

УДК 620.9

О.А. Иванин, Л.Б. Директор

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОГО НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Для удаленных районов России актуальной задачей является гарантированное обеспечение потребителей электрической и тепловой энергией, что связано с развитием малой распределенной энергетики. При проектировании систем электроснабжения с источниками малой генерации важным является выбор наиболее эффективной схемы. В статье представлены результаты сравнительной оценки нескольких вариантов реализации системы энергоснабжения поселка Жиганск (Якутия). Рассмотрены схемы с использованием газотурбинной установки (ГТУ) и газового водогрейного котла. Проведен сравнительный анализ схемы с когенерационной надстройкой ГТУ со схемой без надстройки. При этом выполнено моделирование как автономной работы системы энергоснабжения, так и работы с подключением к внешней электрической сети. Для расчета режимных карт работы оборудования и определения затрат на энергоснабжение поселка использовался алгоритм оптимизации схем и режимов работы комплексов малой распределенной энергетики на базе симплекс-метода. Для четырех характерных дней года проведено моделирование графиков тепловых и электрических нагрузок. Прогнозирование электрических нагрузок осуществлялось с использованием алгоритма на основе технологии искусственной нейронной сети. Тепловые нагрузки моделировались с учетом климатических данных для поселка и типовых графиков нагрузок системы горячего водоснабжения. Показано, что при заданных условиях схемы с когенерацией экономически на 24-25% эффективнее, чем схемы без когенерации, и на 20-21% эффективнее, чем схемы с централизованным электроснабжением. Установлено, что наиболее эффективной является когенерационная схема с подключением к внешней электросети.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, газотурбинная установка, малая энергетика, мини-ТЭЦ, оптимизация, распределенная генерация, энергоэффективность.

1. Введение

В энергетической стратегии России развитие малой распределенной энергетики определено как одно из ключевых направлений [1]. До 2/3 территории страны, на которых проживает около 2 млн человек, не охвачены системами централизованного энергоснабжения [2]. При этом большая часть этих территорий расположена в районах за полярным кругом, а также в Сибири и на Дальнем Востоке – в зонах сурового климата с продол-

жительной зимой. Отсюда вытекает необходимость гарантированного обеспечения не только электрической, но и значительной тепловой нагрузки потребителей. Типичными потребителями являются объекты жилищно-коммунального сектора, спецификой которых является выраженная неравномерность суточных и сезонных графиков нагрузок. При проектировании или модернизации схем энергоснабжения таких объектов необходима оценка эффективности каждого из возможных вариантов схемных решений.

Методика таких оценок должна учитывать данные о нагрузках потребителя, климатические особенности региона, характеристики энергетических установок, которые могут входить в состав рассматриваемого энергокомплекса. Для этого необходимо моделировать работу энергетического комплекса в течение временного отрезка, соответствующего заданному горизонту расчета, который должен составлять не менее 1 года, поскольку такова периодичность повторения погодных условий и, как следствие, энергетических нагрузок.

Задача настоящей работы – сравнение эффективности схем энергоснабжения с раздельным и совместным производством тепловой и электрической энергии для конкретного потребителя – поселка, расположенного в Якутии. Применение методов математического моделирования и оптимизации с учетом всех вышеперечисленных исходных данных позволит определить эффективность когенерации в каждом конкретном случае, оценить сроки окупаемости оборудования, а также целесообразность введения дополнительных установок в состав энергетического комплекса.

II. Постановка задачи

В качестве критерия эффективности выбрана величина совокупных затрат на энергоснабжение потребителя за расчетный период. При этом затраты разбиваются на постоянные, не зависящие от режима эксплуатации оборудования, и переменные, включающие затраты на топливо и покупку электроэнергии во внешней энергосети.

Объектом анализа является система энергоснабжения поселка Жиганск – административного центра Жиганского улуса Якутии. В качестве генерирующего оборудования выбрана газотурбинная установка ГТУ–2,5П производства ОДК «Пермские моторы». Характеристики ГТУ–2,5П представлены на официальном сайте производителя [3]. Номинальная электрическая мощность установки составляет 2,68 МВт, КПД в номинальном режиме – 21,1%, тепловая мощность когенерационной надстройки в номинальном режиме – 5,14 МВт.

Работа газотурбинной установки (ГТУ) моделировалась в режимах электрогенерации и когенерации, в обоих случаях рассматривались автономная работа системы энергоснабжения и работа в составе распределен-

тельной сети. Кроме того, для всех схем в состав оборудования входил пиковый водогрейный котел (ВК). Схема энергоснабжения п. Жиганск представлена на рис. 1.

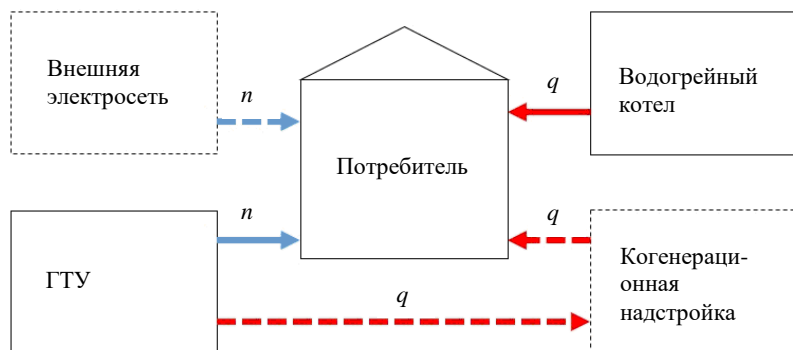


Рис. 1. Схема энергоснабжения поселка Жиганск:
 q – потоки тепловой энергии; n – потоки электрической энергии

III. Методика расчета

Величина переменных затрат определялась по результатам моделирования работы системы энергоснабжения в течение года (горизонт расчета) с использованием методики оптимизации схем и режимов работы энергетических комплексов на базе симплекс-метода [4-6]. Графики нагрузок потребителя, построенные для горизонта расчета, разбивались на часовые интервалы, в пределах которых нагрузки, а, следовательно, и мощности генерирующих установок полагались постоянными. Для каждого временного интервала была составлена система линейных уравнений, включающая балансовые уравнения для тепловой и электрической энергии, а также ограничения на мгновенные значения вырабатываемой мощности для каждой установки. Общая система уравнений и ограничений дополнялась выражением для целевой функции. В качестве параметров оптимизации выбраны значения мощности установок для каждого временного интервала. Используемый в расчетах метод линейного программирования (симплекс-метод) позволяет за ограниченное число итераций определить набор значений параметров оптимизации, соответствующий минимальному значению целевой функции, в данном случае выражающей величину затрат на энергоснабжение п. Жиганск. Этот набор представляет собой оптимальную режимную карту работы энергетического оборудования.

IV. Исходные данные

Поселок Жиганск – административный центр Жиганского улуса Якутии. Численность населения составляет 3451 чел, кроме того, потреби-

телями энергии являются промышленные предприятия. В качестве характерных дней были выбраны 4 дня, для которых среднее значение температуры наружного воздуха наиболее близко к его средней температуре в соответствующем сезоне. Для моделирования графиков тепловой нагрузки использовались данные по суточным изменениям температуры [7], а также типовые графики горячего водоснабжения жилых зданий [8] и данные по нормативному потреблению горячей воды [9]. Относительные графики электрических нагрузок были сгенерированы методом краткосрочного моделирования электрических нагрузок обособленных населенных пунктов на базе аппарата искусственных нейронных сетей [10]. Характерные для 4 сезонов графики нагрузок, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 2.

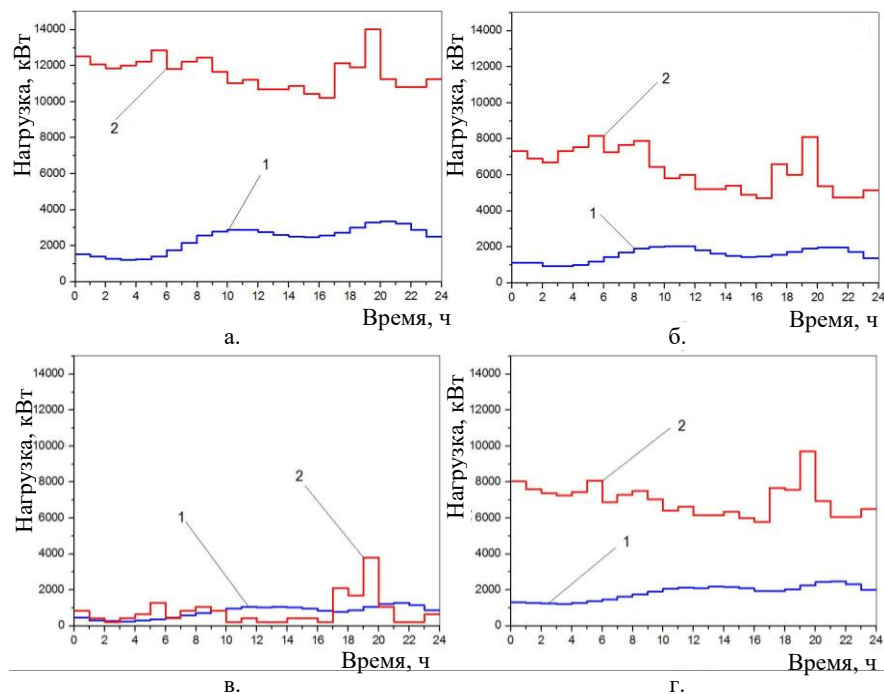


Рис. 2. Характерные графики нагрузок поселка Жиганск:
а – зимний день; б – весенний день; в – летний день; г – осенний день;
1 – электрическая нагрузка; 2 – тепловая нагрузка

Переменные затраты на энергоснабжение оценивались по затратам на топливо и покупку электроэнергии из внешней сети. Цена природного газа была принята равной 3,43 руб/м³. Предполагалось, что электроснабжение от внешней сети осуществляется по двухставочному тарифу: дневной – 2,42 руб/кВт·ч; ночной – 1,53 руб/кВт·ч. Постоянная составляющая затрат оценивалась как сумма капитальных затрат на оборудование и зарплату обслуживающего персонала. Затраты на ГТУ определялись как значение функции, аппроксимирующей зависимость удельной стоимости газотурбинных электростанций от их номинальной мощности, построенной для оборудования газотурбинных электростанций производства General electric мощностью до 50 МВт (рис. 3), и составили 634 \$/кВт или 103025 тысяч рублей. Назначенный ресурс работы установки составляет 120 000 часов (13,7 лет). Удельная стоимость ВК была выбрана равной 600 руб/кВт, исходя из предложений на отечественном рынке газовых ВК мощностью до 1 МВт. Удельная стоимость когенерационной надстройки принималась равной удельной стоимости газового котла, ресурс работы теплогенерирующего оборудования принимался равным 220 000 часов.

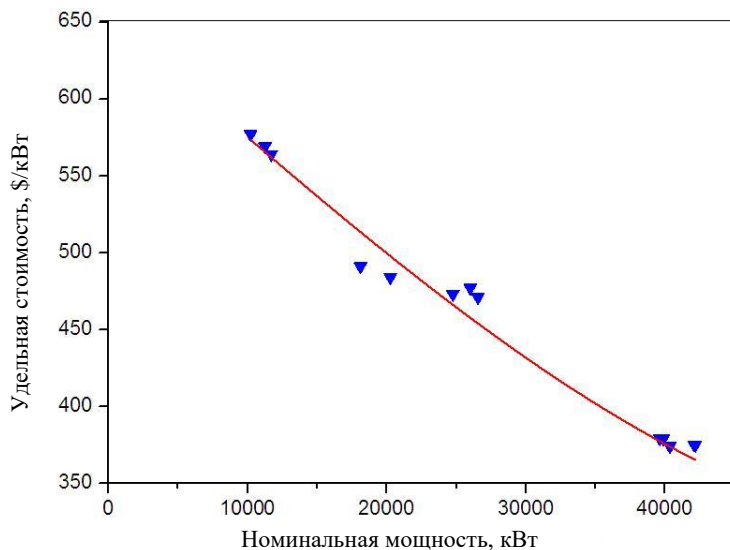


Рис. 3. Удельная стоимость газотурбинных электростанций производства General Electric в зависимости от их номинальной мощности:
точки – удельные стоимости газотурбинных электростанций General Electric;
кривая – аппроксимирующая зависимость

Численность персонала, занятого эксплуатацией энергетического оборудования, составляет 13 человек, что соответствует количеству персонала, обслуживающего энергетическую систему с аналогичным составом оборудования и схожей мощностью [11]. Среднемесячная заработная плата работников энергетической сферы согласно данным российского статистического ежегодника за 2017 год составила 39630 руб. [12]. Для сравнения рассчитаны затраты на энергоснабжение полностью от внешней электросети, а теплоснабжение – за счет газового ВК, номинальная мощность которого достаточно для покрытия пиковой тепловой нагрузки. При расчете затрат на выплату заработной платы работникам котельной число рабочих котельной принималось равным четырем.

Стоимость подключения к сети централизованного электроснабжения не учитывалась, поскольку затраты на такое подключение могут сильно варьироваться в зависимости от удаленности подключаемого потребителя от объектов сетевой инфраструктуры. Предполагалось, что потребитель подключен к электросети на момент принятия решения о сооружении электростанции.

V. Результаты расчетов

Результаты расчета затрат на годовое энергоснабжение п. Жиганск представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Затраты на энергоснабжение п. Жиганск, тыс. руб.

Схема энерго-снабжения	Составляющая затрат	Период				
		Зима	Весна	Лето	Осень	Год
КГУ+ВК+ +электрическая сеть	Постоянная	3484	3484	3484	3484	13939
	Переменная	11420	6823	3884	7502	29631
	Сумма	14905	10308	7369	10987	43570
КГУ+ВК	Постоянная	3484	3484	3484	3484	13939
	Переменная	11420	6823	4465	7502	30211
	Сумма	14905	10308	7950	10987	44150
ГТУ+ВК+ +электрическая сеть	Постоянная	3489	3489	3489	3489	13958
	Переменная	16769	10233	4235	11837	43075
	Сумма	20258	13722	7725	15327	57034
ГТУ+ВК	Постоянная	3489	3489	3489	3489	13958
	Переменная	16769	11107	5079	12271	45227
	Сумма	20258	14596	8569	15760	59185
Электрическая сеть +ВК	Постоянная	475	475	475	475	1902
	Переменная	21345	12858	4547	14869	53621
	Сумма	21821	13334	5022	15344	55523

Анализ результатов показывает, что и в автономном режиме эксплуатации энергокомплекса, и при возможности импорта электроэнергии из внешней сети минимальные затраты соответствуют схеме с когенерацией (КГУ). При отсутствии комбинированной выработки тепловой и электрической энергии совокупные затраты на энергоснабжение превышают затраты в базовом варианте. Режимные карты работы оборудования для наиболее эффективной схемы энергоснабжения, включающей когенерационную надстройку и предусматривающую подключение к внешней электросети, приведены на рис. 4.

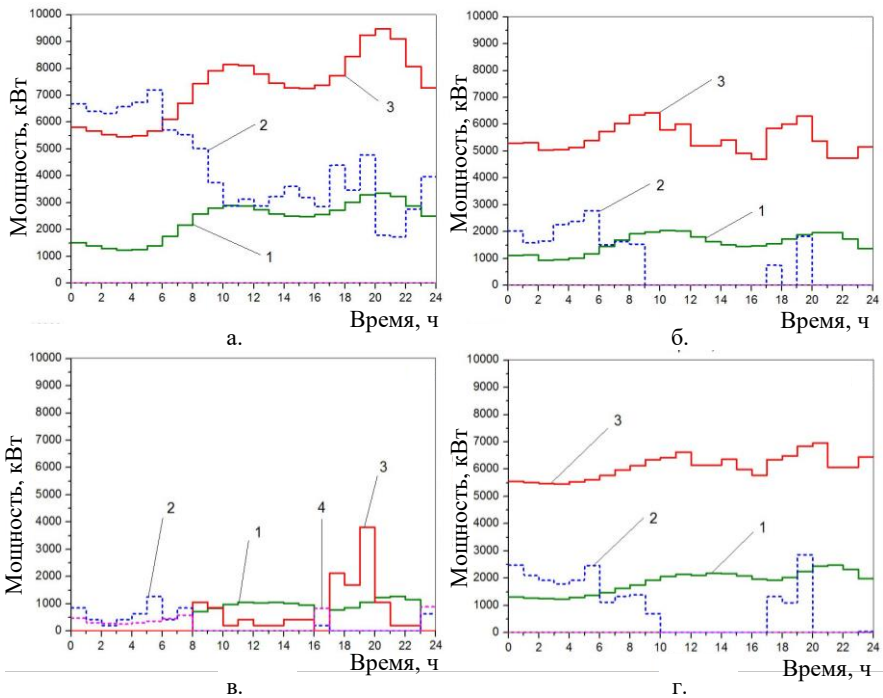


Рис. 4. Режимные карты работы системы энергоснабжения п. Жиганск.

Режимные карты соответствуют характерным суткам:

а – зимы; б – весны; в – лета; г – осени; 1 – КГУ (электроэнергия); 2 – ВК;

3 – КГУ (тепло); 4 – внешняя электрическая сеть

VI. Заключение

Результаты расчетов демонстрируют значительное преимущество когенерационных схемы перед схемой с раздельным производством тепловой и электрической энергии: совокупные затраты на энергоснабжение

для когенерационных схем на 24-25% ниже. Использование когенерационной схемы эффективнее схемы с электроснабжением из внешней сети на 20-21%.

Независимость затрат на энергоснабжение для схем с когенерацией от доступа к внешней энергосети для зимы, весны и осени объясняется экономической нецелесообразностью покупки электроэнергии из сети, в том числе, по сниженному ночному тарифу. Однако в ряде случаев подключение к внешней электрической сети позволяет избежать эксплуатации ГТУ в режимах с низкой производительностью и очень низким электрическим КПД, соответствующим этим режимам.

© Иванов О.А., 2018

© Директор Л.Б., 2018

Библиографический список

- [1] Энергетическая стратегия развития России до 2035 года // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf> (дата обращения: 31.10.2018).
- [2] Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. М.: Интеллект, 2011. – 167 с.
- [3] ГТУ – 2,5П // Официальный сайт ОДК «Пермские моторы» [Электронный ресурс]. URL: http://www.pnz.ru/products/gtu_energy/gtu_2_5p/ (дата обращения 31.06.2018).
- [4] Майков И.Л., Директор Л.Б. Решение задач оптимизации и управления гибридными энергетическими комплексами в структуре распределенной генерации // Управление большими системами. 2011. № 35. С. 250-264.
- [5] Директор Л.Б., Зайченко В.М., Майков И.Л., Иванов О.А. Анализ схем энергетических комплексов малой распределенной энергетики // Промышленная энергетика. 2014. № 2. С. 41-46.
- [6] Ivanin O.A., Director L.B. The solution of the optimization problem of small energy complexes using linear programming methods // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. vol. 774. no. 1. С. 1-8.
- [7] Архив погоды в Жиганске // Погода в 243 странах мира [Электронный ресурс]. URL: https://gr5.ru/Архив_погоды_в_Жиганске (дата обращения 31.06.2018).
- [8] Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 1999. – 472 с.
- [9] Ведомственные нормы технологического проектирования: ВНТП – Н – 97 – Нормы расходов воды потребителей систем сельскохозяйственного водоснабжения: нормативно – технический материал. М.: Союзводпроект, 1997.
- [10] Иванов О.А., Директор Л.Б. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей // Теплоэнергетика. 2018. №5. С. 17-26.

- [11] Газотурбинная установка малой мощности // Материалы сайта АО СКБ «Турбина» [Электронный ресурс]. URL: <http://gasturbina.ru/malaya-gazoturbinnaya-ustanovka.pdf> (дата обращения 31.06.2018).
- [12] Российский статистический ежегодник 2017: статистический сборник, Суринова А.Е. М.: Росстат, 2017. – 688 с.

O.A. Ivanin, L.B. Director

**ASSESSMENT OF EFFICIENCY
OF GAS-TURBINE-BASED ELECTRICAL SUPPLY
SYSTEM FOR RURAL SETTLEMENT**

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Abstract. The urgent task for remote regions of Russia is to ensure the supply of electricity and heat to consumers. The solution to this problem is associated with the development of a small distributed energy. It is important to choose the most efficient scheme when designing power supply systems with small generation sources. The article presents the results of a comparative assessment of several options for the implementation of the power supply system of the village Zhigansk (Yakutia). The schemes with the use of a gas turbine and a gas boiler are considered. A comparative analysis of the scheme with a cogeneration superstructure of a gas turbine unit with a scheme without a superstructure was carried out. The simulations of autonomous operation of the power supply system and work with connection to an external electrical network was performed. An algorithm to optimize the circuits and operating modes of small distributed power systems based on the simplex method was used to calculate the operating maps of the equipment and determine the cost of energy supply of the village. The modeling of heat and electric load graphs was performed for the four characteristic days of the year. Prediction of electrical loads was carried out using an algorithm based on artificial neural network technology. Heat loads were simulated taking into account climate data for the settlement and typical load schedules of the hot water supply system. It is shown that schemes with cogeneration are economically 24-25% more efficient than schemes without cogeneration, and 20-21% more efficient than schemes with centralized power supply. It has been established that the most efficient is cogeneration scheme with connection to an external power grid.

Keywords: autonomous energy supply, distributed generation, energy efficiency, gas-turbine unit, low power energetics, mini CHP, optimization.

References

- [1] Energy development strategy of Russia until 2035. [Online]. Available at: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf>. [Accessed: June 31, 2018].
- [2] V.E. Fortov and O.S. Popel, Energy in the modern world. Moscow: Intellekt, 2011.
- [3] GTU – 2,5P. «Permskiye Motori» official website. [Online]. Available at: http://www.pmz.ru/products/gtu_energy/gtu_2_5p/. [Accessed: June 31, 2018].
- [4] I.L. Maikov and L.B. Direktor, «Solving optimization and control problems of hybrid power systems in structure of the distributed generation», Large-Scale Systems Control, vol. 35, pp. 250-264, 2011.
- [5] L.B. Direktor, V.M. Zaichenko, I.L. Maikov and O.A. Ivanin, «Analysis of power circuits of small distributed energy», Industrial Power Engineering, vol. 2, pp. 41-46, 2014.
- [6] O.A. Ivanin, L.B. Direktor, «The solution of the optimization problem of small energy complexes using linear programming methods», J. Phys.: Conf. Ser. vol. 774, no. 1, pp. 1-8, 2016.
- [7] Archive of weather in Zhigansk. [Online]. Available at: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Жиганске. [Accessed: June 31, 2018].
- [8] E.Ya. Sokolov, Heat supply and networks. Moscow: MPEI, 1999.
- [9] Standards of water consumption of consumers of agricultural water supply systems: regulatory and technical material. Moscow: Soyuzvodproekt, 1997.
- [10] O.A. Ivanin and L.B. Direktor, «The use of artificial neural networks for forecasting the electric demand of stand – alone consumers», Thermal Engineering, vol. 65, no. 5, pp. 258-265, 2018.
- [11] Gas-turbine unit of low power. [Online]. Available at: <http://gasturbina.ru/malaya-gazoturbinaya-ustanovka.pdf>. [Accessed: June 31, 2018].
- [12] «Russian statistical yearbook 2017», in Statistical compilation, A.E. Surinov, Moscow: Rosstat, 2017.