



МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА, ВКЛЮЧАЮЩЕГО ГТУ, ВЭУ И АККУМУЛЯТОРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Ю.Е. Николаев, В.Н. Осипов, В.Ю. Игнатов

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия
termo@sstu.ru

Резюме: Для снабжения малых городов электрической и тепловой энергией, обеспеченных природным газом, предлагается создание автономных энергокомплексов на базе газотурбинных установок, ветрогенераторов и аккумуляторов электрической энергии. Предложена схема совместной работы указанных установок, разработана методика расчета количественных характеристик ветроэнергетической установки, ГТУ и аккумуляторов, обеспечивающих покрытие пиковой части суточного электрического графика нагрузки. Тепловая нагрузка обеспечивается за счет работы котла-утилизатора и пикового котла. На примере энергокомплекса электрической нагрузкой 5 МВт и тепловой 17,5 МВт рассчитана выработка электрической энергии ветроэнергетической и газотурбинной установками, отпуск электрической энергии от аккумуляторов, тепловые нагрузки котла-утилизатора и пикового котла по месяцам года. При доле мощности ветроэнергетической установки 0,2 аккумуляторы обеспечивают в течение годового периода от 5,2 до 10,7 % суточной потребности графика электрической нагрузки. Электрическая мощность газотурбинной установки в зимний период снижается до 70 % от максимальной нагрузки потребителя, в летний период – до 55 %. Увеличение относительной доли мощности ветроэнергетической установки снижает электрическую мощность газотурбинной установки, ее стоимость, при этом возрастает стоимость аккумуляторов.

Ключевые слова: автономное энергообеспечение; энергокомплекс, газотурбинная установка, ветроэнергетическая установка, аккумулятор электрической энергии, потребитель электрической энергии, потребитель тепловой энергии.

Для цитирования: Николаев Ю.Е., Осипов В.Н., Игнатов В.Ю. Методика расчета энергетических показателей автономного энергокомплекса, включающего ГТУ, ВЭУ и аккумуляторы электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3 С. 36-43. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-36-43.

CALCULATION METHODOLOGY OF THE ENERGY INDICATORS OF AN SELF-CONTAINED ENERGY COMPLEX INCLUDING GAS TURBINE PLANTS, WIND-DRIVEN POWER PLANT AND ELECTRIC STORAGE CELL

YE. Nikolaev, VN. Osipov, VY. Ignatov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
termo@sstu.ru

Abstract: To supply small cities with electric and thermal energy it is proposed to create self-contained energy complex based on gas turbine plants (GTP), wind generators and electric storage cell. A scheme for the joint operation of these plants is offered, a methodology for calculating the quantitative characteristics of a wind power plant, gas turbines and electric storage cell is developed. Electric storage cell provide coverage the peak portion of the daily electrical load curve. The heat load is ensured by the operation of the waste-heat boiler and the peak boiler. Using the example of a power complex with an electric load of 5 MW and a heat load of 17.5 MW, the generation of electric energy by wind driven power plant and gas turbine plants, the supply of electric energy from electric storage cell, the heat loads of the waste-heat boiler and peak boiler by months of the year are calculated. When the power share

of the wind power plant is 0.2, the electric storage cell provide for an annual period from 5.2 to 10.7 % of the daily demand of the electric load schedule. The electric power of the gas turbine plant in winter is reduced to 70 % of the maximum load of the consumer, in summer - up to 55 %. An increase in the relative share of the power of a WDPP reduces the electric capacity of a gas turbine plants, its cost, while the cost of electric storage cell increases.

Keywords: self-contained power supply, energy complex, gas turbine plant, wind-driven power plant, electric storage cell, electric energy consumer, heat energy consumer.

For citation: Nikolaev YE, Osipov VN, Ignatov VY. Calculation methodology of the energy indicators of an self-contained energy complex including gas turbine plants, wind-driven power plant and electric storage cell. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(3):36-43. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-36-43.

Введение

Рост стоимости органического топлива в мире обусловил наращивание мощностей электрогенерации за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В странах западной Европы и США темпы роста установленной электрической мощности электростанций на ВИЭ превысили соответствующие темпы ввода мощностей на органическом топливе [1,2,3].

В РФ сооружение источников на ВИЭ осуществляется медленными темпами, что объясняется низкими ценами на органическое топливо по сравнению с европейскими странами, высокой стоимостью как отечественных, так и зарубежных установок, использующих ВИЭ¹. Вместе с тем, проблема эффективного и качественного энергоснабжения удаленных от крупных энергосистем поселков и небольших городов характерна и для РФ [3]. Наибольшее количество публикаций посвящено гибридным электростанциям, расположенным в удаленных районах Севера и Дальнего Востока, включающим ВИЭ и дизель-генераторные установки, с целью максимального замещения привозного жидкого топлива для производства электрической энергии [4-7]. В них рассматриваются вопросы определения эффективности применения ветроэнергетических установок для энергоснабжения потребителей, вопросы надежности и сокращения выбросов в окружающую среду. В статье [8] авторы проводят технико-экономический анализ пяти концепций ветряных тепловых энергетических систем, в которых совместно с ветроэнергетической установкой используются электрические котлы, тепловые насосы. С целью выравнивания суточного графика электропотребления в [9] рекомендуется использование энергии ВИЭ в аккумуляторных батареях для покрытия переменной части графика нагрузки. В указанных статьях в качестве основного двигателя использованы дизельные установки. Вместе с тем, для районов, обеспеченных природным газом, не имеющих надежного энергоснабжения на автономных энергокомплексах возможно использование газотурбинных установок (ГТУ) совместно с ВИЭ и аккумуляторами. Достоинством применения ГТУ в энергокомплексе является возможность достижения большей электрической мощности и выработки тепловой энергии, быстрый пуск, меньшие капиталовложения и стоимость обслуживания по сравнению с двигателями внутреннего сгорания, освоенный выпуск отечественными производителями установок небольшой мощности. При этом ГТУ имеют меньший электрический КПД. Схема такого энергокомплекса, вырабатывающего электрическую и тепловую энергию, изображена на рис. 1. Особенностью схемы является применение ГТУ с регенеративным подогревом воздуха, позволяющего изменять величину тепловой мощности котла-утилизатора и величину электрического КПД газотурбинной установки, ветроэнергетической установки (ВЭУ) с генератором постоянного тока, двух групп аккумуляторов. Одна группа аккумуляторов работает с ВЭУ, накапливая электрическую энергию, вторая – используется для покрытия переменной части суточного графика нагрузки, затем с помощью переключателей их роли меняются. Предусмотрена подзарядка аккумуляторов от ГТУ в периоды провала суточного электрического графика нагрузки за счет использования обратимого преобразователя тока.

¹ Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика: Справочно-методическое издание/ Под общей редакцией П.П. Безруких. М.: «ИнтехэнергоИздат», 2014. 304 с.

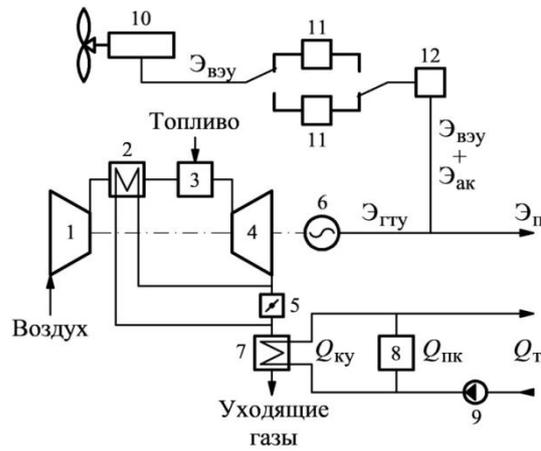


Рис. 1. Принципиальная схема энергокомплекса с ГТУ, ВЭУ и аккумуляторами
 1 – компрессор; 2 – регенератор; 3 – камера сгорания; 4 – газовая турбина; 5 – шибер;
 6 – электрогенератор; 7 – котел-утилизатор; 8 – пиковый котел; 9 – сетевой насос;
 10 – ветрогенератор; 11 – электрические аккумуляторы; 12 – преобразователь тока

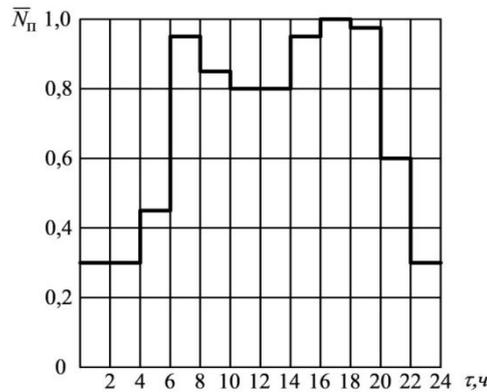


Рис. 2. Суточный график электрической нагрузки зимнего периода

Для расчета выработки электрической и тепловой энергии в рассматриваемом энергокомплексе использованы следующие исходные данные: характерный суточный график электрической нагрузки зимнего периода (рис. 2), для летнего периода нагрузки снижаются на 15-20%, структура тепловой нагрузки, расчетная тепловая нагрузка, температурный график сети, почасовые скорости ветра в месте расположения источника, характеристика ВЭУ (зависимость изменения относительной электрической мощности от скорости ветра), среднемесячные температуры наружного воздуха в месте расположения источника, высота установки ветрогенератора.

С использованием указанных данных определяются следующие показатели:

– суточная и годовая выработка выработка электрической энергии ВЭУ в относительных единицах, отн.кВт·ч/сут., отн. кВт·ч/год:

$$\bar{\mathcal{E}}_{\text{взу},j} = \sum_{i=1}^{i=24} \bar{N}_{\text{взу},i} \tau_i, \quad (1)$$

$$\bar{\mathcal{E}}_{\text{взу}}^{\Gamma} = \sum_{j=1}^{j=12} \bar{\mathcal{E}}_{\text{взу},j} n_j, \quad (2)$$

где $\bar{N}_{\text{взу},i}$ – относительная электрическая мощность ВЭУ на i – режиме суточного графика нагрузки, отн.кВт; τ_i – продолжительность i – режима, ч/год; n_j – количество суток в j – месяце, сут./мес.

В выражении (1) за единицу принята номинальная мощность ВЭУ.

Относительное количество электрической энергии за сутки, которое может быть отведено из аккумулятора в j – месяце, отн.кВт·ч/мес.:

$$\bar{\mathcal{E}}_{\text{ак},j} = \bar{\mathcal{E}}_{\text{взу},j} \eta_{\text{ак}} \eta_{\text{п}} (1 - \gamma) n_j, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{ак}}$ и $\eta_{\text{п}}$ – КПД аккумулятора и преобразователя напряжения; γ – глубина разгрузки аккумулятора.

Суточное количество электроэнергии в относительных единицах, расходуемое потребителем в j – месяце, отн.кВт·ч/сут.:

$$\bar{\mathcal{E}}_{п,j} = \sum_{i=1}^{i=24} \bar{N}_{п,j} \tau_i, \quad (4)$$

где $\bar{N}_{п,j}$ – относительная электрическая нагрузка потребителя на i – режиме, отн.кВт.

Суточная доля энергии, покрываемая аккумуляторами:

$$\Phi_{вэу,j} = \frac{\bar{\mathcal{E}}_{ак,j} \delta_{вэу}}{\bar{\mathcal{E}}_{п,j}}, \quad (5)$$

где $\delta_{вэу} = N_{вэу}^{ном} / N_{п}^{max}$ – отношение номинальной мощности ВЭУ к максимальной электрической нагрузке потребителя.

Суточное количество электрической энергии в относительных единицах в j – месяце, вырабатываемое ГТУ, отн.кВт·ч/сут.:

$$\bar{\mathcal{E}}_{гту,j} = \bar{\mathcal{E}}_{п,j} - \bar{\mathcal{E}}_{ак,j} \delta_{вэу}. \quad (6)$$

Дневная электрическая нагрузка ГТУ в j – месяце, отн.кВт:

$$\bar{N}_{гту,j}^д = \frac{\bar{\mathcal{E}}_{гту,j} - \bar{N}_{гту,j}^н \tau_н}{\tau_д}. \quad (7)$$

где $\bar{N}_{гту,j}^н$ – ночная нагрузка ГТУ в относительных единицах, определяемая по суточному графику, отн.кВт; $\tau_д$, $\tau_н$ – продолжительность дневного и ночного периодов времени, ч/сут.

Годовое количество энергии, вырабатываемое ГТУ, кВт·ч/год:

$$\mathcal{E}_{гту}^г = N_{п}^{max} \sum_{j=1}^{j=12} \bar{\mathcal{E}}_{гту,j} n_j. \quad (8)$$

Годовой расход топлива ГТУ, кг у.т./год:

$$B_{гту}^г = \frac{N_{п}^{max}}{Q_{н}^p} \sum_{j=1}^{j=12} \left(\frac{\bar{N}_{гту,j}^д}{\eta_{гту,j}^д} \tau_д + \frac{\bar{N}_{гту,j}^н}{\eta_{гту,j}^н} \tau_н \right) n_j, \quad (9)$$

где $Q_{н}^p$ – теплота сгорания топлива, кДж/кг у.т.; $\eta_{гту,j}^д$, $\eta_{гту,j}^н$ – электрические КПД ГТУ при средней температуре j – месяца при дневной и ночной нагрузках.

Средняя тепловая нагрузка в j – месяце, кВт:

$$Q_{т,j} = Q_{от} \frac{t_{вн} - t_{н,j}}{t_{вн} - t_{н,о}} + Q_{в} \frac{t_{вн} - t_{н,j}}{t_{вн} - t_{н,в}} + Q_{гвс,j}, \quad (10)$$

где $Q_{от}$, $Q_{в}$ – расчетные тепловые нагрузки отопления и вентиляции, кВт; $t_{вн}$ – температура внутреннего воздуха в здании, °С; $t_{н,о}$, $t_{н,в}$ – расчетные температуры наружного воздуха для отопления и вентилиации, °С; $t_{н,j}$ – температура наружного воздуха в j – месяце, °С; $Q_{гвс,j}$ – нагрузка горячего водоснабжения в j – месяце, кВт.

Тепловая мощность котла-утилизатора ГТУ $Q_{ку,j}$ рассчитывается в зависимости от величины электрической нагрузки и температуры наружного воздуха по методике, изложенной в [10]. Суточная тепловая нагрузка пикового котла рассчитывается по выражению, кВт·ч/сут.:

$$Q_{пк,j} = 24 Q_{т,j} - Q_{ку,j}^д \tau_д - Q_{ку,j}^н \tau_н, \quad (11)$$

где $Q_{ку,j}^д$, $Q_{ку,j}^н$ – тепловая мощность котла-утилизатора днем и ночью в j – месяце, кВт.

При расчетах по (11) величина $Q_{пк,j}$ может иметь как положительное, так и отрицательное значение, в последнем случае избыток тепловой энергии продуктов сгорания ГТУ удаляется в окружающую среду без утилизации в котле-утилизаторе.

Годовой расход топлива пиковым котлом, кг у.т./год:

$$Q_{\text{ПК}}^{\Gamma} = \sum_{j=1}^{j=12} Q_{\text{ПК},j} n_j \quad (12)$$

Используя разработанную методику, выполнены расчеты количественных показателей энергокомплекса с присоединенной максимальной электрической нагрузкой $N_{\text{П}}^{\text{max}} = 5$ МВт и тепловой нагрузкой $Q_{\text{T}} = 17,5$ МВт, расположенного в левобережной части Саратовской области. Характеристики ветра и температуры наружного воздуха приняты по данным [11]. Расчеты мощности ВЭУ при высоте башни 50 м выполнены на основе данных посуточного изменения скорости ветра в каждом месяце с использованием характеристики ветроустановки. Величина мощности ВЭУ изменялась в пределах 500 – 1500 кВт ($\delta_{\text{ВЭУ}} = 0,1 - 0,3$). В качестве ГТУ рассмотрены две рабочих установки ГТУ-2,5 с регенеративным подогревом воздуха и одна резервная [12]. В зимний период при высоком значении тепловой нагрузки ГТУ работает без регенератора, а летний период при снижении теплопотребления – с включенным регенератором, обеспечивая увеличение электрического КПД ГТУ. Электрические КПД ГТУ при отключенном регенераторе в зимний период находятся в пределах 0,21 – 0,24, при включенном регенераторе 0,32 – 0,35. В качестве накопителей рассмотрены никель–литиевые аккумуляторы с электрическим КПД $\eta_{\text{ак}} = 0,9$, глубиной разрядки $\gamma = 0,2$, КПД преобразователя тока $\eta_{\text{п}} = 0,95$ [13,14]. Продолжительность дневной нагрузки $\tau_{\text{д}} = 16$ ч, ночной нагрузки $\tau_{\text{н}} = 8$ ч, суточный график электрической нагрузки приведен на рис. 2. Результаты помесячных показателей работы энергокомплекса показаны в табл. 1. На рис. 3 приведены доли выработки электроэнергии ГТУ и ВЭУ.

Таблица 1

Количественные показатели работы энергокомплекса при $\delta_{\text{ВЭУ}} = 0,2$

Месяц	$\mathcal{E}_{\text{ВЭУ},j}$ кВт·ч/ сут.	$\mathcal{E}_{\text{ак},j}$ кВт·ч/ сут.	$\Phi_{\text{ВЭУ},j}$	$N_{\text{ГТУ},j}^{\text{д}}$ МВт	$N_{\text{ГТУ},j}^{\text{н}}$ МВт	$Q_{\text{ку},j}^{\text{д}}$ МВт	$Q_{\text{ку},j}^{\text{н}}$ МВт	$Q_{\text{ПК},j}^{\text{д}}$ МВт	$Q_{\text{ПК},j}^{\text{н}}$ МВт
1	10350	7450	0,097	3,60	1,5	14,73	4,74	-1,24	8,76
2	11420	8220	0,107	3,54	1,5	9,30	4,74	4,0	8,56
3	10310	7420	0,097	3,59	1,5	9,43	4,74	2,09	6,78
4	9080	6540	0,085	3,64	1,5	9,57	4,74	-1,34	3,50
5	9000	6480	0,106	2,84	1,2	1,78	0,75	2,32	3,35
6	7980	5745	0,094	2,88	1,2	1,81	0,75	2,29	3,35
7	4420	3180	0,052	3,04	1,2	1,91	0,75	2,19	3,35
8	6840	4920	0,080	2,94	1,2	1,85	0,75	2,25	3,35
9	8160	4270	0,069	2,98	1,2	1,87	0,75	2,23	3,35
10	5930	5870	0,076	3,70	1,5	9,74	4,74	-1,50	3,50
11	7660	5520	0,072	3,71	1,5	9,75	4,74	0,95	5,96
12	8510	6130	0,080	3,67	1,5	9,64	4,74	2,89	7,80



Рис. 3. Доли выработки электрической энергии на ГТУ и ВЭУ

Анализируя полученные результаты следует отметить, что запасаемая энергия ВЭУ в аккумуляторе в зависимости от месяца изменяется в пределах 4420-11420 кВт·ч/сут., ее количество обеспечивает от 5,2 до 10,7 % суточной потребности электрического графика нагрузки. Электрическая мощность ГТУ в дневной период составляет около 70 % максимальной нагрузки потребителя, в летний период – 55 %. В ночной период времени ГТУ разгружаются до 30 % зимой и 25 % летом от максимальной нагрузки потребителя, что обеспечивается остановкой одного агрегата. Изменение электрической мощности ГТУ в течение суточного периода приводит к переменной мощности котла-утилизатора и нагрузки пикового котла. При высоких электрических нагрузках ГТУ выработка тепловой энергии в котла-утилизаторах превышает нагрузку потребителя, поэтому избытки теплоты сбрасываются в дымовую трубу без утилизации. Доля потерь теплоты, отводимой после ГТУ без утилизации в котле-утилизаторе, составляет 4,2 % годовой тепловой нагрузки потребителя.

В качестве электрических аккумуляторов может быть использовано оборудование, выпускаемое компанией «Юниконт» (г. С.-Петербург).

Влияние доли мощности ВЭУ на относительную мощность ГТУ в дневном режиме показано на рис. 4.

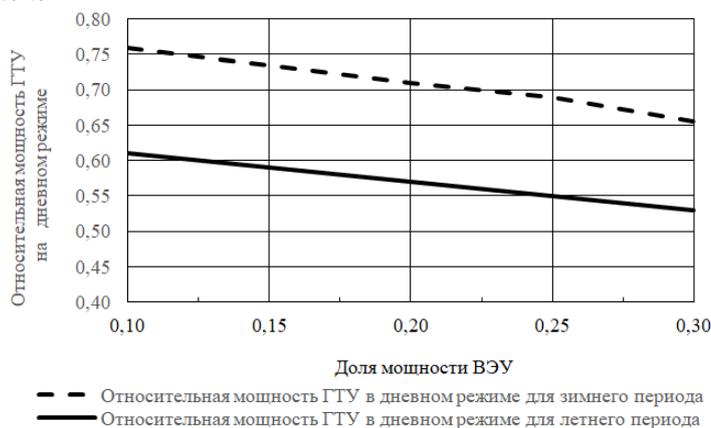


Рис. 4. Зависимость относительной мощности ГТУ на дневном режиме от доли мощности ВЭУ

Из рис. 4 видно, что с ростом относительной мощности ВЭУ электрическая мощность ГТУ снижается. При этом, увеличивается емкость аккумуляторов и их стоимость. В связи с отмеченным, необходима технико-экономическая оценка величины $\delta_{ВЭУ}$.

Выводы

1. Предложена схема автономного энергокомплекса, включающего ветроэнергетическую установку, ГТУ и аккумуляторы для выработки электрической и тепловой энергии.
2. Разработана методика расчета количественных характеристик ветроэнергетической установки, ГТУ и аккумуляторов, обеспечивающих покрытие пиковой части суточного электрического графика нагрузки.
3. Доля покрытия суточного графика нагрузки аккумуляторами, заряжаемыми от ВЭУ, составляет от 5,2 до 10,7 % и зависит от отношения мощности ВЭУ и максимальной нагрузки потребителя. Поэтому необходима технико-экономическая оптимизация данного показателя.

Литература

1. Renewables 2017: global status report. Paris: REN21, 2017.
2. Distributed generation of electricity and its environmental impacts. United States Environmental Protection Agency, 2017. Available to: <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts>; accessed to: 5.01.2019.
3. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. №12. С.4-17.
4. Стенников В.А., Жарков С.В., Постников И.В., и др. Интегрированные схемы энергоснабжения на базе ТЭЦ и ВЭС // Промышленная энергетика. 2016. №11. С.57-62.
5. Gangoli Rao, A Natural gas displacement by wind curtailment utilization in combined-cycle power plants // Energy. 2019. Vol. 168. P. 477-491.

6. Lund H. Large-scale integration of wind power into different energy systems // *Energy*. 2005. V. 30. P. 2402-2412.
7. Pensini A. Economic analysis of using excess renewable electricity to displace heating fuels // *Energy*. 2014. V. 131. P. 530-543.
8. Cao K.K. Expanding the horizons of power-to-heat: cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems // *Energy*. 2018. V. 164. P. 925-936.
9. Hughes Lorry. Int. J. The technical potential off-peak electricity to serve as backup in wind-electricity thermal storage systems // *Green Energy*. 2010. №2. P. 181-193.
10. Николаев Ю.Е., Игнатов В.Ю. Моделирование режимов ГТУ при совместной работе с ветроэнергетической установкой // *Промышленная энергетика*. 2019. №7. С.48-53.
11. Официальный сайт метеорологической программы [meteonorm.http://www.meteonorm.com/en/downloads/demofiles](http://www.meteonorm.com/en/downloads/demofiles)
12. Ануров Ю.М., Дубинин А.Б., Николаев Ю.Е. Когенерационная газотурбинная установка для схем теплоснабжения систем ЖКХ // *Проблемы теплоэнергетики*. 2014. №3. С.148-152.
13. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Современные виды накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике // *Теплоэнергетика*. 2011. №11. С.2-11.
14. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ совместного использования энергии солнца и ветра в системах автономного энергоснабжения // *Промышленная энергетика*. 2016. №9. С.39-43.

Авторы публикации

Николаев Юрий Евгеньевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» имени А.И. Андрущенко (ТАЭ) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.).

Осипов Валерий Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловая и атомная энергетика» имени А.И. Андрущенко (ТАЭ) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.). Email: termo@sstu.ru

Игнатов Владимир Юрьевич – аспирант кафедры «Тепловая и атомная энергетика» имени А.И. Андрущенко (ТАЭ) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ имени Гагарина Ю.А.).

References

1. Renewables 2017: *Global status report*. Paris: REN21, 2017. ISBN 978-3-9818107-6-9.
2. *Distributed generation of electricity and its environmental impacts*. United States Environmental Protection Agency, 2017. Available at: <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts>. Accessed: 12 Jan 2019.
3. Filippov SP, Dilman MD, Ilyushin PV. Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth. *Thermal Engineering*. 2019;(12):4-17. doi:10.1134/S0040363619120038
4. Stennikov VA, Zharkov SV, Postnikov IV, et al. Integrirovannyye skhemy energosnabzheniya na baze TETS i VES. *Promyshlennaya energetika*. 2016;(11): 57-62.
5. Gangoli Rao. A Natural gas displacement by wind curtailment utilization in combined-cycle power plants. *Energy*. 2019;(168):477-491.
6. Lund H. Large-scale integration of wind power into different energy systems. *Energy*. 2005;(30):2402-2412.
7. Pensini A. Economic analysis of using excess renewable electricity to displace heating fuels. *Energy*. 2014;(131):530-543.
8. Cao K.K. Expanding the horizons of power-to-heat: cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems. *Energy*. 2018;(164):925-936.
9. Hughes Lorry. Int. J. The technical potential off-peak electricity to serve as backup in wind-electricity thermal storage systems. *Green Energy*. 2014;(2):181-193.
10. Nikolayev YUYe, Ignatov VYU. Modelirovaniye rezhimov GTU pri sovmestnoy rabote s vetroenergeticheskoy ustanovkoy. *Promyshlennaya energetika*. 2019;(7):48-53.
11. *Official website of the meteorological program*. Available at: <http://www.meteonorm.com/en/downloads/demofiles>. Accessed: 17 Feb 2019.
12. Anurov YUM, Dubinin AB, Nikolayev YUYe. Kogeneratsionnaya gazoturbinnaya ustanovka dlya skhem teplosnabzheniya sistem ZHKKH. *Problemy teploenergetiki*. 2014;(3):148-152.
13. Popel' OS, Tarasenko AB. Modern kinds of electric energy storages and their application in independent and centralized power systems. *Thermal Engineering*. 2011;(11):883-893.

14. Marchenko OV, Solomin SV. Analiz sovmestnogo ispol'zovaniya energii solntsa i vetra v sistemakh avtonomnogo energosnabzheniya. *Promyshlennaya energetika*. 2016; (9):39-43.

Authors of the publication

Yriy E. Nikolaev – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

Valeriy N. Osipov – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia. Email: termo@sstu.ru.

Vladimir Y. Ignatov – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

Поступила в редакцию

27 января 2020г.