

УДК 621.311.23

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_95

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ НА СВАЛОЧНОМ ГАЗЕ

А.А. Жидковe-mail: alexeyzhidkov@list.ruНовосибирский государственный технический университет
*Новосибирск, Россия***А.З. Абасс**ORCID: **0000-0003-1836-3435** e-mail: theking.amir@mail.ruУниверситет Васит
*Васит, Ирак***Х.Т. Аль Рикаби**e-mail: hdhiyab@uowasit.edu.iqУниверситет Васит
Васит, Ирак

Факторы, препятствующие вводу в эксплуатацию электростанций, функционирующих на свалочном газе, проанализированы с точки зрения элементов распределенной генерации. Выполнена оценка эффективности использования таких объектов генерации для снижения потерь электроэнергии и выравнивания графика нагрузки в распределительных электрических сетях. Проведенный расчет подтверждает эффективность применения объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь электроэнергии даже в сети незначительной протяженности. При этом эффективность объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической энергии растет тем сильнее, чем дальше она подключается в сеть от центра питания. Технико-экономическая оценка также показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки в распределительной электрической сети более чем в пять раз выгоднее классической системы накопления энергии при технически сопоставимых параметрах.

Ключевые слова: выравнивание графика нагрузки, потери электроэнергии, распределенная генерация, свалочный газ.

Для цитирования: Жидков А.А., Абасс А.З., Аль Рикаби Х.Т. Оценка эффективности использования объектов генерации на свалочном газе // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 95-111. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_95

EFFICIENCY ASSESSMENT OF USING GENERATION FACILITIES WITH LANDFILL GAS

A.A. Zhidkov

e-mail: alexeyzhidkov@list.ru
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

A.Z. Abass

ORCID: [0000-0003-1836-3435](https://orcid.org/0000-0003-1836-3435) e-mail: theking.amir@mail.ru
Wasit University
Wasit, Iraq

H.Th. Al Rikabi

e-mail: hdhiyab@uowasit.edu.iq
Wasit University
Wasit, Iraq

Abstract. The article presents the factors that prevent the commissioning of power plants operating on landfill gas as an element of distributed generation and evaluates the efficiency of using such generation facilities to reduce electricity losses and level the load balancing in distributed electrical networks. The results of the calculation confirm the effectiveness of the use of a landfill gas generation facility to reduce electricity losses even in a network of small length. At the same time, the efficiency of the landfill gas generation facility to reduce the losses of electrical energy increases more strongly when it is connected to the network further from the power feeder. A feasibility study also showed that the use of a landfill gas generation facility to equalize the load curve in a distributed electrical network is more than five times more profitable than the use of a classical energy storage system with technically comparable parameters.

Keywords: load curve leveling, power losses, distributed generation, landfill gas.

For citation: A.A. Zhidkov, A.Z. Abass and H.Th. Al Rikabi, "Efficiency assessment of using generation facilities with landfill gas", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 95-111, 2022. DOI: [10.46960/2658-6754_2022_4_95](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2022_4_95)

I. Введение

Одним из перспективных способов сокращения негативного влияния твердых коммунальных отходов (ТКО) на экологию является использование систем дегазации полигонов ТКО с дальнейшей утилизацией свалочного газа с помощью газопоршневых установок (ГПУ). Данный вид генерации относится к генерации, функционирующей на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1].

Механизм поддержки объектов ВИЭ на розничном рынке электроэнергии (в том числе, генерирующих объектов на свалочном газе) вступил в силу в 2015 г. с принятием соответствующего Постановления Правительства РФ [2]. Основной принцип механизма поддержки ВИЭ заложен в федеральном законе (ФЗ) [3], где зафиксирована норма об обязательной покупке в приоритетном порядке электрической энергии, выработанной генерирующими объектами, функционирующими на основе использования ВИЭ, сетевыми компаниями в целях компенсации потерь в сетях. Также уточняется, что государственному регулированию подлежат цены (тарифы) на электрическую энергию (мощность), произведенную на функционирующих на основе использования ВИЭ квалифицированных генерирующих объектах.

Однако, несмотря на то, что все нормативные условия по развитию генерации на свалочном газе сформированы, в период с 2015 г. и по настоящее время в нашей стране введен только один такой объект (электростанция 2,4 МВт на базе полигона твердых бытовых отходов «Новый Свет-Эко» в Гатчинском районе Ленинградской области). При этом, несмотря на то, что генерация на попутном газе [4] (в России достаточно широко распространенная), является ближайшим аналогом генерации на свалочном газе, она не квалифицируется как объект ВИЭ.

Использованию электростанций, функционирующих на свалочном газе, как элемента распределенной генерации (РГ), препятствуют некоторые факторы, свойственные для РГ, подключаемой к развитой электрической сети, а именно:

- усложнение управляемости и наблюдаемости сети;
- возможный выход некоторых технических показателей за пределы допустимых значений (токовая перегрузка, рост токов короткого замыкания, динамическая устойчивость генерирующего оборудования);
- необходимость существенного изменения и перестроения систем релейной защиты (РЗ), автоматики, систем управления, связи и пр.;
- влияние качества газа на режим работы газопоршневой установки (ГПУ);
- субъективное мнение многих технических специалистов о негативном влиянии на распределительную электрическую сеть таких объектов генерации.

Большинство перечисленных негативных факторов можно решить традиционными и инновационными, техническими и организационными мероприятиями, которые, хоть и весьма затратны либо сложны, но технически реализуемы, и при этом имеется богатый опыт их применения. Например, разработаны организационные решения по планированию режимов ра-

боты энергоустановок и энергосистем [5-7] и более инновационные решения, в том числе, с использованием искусственного интеллекта [8-9] и различных методов оптимизации [10-14]. При этом рекомендуемый авторами способ обеспечения динамической устойчивости также подробно описан в других статьях [15-16]. Оценка влияния качества газа на режим работы ГПУ, обзор других особенностей генерации на свалочном газе приведены в отдельных работах [17-19].

В настоящей статье оценен потенциал использования объектов генерации на свалочном газе для повышения энергоэффективности за счет снижения потерь электрической энергии и выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети, и она направлена на изменение мнения специалистов о негативном влиянии на распределительную электрическую сеть объектов генерации, функционирующих на свалочном газе.

II. Материалы и методы

Для исследования режимов работы ГПУ на свалочном газе в составе электроэнергетической системы (ЭЭС) рассмотрена перспективная электростанция проектной установленной мощностью 1,25 МВт на территории полигона ТКО в Новосибирской области. В качестве топлива на электростанции будет использоваться газ, выделяемый в теле полигона ТКО, который с помощью системы сбора свалочного газа подается на площадку, где установлено блочно-модульное оборудование. Для обеспечения ГПУ топливом планируется к использованию комплекс специализированного оборудования для добычи, очистки и подачи свалочного газа. В состав комплекса войдут:

- газосборная станция, подключенная к скважинам, пробуренным в теле полигона;
- газокomppressorная станция, обеспечивающая подачу газа;
- высокотемпературная факельная установка для сжигания излишних объемов газа;
- установки очистки газа (УОГ).

Работа комплекса по добыче и подаче свалочного газа выглядит следующим образом: газ, добываемый из тела полигона с помощью газосборной и газокomppressorной станций, проходит очистку в УОГ и затем подается на ГПУ, излишки газа сжигаются на факельной установке. Во время обслуживания генерирующего оборудования электростанции весь объем добываемого газа сжигается на факельной установке. В состав электростанции войдет 5 установок ГПУ производства Тутаевского моторного завода установленной мощностью 250 кВт каждая. Как показано в [19], располагаемая мощность каждого агрегата, в силу низкой калорийности свалочного газа, будет значительно ниже номинальных параметров и составит порядка 200 кВт. Планируемый режим работы электростанции – круглогодичный

круглосуточный. По умолчанию планируется, что в течение суток электростанция будет работать ровным графиком, загружаясь до своей располагаемой мощности. В течение года режим работы электростанции аналогичный – загрузка ровным графиком до располагаемой мощности, за исключением периодов останова оборудования для целей обслуживания.

В табл. 1 приведен расчет выработки электростанции.

Таблица 1.
Расчет выработки электростанции

Table 1.
Calculation of power plant generation

№ГГ	$P_{уст},$ кВт	$P_{расп},$ кВт	Число часов использования $P_{расп},$ ч/год	Выработка max/min, млн кВт.ч/год
Г1	250	200	8000	1,600
Г2	250	200	8000	1,600
Г3	250	200	8000	1,600
Г4	250	200	8000	1,600
Г5	250	200	8000	1,600
ИТОГО	1250	1000	8000	8,000

Район расположения электростанции находится на расстоянии около 2 км от РП-490. РП-490 подключен к ПС 110 кВ Пашино кабельными линиями – I с.ш. кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением 500 мм² протяженностью 3,66 км (ф.10212), II с.ш. двумя кабельными линиями сечением АСБ-120 и АСБ-150 протяженностью 2,2 км и 2,3 км соответственно (ф.10227/ф.10229). От РП-490 осуществляется электроснабжение жилых районов и садовых обществ. В непосредственной близости от площадки ГПУ проходят два фидера 10 кВ – фидер 2 и фидер 7, отходящие от РП-490. Они выполнены в кабельно-воздушном исполнении. По фидеру 2 осуществляется электроснабжение села и ряда дачных обществ. Головной участок фидера выполнен кабелем сечением АСБ 3х95 протяженностью 0,25 км, магистральная линия фидера выполнена проводами марок АС-95 и А-70. По фидеру 7 осуществляется электроснабжение нескольких сел и ряда дачных обществ. Головной участок фидера выполнен кабелем сечением АСБ 3х240 протяженностью 0,05 км, и проводом АС-95 протяженностью 0,15 км, магистральная линия фидера выполнена проводами марок А-70 и А-50. На площадке электростанции предусматривается сооружение трансформаторной подстанции (ТП), включающей распределительное устройство (РУ) с двумя трансформаторами мощностью по 1600 кВА (ТП ГПУ) с подключением трех ГПУ на одну секцию РУ 0,4 кВ и двух ГПУ на другую.

Рассмотрено два варианта подключения ТП ГПУ к сети 10 кВ ПС 110 кВ Пашино:

- *вариант 1*: подключение ТП ГПУ к ф. 2 и ф. 7 посредством строительства отпаяк протяженностью около 0,05 км, выполненных самонесущим изолированным проводом СИП-3 сечением 70 мм².
- *вариант 2*: подключение ТП ГПУ к шинам 10 кВ РП-490 посредством строительства двух ЛЭП 10 кВ от ТП ГПУ до РП-490 протяженностью около 2 км, выполненных самонесущим изолированным проводом СИП-3 сечением 70 мм².

Схема присоединения ТП ГПУ к сети 10 кВ ПС 110 кВ Пашино для варианта 1 и 2 приведена на рис. 1.

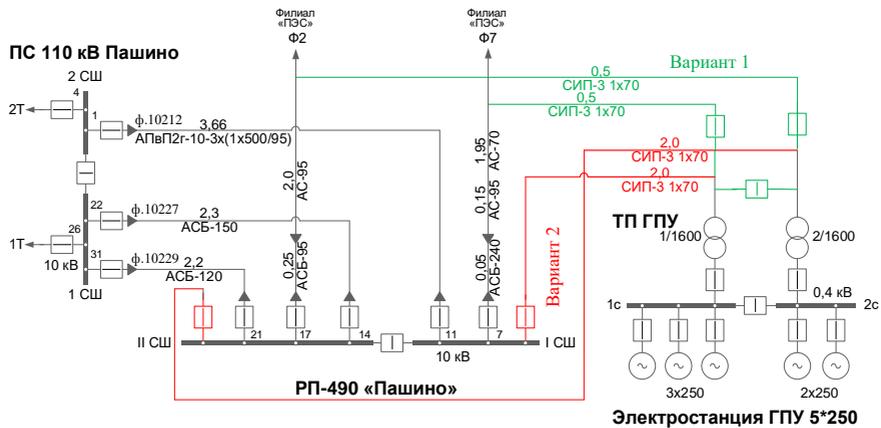


Рис. 1. Схема присоединения ГПУ к сети

Fig. 1. Scheme of connecting the gas piston units (GPU) to the grid

Расчеты проводятся в программном комплексе *RastrWin*, при этом учитываются особенности задания генерации и нагрузки, влияющие на результаты исследования.

Располагаемая реактивная мощность моделируемых генераторов ограничивается сверху двумя факторами:

1) ток статора не должен превышать максимально допустимого значения:

$$Q_{\max i} = \sqrt{\left(k_i \frac{P_{\text{НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}}} \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 - P^2}; \quad (1)$$

2) ток возбуждения не должен превышать максимально допустимого значения (при номинальной частоте этому соответствует ограничение величины ЭДС, генерируемой в статоре):

$$Q_{\max E} = k_E \frac{E_{q, \text{НОМ}} U}{X_d} \cos \delta_\Gamma + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\delta_\Gamma - \frac{U^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q}. \quad (2)$$

Потребители заданы с учетом статических характеристик нагрузки, которые имеют следующий вид:

$$P(V, \Delta f) = P_{\text{НОМ}} \left[\alpha_0 + \alpha_1 \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right) + \alpha_2 \text{РПЕ} \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right)^2 + K^P \Delta f^{\text{о.е.}} \right]; \quad (3)$$

$$Q(V, \Delta f) = Q_{\text{НОМ}} \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right)^2 + K^Q \Delta f^{\text{о.е.}} \right], \quad (4)$$

где $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – коэффициенты полинома статических характеристик нагрузки по активной и реактивной мощности; условия $P = P_{\text{НОМ}}, Q = Q_{\text{НОМ}}$ при $V = V_{\text{НОМ}}$ выполняются, если $a_0 + a_1 + a_2 = 1$ и $b_0 + b_1 + b_2 = 1$. Нагрузка в обобщенной характеристике соответствует ситуации:

- $a_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = 1, b_0 = 0, b_1 = 1, b_2 = 0$ – постоянные сопротивления;
- $a_0 = 0, a_1 = 1, a_2 = 0, b_0 = 0, b_1 = 1, b_2 = 0$ – постоянный ток;
- $a_0 = 1, a_1 = 0, a_2 = 1, b_0 = 1, b_1 = 1, b_2 = 0$ – постоянная мощность.

Исследование режимов работы сети показало, что для обоих вариантов при ремонте ф. 10212 и аварийном отключении ф.10229 загрузка ф. 10227 составит 254-269 А (121,5-128,7 % от длительно допустимого тока КЛ и 108,1-114,5 % от аварийнодопустимого тока КЛ). Результат расчета данного режима приведен на рис. 2.

III. Оценка влияния объекта генерации на свалочном газе на снижение потерь электрической энергии в распределительной электрической сети

Исследования [20-21] показали положительное влияние РГ на снижение потерь в распределительной электрической сети. Поэтому одним из положительных эффектов подключения объекта генерации на свалочном газе к электроэнергетической системе можно считать снижение потерь электрической энергии при передаче мощности. Для количественной оценки снижения потерь выполним расчеты с учетом и без учета объекта генерации на свалочном газе.

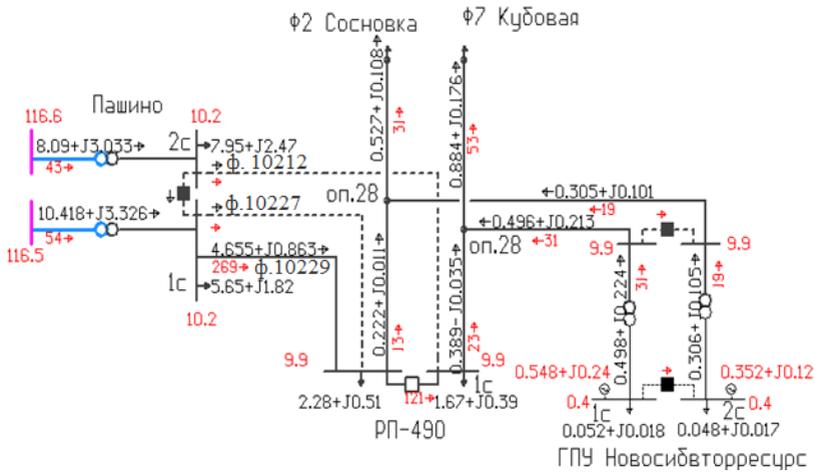


Рис. 2. Результат расчета режима – ремонт ф.10212 и отключение ф.10229

Fig. 2. The result of the calculation of the mode – the repair of feeder 10212 and the shutdown of feeder 10229

Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 3 и 4.

Таблица 2.

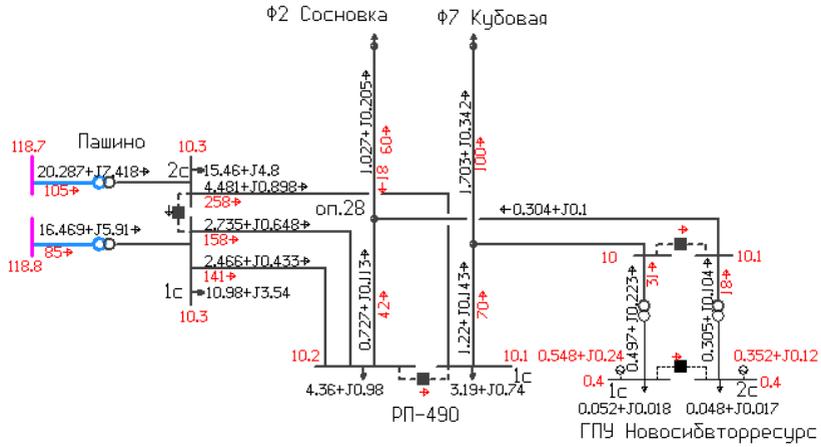
Расчетные значения мощности при оценке потерь

Table 2.

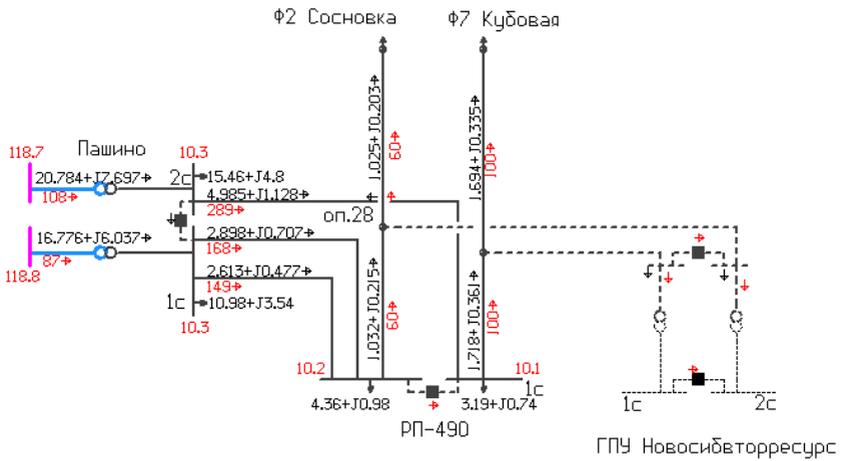
Estimated power values for loss estimation

	$P_{\text{потр}}$, МВт	ΔP , МВт	ΔP , %	Снижение потерь, %
Существующая схема	37,563	0,319	0,85	-
После ввода ГПУ. Вариант 1	37,658	0,282	0,75	12
После ввода ГПУ. Вариант 2	37,671	0,303	0,8	6

Результаты расчета подтверждают эффективность применения объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь даже в сети незначительной протяженности. Также выявлено, что для варианта 1, в котором объект генерации подключен дальше от центра питания, снижение потерь в два раза больше, чем в варианте 2. Таким образом, эффективность объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической энергии растет тем сильнее, чем дальше она подключается в сеть от центра питания.



(a)



(б)

Рис. 3. Нормальный режим. Вариант 1:
с учетом ввода ГПУ (а); без учета ввода ГПУ (б)

Fig. 3. Normal mode. Option 1:
taking into account the input of the GPU (a); without GPU (б)

IV. Использование объектов генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки в распределительной электрической сети

Режим работы объектов генерации на свалочном газе может быть принят не равномерным графиком, а повторять кривую потребления мощности потребителей, тем самым покрывая пики потребления и разгружая сетевое оборудование. Так, например, для рассматриваемого примера в пик потребления недопустим ремонт питающих РП-490 кабельных линий электропередачи – ф. 10229, ф. 10227, ф.10212, так как загрузка оставшихся в работе кабельных линий электропередачи – ф. 10229 и ф. 10227 – может превышать длительно допустимую и аварийно-допустимую величину (максимальная загрузка ф.10227 299 А, что составляет 121,6 % от длительно допустимого тока КЛ). Таким образом, в настоящее время для обеспечения возможности ремонта линий электропередачи требуется реконструкция сети с увеличением пропускной способности кабельных линий. Однако, анализируя график загрузки по ф. 10227 (рис. 5), можно сделать вывод, что ток нагрузки превышает допустимый ток только 4-5 часов в сутки, и проблему перегрузки можно решить не глобальной реконструкцией сети, а локальными мероприятиями в виде накопителя энергии, который будет отдавать запасаемую за сутки мощность в течение 4-5 пиковых часов.

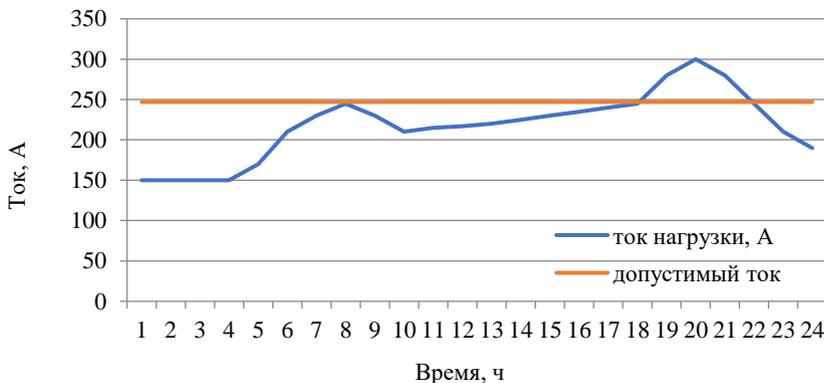


Рис. 5. Суточный график нагрузки по перегружаемой ЛЭП

Fig. 5. Daily load schedule for overloaded power lines

При этом электростанция на свалочном газе также может выполнять роль такого накопителя, поскольку в течение суток может выкачивать газ из тела полигона и сжигать его, вырабатывая электроэнергию не равномерным графиком, а в режиме работы накопителя – т.е. в ночные часы мини-

мума потребления снижать выдаваемую мощность, а в пиковые часы – увеличивать. Так, в рассматриваемом примере для обеспечения возможности ремонта сетевого оборудования требуется увеличение количества ГПУ с 5 до 8 единиц. Расчеты загрузки сети для разного количества ГПУ приведены в табл. 3.

Таблица 3.
Максимальная загрузки сети для разного количества ГПУ

Table 3.
Maximum load in network for different number of GPU

Элементы сети	Переток, МВА	Загрузка, А	I _{доп} , А	%
Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 5 блоков				
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10212)	4.491+J0.908	259	602	43,0
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10229)	откл.	-	280	-
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10227)	5.227+J1.105	300	247	121,6
КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.17) – оп.28 (ф.2)	1.023+J0.209	60	242	24,8
КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.7) – оп.28 (ф.7)	1.721+J0.363	100	342	29,3
ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №1	0.495+J0.212	30	375	8,0
ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №2	0.304+J0.1	18	375	4,8
Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 8 блоков				
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10212)	4.978+J1.115	300	602	50
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10229)	откл.	-	280	-
КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10227)	4.229+J0.656	244	247	99
КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.17) – оп.28 (ф.2)	1.023+J0.209	60	242	24,8
КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.7) – оп.28 (ф.7)	1.721+J0.363	100	342	29,3
ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №1	откл.	30	375	8,0
Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 8 блоков				
ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №2	1.294+J0.524	18	375	4,8

Проведенный расчет показал, что добавление трех ГПУ и перевод их всех на одну СШ полностью решают проблемы токовой перегрузки кабельных линий и обеспечивают возможность проведения ремонта.

Таким образом, с технической точки зрения использование объекта генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки и увеличения пропускной способности сети является эффективным. Для оценки экономической эффективности сравним затраты на увеличение количества ГПУ с 5 до 8 единиц с затратами на строительство классической системы накопления электрической энергии с использованием преобразователей энергии и аккумуляторных батарей. Оценка стоимости расширения электростанции приведена в табл. 4.

Таблица 4.
Максимальная загрузки сети для разного количества ГПУ

Table 4.
Maximum network load for different number of GPUs

Наименование	Кол-во	Цена, тыс. руб.	Капитальные затраты, тыс. руб.
ГПУ GazEcos ТМЗ 250 кВт	3	3 950	11 850
Глушитель низкошумный	3	150	450
Контейнер с технологическими системами	3	715	2 145
Пуско-наладочные работы	3	150	450
Итого			14 895

Для получения сопоставимого эффекта при использовании классической системы накопления электрической энергии с использованием преобразователей энергии и аккумуляторных батарей требуется система накопления мощностью 500 кВт и емкостью не менее 1500 кВтч. Приближенные капитальные затраты на реализацию такой системы накопления составят порядка 85 млн руб. (17500 тыс. руб. за преобразователь (принята удельная стоимость 35 тыс. руб. за кВт) и 67500 тыс. руб. за накопитель (принята удельная стоимость 45 тыс. руб. за кВтч).

Таким образом, технико-экономическая оценка показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки электрической сети более чем в 5 раз выгоднее применения классической системы накопления энергии при технически сопоставимых параметрах.

V. Заключение

В рамках проведенного исследования выполнена оценена эффективности использования объектов генерации на свалочном газе для повышения энергоэффективности за счет снижения потерь электрической энергии и выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети, которая подтвердила положительное влияние объектов генерации на свалочном газе на энергоэффективность. Подтверждена эффективность применения объектов генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической

энергии в распределительной электрической сети. Показано, что снижение потерь может составлять порядка 12 % даже в сети незначительной протяженности. При этом: чем дальше объект генерации устанавливается от центра питания, тем его эффективность выше.

Доказана эффективность использования объектов генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети. Оценка показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для этих целей экономичнее классической системы накопления электрической энергии более чем в пять раз.

© Жидков А.А., 2022

© Абасс А.З., 2022

© Аль Рикаби Х.Т., 2022

Поступила в редакцию 17.10.2022

Received 17.10.2022

Библиографический список

- [1] Постановление Правительства РФ от 03.06.2008 № 426 (ред. от 02.04.2021) “О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии”.
- [2] Постановление Правительства РФ от 17.02. 2014 № 117 “О некоторых вопросах, связанных с сертификацией объемов электрической энергии, производимой на функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии квалифицированных генерирующих объектах”.
- [3] Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ (ред. от 27.12.2018) “Об электроэнергетике” (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2019).
- [4] Bishnoi D., Prakash O., Chaturvedi H. Utilizing flared gas for distributed generation: An optimization based approach // AIP Conference Proceedings. 2019. 020007. DOI: 10.1063/1.5096498
- [5] El-Khattam W., Hegazy Y.G., Salama M.M.A. An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. № 20 (2). P. 1158-1165. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846114
- [6] Payasi R., Singh A. and Singh D. Review of distributed generation planning: objectives, constraints, and algorithms // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. № 3 (3). P. 133-153. DOI: 10.4314/ijest.v3i3.68430
- [7] Viral R., Khatod D.K. Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. № 16 (7). P. 5146–5165. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.020
- [8] Microturbines // WBDG. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wbdg.org/resources/microturbines> (дата обращения 28.11.2022).
- [9] Nath R.P., Balaji V.N. Artificial intelligence in power systems // IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE). 2014. DOI: 10.23883/ijrter.2018.4234.eywih

- [10] Reddy S.V., Swathi S. Optimal allocation and sizing of multiple distributed generation in distribution network by ant colony search algorithm // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2014. № 3 (1). P. 59-63.
- [11] Kaur P., Kaur S., Khanna R. Optimal placement and sizing of DG comparison of different techniques of DG placement // proc. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), July 4-6, 2016, Delhi, India. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853653
- [12] Talaat H.E.A., Al-Ammar E. Optimal allocation and sizing of Distributed Generation in distribution networks using Genetic Algorithms // proc. 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Oct. 17-19, 2011, Lisbon, Portugal. DOI: 10.1109/EPQU.2011.6128840
- [13] Heidari M., Nekoubin A., Heidari R., Jafari M. Optimum locating and sizing of DGs based on artificial ant colony algorithm // Research Journal of Recent Sciences. 2013. № 2 (12). P. 1-5.
- [14] Dezaki H., Abyaneh H., Agheli A., Mazlumi K. Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems // Journal of Electrical Engineering. 2012. № 63 (1). P. 47-52. DOI: 10.2478/v10187012-0007-9
- [15] Zhidkov A.A. Using electromagnetic continuously variable transmission in gas reciprocating power plant to ensure dynamic stability // proc. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 18-22, 2020, Sochi, Russia. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111923
- [16] Ачитаев А.А., Жидков А.А., Митрофанов С.В., Русина А.Г. Исследование управляемой гибкой связи турбины и генератора микроГЭС в автономной электроэнергетической системе // Электричество. 2020. № 1. С. 25-31. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-1-25-31
- [17] Ачитаев А.А., Русина А.Г., Жидков А.А., Евсеенко П.Н. Реализация проектов генерации на свалочном газе // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3 (43). С. 67-77.
- [18] Zhdanovich A.A., Zhidkov A.A. Analysis on the possibility for construction of a power plant using landfill gas in Novosibirsk Oblast // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Oct. 6-9, 2020, Vladivostok, Russia. P. 1-7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271216
- [19] Achitaev A.A., Eroshenko S.A., Rusina A.G., Zhidkov A.A., Evseenkov P.N. Landfill gas generation projects implementation // proc. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia. P. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [20] Dulău L.I., Abrudean M., Bică D. Optimal location of a distributed generator for power losses improvement // proc. 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, Jan., 2016, Tirgu-Mures, Romania. P. 734-739. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.01.032
- [21] Civanlar S., Grainger J.J., Yin H., Lee S.S.H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction // IEEE Transactions on Power Delivery. 1988. № 3 (3). P. 1217-1223. DOI: 10.1109/61.193906

References

- [1] Decree of the Government of the Russian Federation of 03.06.2008 no. 426 (as amended on 02.04.2021) “*O kvalifikacii generiruyushchego ob"ekta, funkcioniruyushchego na osnove ispol'zovaniya vozobnovlyаемых источников энергии [On the qualification of a generating facility operating on the basis of the use of renewable energy sources]*” (in Russia).
- [2] Decree of the Government of the Russian Federation of 17.02.2014 no. 117 “*O nekotorykh voprosakh, svyazannykh s sertifikaciej ob"emov elektricheskoy energii, proizvodimoy na funkcioniruyushchih na osnove ispol'zovaniya vozobnovlyаемых источников энергии kvalificirovannykh generiruyushchih ob"ektakh [On some issues related to the certification of volumes of electrical energy produced at qualified generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources]*” (in Russia).
- [3] Federal Law no. 35-FZ of March 26, 2003 (as amended on December 27, 2018) (red. ot 27.12.2018) “*Ob elektroenergetike [On the electric power industry]*” (as amended and supplemented from Jan. 1, 2019) (in Russia).
- [4] D. Bishnoi, O. Prakash and H. Chaturvedi, “Utilizing flared gas for distributed generation: An optimization based approach”, in proc. *AIP Conference Proceedings*, 020007, Apr. 2019. DOI: 10.1063/1.5096498
- [5] W. El-Khattam, Y.G. Hegazy and M.M.A. Salama, “An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1158-1165, May 2005. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846114
- [6] R. Payasi, A. Singh and D. Singh, “Review of distributed generation planning: objectives, constraints, and algorithms”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 133-153, Jul. 2011. DOI: 10.4314/ijest.v3i3.68430
- [7] R. Viral and D.K. Khatod, “Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5146-5165, Sep. 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.020
- [8] Microturbines [Online]. Available at: <https://www.wbdg.org/resources/microturbines> [Accessed: Nov. 28, 2022].
- [9] R.P. Nath and V.N. Balaji, “Artificial intelligence in power systems”, *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 2014. DOI: 10.23883/ijrter.2018.4234.eywih
- [10] S.V. Reddy and S. Swathi, “Optimal allocation and sizing of multiple distributed generation in distribution network by ant colony search algorithm”, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 59-63, 2014.
- [11] P. Kaur, S. Kaur and R. Khanna, “Optimal placement and sizing of DG comparison of different techniques of DG placement”, in proc. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, July 4-6, 2016, Delhi, India, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853653
- [12] H.E.A. Talaat and E. Al-Ammar, “Optimal allocation and sizing of Distributed Generation in distribution networks using Genetic Algorithms”, in proc. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Oct. 17-19, 2011, Lisbon, Portugal. DOI: 10.1109/EPQU.2011.6128840

- [13] M. Heidari, A. Nekoubin, R. Heidari and M. Jafari, "Optimum locating and Sizing of DGs based on artificial ant colony algorithm", *Research Journal of Recent Sciences*, vol. 2, no. 12, pp. 1-5, Dec. 2013.
- [14] H. Dezaki, H. Abyaneh, A. Agheli, and K. Mazlumi, "Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 47-52, Feb. 2012. DOI: 10.2478/v10187-012-0007-9
- [15] Zhidkov A.A., "Using Electromagnetic Continuously Variable transmission in gas reciprocating power plant to ensure dynamic stability", in proc. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 18-22, 2020, Sochi, Russia, pp. 1-6.
- [16] A.A. Achitaev, A.A. Zhidkov, C.V. Mitrofanov and A.G. Rusina, "Studying the controlled flexible coupling of the micro HPP turbine and generator operating in a self-contained electric power system", *Elektrichestvo*, no. 1, pp. 25-31, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-1-25-31
- [17] A.A. Achitaev, A.G. Rusina, A.A. Zhidkov and P.N. Evseenkov, "The implementation of the projects of generation on landfill gas", *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*, vol. 11, no. 3 (43), pp. 67-77, 2019.
- [18] A.A. Zhdanovich A.A. and A.A. Zhidkov, "Analysis on the possibility for construction of a power plant using landfill gas in Novosibirsk Oblast", in proc. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Oct. 6-9, 2020, Vladivostok, Russia, pp. 1-7.
- [19] A.A. Achitaev, S.A. Eroshenko, A.G. Rusina, A.A. Zhidkov and P.N. Evseenkov, "Landfill gas generation projects implementation", in proc. *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [20] L.I. Dulău, M. Abrudean and D. Bică, "Optimal location of a distributed generator for power losses improvement", in proc. *9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, Jan. 2016, Tirgu-Mures, Romania, pp. 734-739. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.01.032
- [21] S. Civanlar, J.J. Grainger, H. Yin and S.S.H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no.3, pp. 1217-1223, 1988. DOI: 10.1109/61.193906

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Жидков Алексей Александрович, аспирант Новосибирского государственного технического университета, Новосибирск, Россия

Абасс Ахмед Зкеар Абасс, кандидат технических наук, доцент Университета Васит в Эль-Куте, Васит, Ирак

Хайдер Т. Салим Аль Рикаби, доцент Университета Васит в Эль-Куте, Васит, Ирак

Alexey A. Zhidkov, graduate student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abass Ahmed Zkear Abass, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Wasit University, Wasit, Iraq

Haider Th. Salim Al Rikabi, associate professor of the Wasit University, Wasit, Iraq