.27.100.004—2016. Normy Uchastiya Parogazovykh i Gazoturbinykh Ustanovok v Normirovannom Pervichnom Regulirovanii Chastoty i Avtomaticheskome Vtorichnom Regulirovanii Chastoty i Peretokov Aktivnoy Moshchnosti. (in Russian).

12. Radin Yu.A., Kontorovich T.S. Ispol'zovanie Printsipa Ekvivalentnoy Narabotki dlya Otsenki Nadezhnosti Oborudovaniya PGU. Elektricheskie stantsii. 2012;1:16—18. (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

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

**Burtsev Svyatoslav Yu.** — Senior Researcher of All-Russian Research Institute of Physical-technical and Radio engineering Measurements, e-mail: BurtsevSY@yandex.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 31.03.2018

**The article received to the editor:** 31.03.2018