

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.10>**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКА ПГУ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБВОДНОГО ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ПАРОВОЙ ТУРБИНЕ**

Научная статья

Москаленко А.Б.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-8156-2982;¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aleksandr.moskalenko1[at]gmail.com)

Аннотация

Необходимость участия парогазовых установок (ПГУ) в первичном регулировании частоты тока, приводит к эксплуатации энергоблоков на пониженной нагрузке со сниженным КПД. В данной работе рассмотрено влияние темпа роста стоимости топлива и отпускного тарифа на электроэнергию, а также режима работы парогазовой установки на её основные экономические показатели на примере энергоблока ПГУ-325 с учетом участия в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме. Проведено сравнение рассматриваемых показателей при применении обводного и дроссельного парораспределения на паровой турбине. В результате исследования получено, что отставание темпа роста отпускного тарифа от стоимости топлива и снижение времени работы энергоблока приводит к существенному ухудшению экономических показателей. При этом применение обводного парораспределения на паровой турбине приводит к большей экономической эффективности в любом из рассмотренных вариантов.

Ключевые слова: парогазовая установка, паровая турбина, обводное парораспределение, частота тока, энергосистема.

STUDY OF ECONOMIC EFFICIENCY OF THE POWER GENERATION UNIT OF THE CCGT USING A BYPASS STEAM DISTRIBUTION ON THE STEAM TURBINE

Research article

Moskalenko A.B.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-8156-2982;¹ Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

* Corresponding author (aleksandr.moskalenko1[at]gmail.com)

Abstract

Necessity of participation of combined cycle plants (CCPPs) in primary regulation of current frequency leads to operation of power units at reduced load with reduced efficiency. In this work the influence of fuel cost growth rate and electricity sales tariff, as well as the operating mode of combined cycle plant on its main economic indicators on the example of CCGT-325 power unit with regard to participation in the primary regulation of current frequency in the power system is studied. Comparison of the examined indices at application of bypass and throttling steam distribution at a steam turbine was carried out. As a result of the study, it was obtained that the lag of growth rate of selling tariff from the cost of fuel and reduction of power unit operation time leads to significant deterioration of economic indicators. At the same time, application of bypass steam distribution on the steam turbine leads to higher economic efficiency in any of the considered variants.

Keywords: combined cycle gas turbine, steam turbine, bypass steam distribution, current frequency, power system.

Введение

На основе нормативного документа системного оператора Единой энергетической системы России (ЕЭС РФ), энергоблоки всех типов, кроме энергоблоков с реакторами большой мощности канальными и с реакторами на быстрых нейтронах, должны принимать участие в регулировании частоты тока в энергосистеме [1].

ПГУ проектировались для несения базовой нагрузки, однако фактические режимы их эксплуатации оказались отличными от базовых, что негативно сказывается на их термодинамической и технико-экономической эффективности [2], [3].

При скачкообразном отклонении частоты тока за пределы «мертвой полосы» первичного регулирования, вызывающем необходимость реализации первичной мощности (на загрузку или разгрузку) величиной 5% от номинальной мощности энергоблока и менее в пределах регулировочного диапазона, ПГУ должна гарантированно обеспечивать динамику изменения первичной мощности не хуже следующей: 5% $P_{ном}$ – за 30 с. При скачкообразном отклонении частоты за пределы «мертвой полосы» первичного регулирования, вызывающем необходимость реализации первичной мощности более 5% номинальной мощности энергоблока, ПГУ должна гарантированно в пределах регулировочного диапазона выдать 10% номинальной мощности генерирующего оборудования за 2 мин., при этом 5% должно быть обеспечено за первые 30 с [4].

Энергоблоки ПГУ имеют несколько возможных путей обеспечения возможности участия в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме:

- регулирование мощности энергоблока путем изменения нагрузки только газовых турбин, с работой паровой турбины на скользящих параметрах пара. Данный способ возможен только на парогазовых энергоблоках с высокоманевренными газовыми турбинами, так как снижение мощности паровой турбины на скользящих параметрах

пара не является резервом первичной мощности, в связи с большой инерционностью котлов-утилизаторов. Также в данном случае возникает недовыработка электроэнергии из-за снижения вместе с газовыми турбинами мощности паровой турбины, не обеспечивающей резерв первичной мощности;

- одновременное регулирование нагрузки на паровой и газовых турбинах. Данный способ близок к предыдущему варианту, однако отличается тем, что регулирование мощности паровой турбины, достигается частично изменением положения дроссельно-регулирующих клапанов, что позволяет паровой турбине относительно быстро набрать мощность и частично обеспечить резерв первичной мощности. В данном случае меньше недовыработка электроэнергии, однако значительно падает КПД паровой турбины;

- регулирование мощности энергоблока путем изменения мощности только паровой турбины посредством воздействия на её регулирующие клапана с работой газовых турбин на номинальной нагрузке. В данном случае отсутствует недовыработка электроэнергии, однако наблюдается самый низкий КПД в связи с повышением температуры уходящих газов из котлов-утилизаторов и потерями от дросселирования в паровой турбине.

Для эффективного участия парогазовых установок в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме возможно применение обводного парораспределения на паровой турбине.

При обводном парораспределении реализуется подвод пара через дроссельно-регулирующие клапана в голову турбины и в одну из промежуточных ступеней части высокого давления. При этом на заранее определенной нагрузке пар подводится только через открытый клапан в голову турбины, а в случае необходимости повышения мощности открывается перегрузочный клапан в промежуточную ступень, что вызывает увеличение расхода пара через проточную часть турбины за счет большего проходного сечения ступеней. Таким образом работа паровой турбины на пониженной нагрузке происходит без потерь от дросселирования пара, что в свою очередь повышает её внутренний относительный КПД. При классическом дроссельном парораспределении пар подводится только в голову турбины, и при снижении нагрузки паровой турбины посредством дросселирования неизбежно происходит снижение внутреннего относительного КПД паровой турбины. Применение обводного парораспределения в условиях необходимости работы ПГУ на пониженной мощности с целью участия в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме обеспечивает повышение внутреннего относительного КПД паровой турбины, что приводит к выработке большей мощности при том же расходе пара, или при удержании энергоблока на прежнем уровне нагрузки к снижению мощности газовых турбин, что влечет за собой снижение расхода топлива и увеличение доли мощности паровой турбины.

Ранее, в работе [5] были проведены исследования термодинамической эффективности применения данного разработанного и запатентованного способа, которые показали его эффективность. Как показали расчеты, при применении стандартной паротурбинной установки (ПТУ) с дроссельным парораспределением абсолютный электрический КПД ПГУ составляет 50,75%, а при использовании обводного парораспределения 51,07%.

Методы и исходные данные исследования

В настоящей работе на примере энергоблока ПГУ-325 проведена оценка следующих экономических показателей: накопленный чистый дисконтированный доход (НЧДД); дисконтированный срок окупаемости (ДСО).

Для расчетов приняты следующие условия:

удельные капиталовложения – 570 \$/кВт [6], при этом 1 долл. – 74 руб.;

срок строительства ПГУ – 2 года;

норма дисконта – 8 %;

расчетный период – 22 года;

штатный коэффициент ПГУ составляет 0,5 чел/МВт [7].

Дисконтирование денежных потоков приведено на момент начала расчетного периода. Принятые значения использованы для определения экономических показателей вариантов энергоблока ПГУ с ПТУ с дроссельным (вариант 1), и с обводным (вариант 2) парораспределением. Основы использованной методики оценки эффективности энергоблоков ПГУ приведены в источнике [8].

Результаты исследования

На начальный период экономических расчетов стоимость топлива принята равной 4950 руб./ тыс. м³ [9]. По данным Института энергетических исследований РАН прогнозная стоимость природного газа к 2040 году будет составлять 9240 руб./тыс. м³, то есть темп роста соответствует 4,1% в год. В таблице 1 представлены экономические показатели исследуемых вариантов энергоблока ПГУ в зависимости от темпа роста отпускного тарифа на электроэнергию (при неизменном отпускном тарифе 2,5 руб./кВт·ч; темп роста тарифа вдвое меньше темпа роста топлива, т.е. 2% в год; темп роста тарифа равен темпу роста стоимости топлива, т.е. 4,1% в год) при условии максимальной загрузки с учетом необходимости участия в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме.

Таблица 1 - Экономические показатели вариантов энергоблока ПГУ с дроссельным / обводным парораспределением паровой турбины в зависимости от темпа роста отпускного тарифа на электроэнергию

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.10.1>

Темп роста отпускного тарифа на электроэнергию, %/год	НЧДД, млн. руб.		ДСО, лет	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
0	1556,6	1806,5	16,1	15,6

В 2 раза ниже темпа роста стоимости топлива, 2	7401,2	7688,3	11,5	11,3
Равен темпу роста стоимости топлива, 4,1	14360,0	14691,3	9,7	9,6

Из таблицы 1 видно, что при любом темпе роста отпускного тарифа на электроэнергию более выгодным является применение на паровой турбине обводного парораспределения, что объясняется отсутствием дросселирования. Также видно, что при максимальном темпе роста отпускного тарифа на электроэнергию получены наиболее высокие экономические показатели.

В ЕЭС РФ ПГУ участвуют в покрытии неравномерности графика электропотребления. В связи с этим было проведено исследование рассматриваемой ПГУ для различных вариантов режима работы: длительность работы на повышенной мощности с учетом участия в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме была проварьирована от 4 до 24 часов в сутки. При этом в остальное время энергоблок разгружается до минимального эффективного уровня 225 МВт. Минимальная нагрузка ГТУ с постоянной температурой газов за турбиной составляет 72 МВт. Дальнейшее разгружение сопровождается снижением температуры уходящих газов, так как на мощности 72 МВт достигается полное прикрытие входного направляющего аппарата. Последующее снижение мощности ГТУ может достигаться только за счет снижения расхода топлива, что приведет к снижению температуры уходящих газов, что в свою очередь увеличивает риск отключения паровой турбины технологической защитой, также будет наблюдаться более сильное снижение КПД газовых турбин [10].

При повышении КПД ПГУ за счет установки обводного парораспределения на ПТУ [5] экономия топлива составляет порядка 0,09 м³/с при работе на режиме повышенной мощности с учетом участия в первичном регулировании частоты тока. На режиме пониженной нагрузки разницы в расходе топлива между рассматриваемыми вариантами не наблюдается, так как энергоблоки разгружаются как правило с работой паровой турбины на скользящих параметрах пара, что не приводит к отличиям в КПД рассматриваемых паровых турбин.

На рисунке 1 представлен график зависимости годовой экономии топлива от числа часов работы на повышенном режиме в сутки.

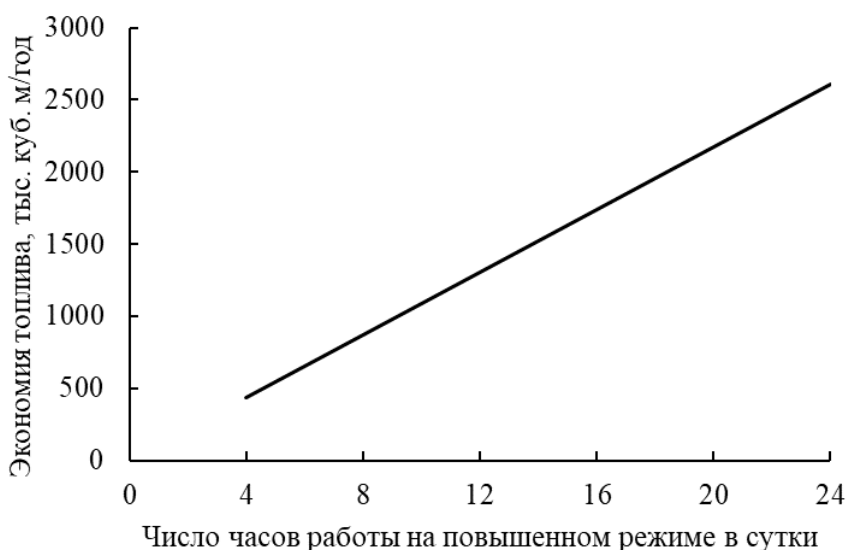


Рисунок 1 - Зависимость годовой экономии натурального топлива от применения обводного парораспределения на паровой турбине от числа часов работы на повышенном режиме
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.10.2>

Из рисунка 1 видно, что максимальная годовая экономия топлива достигается при максимальном времени работы на повышенном режиме в сутки.

Для оценки экономической эффективности эксплуатации энергоблока ПГУ с применением обводного парораспределения на паровой турбине в реальной энергосистеме определены и сведены в таблицу 2 экономические показатели в зависимости от числа часов работы на повышенной мощности в сутки. Как было сказано ранее, минимальная нагрузка энергоблока в расчетах составляет 225 МВт, при этом энергоблок эксплуатируется 335 дней в год. Стоимость топлива на начало расчетного периода принята 4950 руб./тыс. куб. м. Рост цены на топливо и тарифа на электроэнергию принят равным 4,1% в год, а отпускной тариф на электроэнергию на начало расчетного периода равен 2,5 руб./кВт·ч.

Таблица 2 - Экономические показатели вариантов энергоблока ПГУ с ПТУ с дроссельным и обводным парораспределением

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.124.10.3>

Время работы в сутки на повышенной мощности, ч	НЧДД, млн. руб.		ДСО, лет	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
4	7350,6	7405,8	13,1	13,1
8	8752,5	8862,9	12,2	12,1
12	10154,4	10320,0	11,4	11,4
16	11556,2	11777,1	10,8	10,7
20	12958,1	13234,2	10,2	10,1
24	14360,0	14691,3	9,7	9,6

Из таблицы 2 видно, что максимальная экономическая эффективность достигается при работе станции 24 часа в сутки на повышенном режиме, т.е. работе энергоблока в базовой части графика электрических нагрузок. В свою очередь снижение времени работы на повышенном режиме в сутки приводит к снижению экономических показателей, однако в любом из рассмотренных режимов работы применение на паровой турбине обводного парораспределения более выгодно относительно эксплуатации паровой турбины с дроссельным парораспределением.

Заключение

При эксплуатации энергоблоков ПГУ значительное влияние на их экономические показатели оказывает стоимость топлива, режим их работы и темп роста отпускного тарифа на электроэнергию. При прогнозном темпе роста стоимости топлива без повышения отпускного тарифа на электроэнергию происходит резкое снижение накопленного чистого дисконтированного дохода и увеличение дисконтированного срока окупаемости. При одинаковом темпе роста отпускного тарифа на электроэнергию и на топливо наблюдается максимальная экономическая эффективность. В свою очередь работа в базовой части графика электрических нагрузок на максимальной мощности с учетом требований к участию в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме приводит к наилучшим экономическим показателям. При снижении времени работы на повышенном режиме в сутки они снижаются. Во всех рассмотренных режимах применение на паровой турбине обводного парораспределения оказывается более выгодным относительно использования стандартной турбины с дроссельным парораспределением.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90181

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was carried out with the financial support of the RFBR in the framework of scientific project No. 20-38-90181

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Гариевский М.В. Повышение эффективности ПГУ в переменных режимах на основе учета ресурсных показателей дис. ...канд. null: 05.14.01 : защищена 2021-12-22 : утв. 2022-03-29 / М.В. Гариевский – Саратов: 2021. – 139 с.
2. Радин Ю.А. Влияние типа парораспределения паровых турбин ПГУ на эффективность их эксплуатации. / Ю.А. Радин // Теплоэнергетика. – 2012. – № 9. – с. 58-62.
3. Радин Ю.А. Ограничения регулировочного диапазона нагрузок энергоблока ПГУ-325. / Ю.А. Радин, М.С. Фролов // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – № 1. – с. 53-59.
4. Радин Ю.А. Определение допустимого регулировочного диапазона нагрузок энергоблока ПГУ-450Т при работе в конденсационном режиме. / Ю.А. Радин, А.В. Давыдов, А.В. Чугин и др. // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – с. 47-52.
5. Аминов Р.З. Оценка эффективности использования паровых турбин с обводным парораспределением при участии в первичном регулировании частоты тока в энергосистеме. / Р.З. Аминов, А.Б. Москаленко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 5. – с. 9-17.

6. Аминов Р.З. Эффективность работы парогазовых ТЭЦ при переменных электрических нагрузках с учетом износа оборудования. / Р.З. Аминов, М.В. Гариевский // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – № 20. – с. 10-22.
7. СТО 59012820.27.100.003-2012. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России. Нормы и требования (в редакции изменения, введенного в действие приказом ОАО «СО ЕЭС» от 29.07.2014 № 201). Утв. 05.12.2012.
8. 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 Утв. 13.09.2016.
9. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН–Московская школа управления Сколково – Москва, 2019. – 210 с.
10. Gas Turbine World Handbook. – Pequot Publishing Inc, 2012. – Vol. 29. – 148 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Garievskij M.V. Povyshenie e'ffektivnosti PGU v peremenny'x rezhimakh na osnove ucheta resursny'x pokazatelej [Improving the Efficiency of CCGT in Variable Modes Based on Accounting for Resource Indicators] dis...of PhD in Engineering: 05.14.01 : defense of the thesis 2021-12-22 : approved 2022-03-29 / М.В. Гариевский – Saratov: 2021. – 139 p. [in Russian]
2. Radin Yu.A. Vliyanie tipa paroraspredeleniya parovy'x turbin PGU na e'ffektivnost' ix e'kspluatatsii [The influence of the type of steam distribution in steam turbines of combined-cycle plants on the effectiveness of their operation]. / Yu.A. Radin // Teploe'nergetika [Thermal Engineering]. – 2012. – № 9. – p. 58-62. [in Russian]
3. Radin Yu.A. Ogranicheniya regulirovochnogo diapazona nagruzok e'nergobloka PGU-325 [Limitations of the adjustment range of loads of the CCGT-325 power unit]. / Yu.A. Radin, M.S. Frolov // Nadezhnost' i bezopasnost' e'nergetiki [Reliability and security of energy]. – 2017. – № 1. – p. 53-59. [in Russian]
4. Radin Yu.A. Opredelenie dopustimogo regulirovochnogo diapazona nagruzok e'nergobloka PGU-450T pri rabote v kondensacionnom rezhime [Determining the permissible load-control range of a PGU-450T power-generating unit operating in a condensing mode]. / Yu.A. Radin, A.V. Davy'dov, A.V. Chugin et al. // Teploe'nergetika [Thermal Engineering]. – 2004. – № 5. – p. 47-52. [in Russian]
5. Aminov R.Z. Ocenka e'ffektivnosti ispol'zovaniya parovy'x turbin s obvodny'm paroraspredeleniem pri uchastii v pervichnom regulirovanii chastoty' toka v e'nergosisteme [Evaluation of the efficiency of using steam turbines with bypass steam distribution with participation in the primary regulation of the current frequency in the power system]. / R.Z. Aminov, A.B. Moskalenko // E'nergo bezopasnost' i e'nergo berezhenie [Energy security and energy saving]. – 2021. – № 5. – p. 9-17. [in Russian]
6. Aminov R.Z. E'ffektivnost' raboty' parogazovy'x TE/Cz pri peremenny'x e'lektricheskix nagruzkax s uchetom iznosa oborudovaniya [Efficiency of operation of combined-cycle CHPPs under variable electrical loads, taking into account equipment wear and tear]. / R.Z. Aminov, M.V. Garievskij // Izvestiya vy'sshix uchebny'x zavedenij. Problemy' e'nergetiki [News of higher educational institutions. Energy problems]. – 2018. – № 20. – p. 10-22. [in Russian]
7. СТО 59012820.27.100.003-2012. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЕЭС России. Нормы и требования (в редакции изменения, введенного в действие приказом ОАО "СО ЕЕЭС" от 29.07.2014 № 201) [STO 59012820.27.100.003-2012. Regulation of Frequency and Active Power Flows in UES of Russia. Norms and Requirements (as amended and put into effect by Order of JSC SO UES No. 201 of 29.07.2014)] Approved on 05.12.2012. [in Russian]
8. 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 [Standards for participation of combined cycle and gas turbine units in normalized primary frequency regulation and automatic secondary frequency regulation and active power flows] Approved on 13.09.2016. [in Russian]
9. Prognoz razvitija jenergetiki mira i Rossii 2019 [Energy Forecast of the World and Russia 2019] / ed. by A.A. Makarova, T.A. Mitrovoj, V.A. Kulagina; INJeI RAN–Skolkovo Moscow School of Management, 2019. – 210 p. [in Russian]
10. Gas Turbine World Handbook. – Pequot Publishing Inc, 2012. – Vol. 29. – 148 p.