

## МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНО ОБОСОБЛЕННОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Хамитов Р.Н., Ковалев В.З., Архипова О.В., Есин С.С.

*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, e-mail: v\_kovalev@ugrasu.ru*

Рассматривается класс изолированных электроэнергетических систем, построенных на базе дизельных электростанций, возобновляемых источников энергии. Выявлен основной признак данного класса систем – наличие бизнес-связей. Показано, что требования к надежному и энергоэффективному электроснабжению приводят к формированию в населенных пунктах электротехнических комплексов, содержащих: несколько дизель-генераторных установок (ДГУ), как правило, различной мощности, системы аккумулирования электрической энергии, системы управления и возобновляемые источники энергии. Эксплуатация комплексов, построенных на ДГУ, в северных регионах имеет ряд особенностей обусловленных совокупностью причин как экономического характера, так и социотехнических. Известные пути решения, указанной проблемы, авторы предлагают дополнить системным учетом графиков электрической нагрузки потребителей. Показано, что бизнес-связи влияют как на интегральные показатели указанной совокупности (энергоэффективность, уровень экологичности производства электроэнергии, себестоимость производства электроэнергии), так и на структуру и принципы построения и функционирования каждой из изолированных систем электроснабжения данной совокупности на протяжении всего жизненного цикла. Показана необходимость оптимизации всей совокупности изолированных систем электроснабжения, входящих в «Регионально обособленный электротехнический комплекс», на протяжении всего жизненного цикла с позиций анализа и детального учета графиков электропотребления.

**Ключевые слова:** изолированные энергетические системы, бизнес-связи, электрическая нагрузка, энергоэффективность

## MODEL OF A REGIONALLY ISOLATED ELECTROTECHNICAL COMPLEX WITH REGARD TO ELECTRIC LOAD SCHEDULES OF CONSUMERS

Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Arkhipova O.V., Esin S.S.

*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, e-mail: v\_kovalev@ugrasu.ru*

The class of the isolated electrical power systems constructed based on diesel power plants and renewables is considered. The main sign of this class of systems – existence business – communications is revealed. The known solutions, the specified problem, authors suggest to complement with system accounting of schedules of electric load of consumers. It is shown that the requirements for reliable and energy-efficient power supply lead to the formation in the settlements of electrical systems containing: several diesel generator sets, usually of different power, electrical energy storage systems, control systems and renewable energy sources. The operation of the complexes built on diesel-generator sets in the northern regions has a number of features due to a combination of reasons, both economic and socio-technical. Known solutions to this problem, the authors propose to supplement the system-based electrical load graphs of consumers. It is shown that business – communications influence, as on integrated indicators of the specified set (energy efficiency, level of environmental friendliness of electricity generation, cost of production of the electric power), and on structure and the principles of construction and functioning of each of the isolated power supply systems of this set throughout all life cycle. Need of optimization of all set of the isolated power supply systems entering in «Regionally isolated electrotechnical complex» throughout all life cycle from positions of the analysis and detailed accounting of schedules of a power consumption is shown.

**Keywords:** isolated energy systems, business affairs, electrical load, energy efficiency

Большая часть территории Российской Федерации характеризуется отсутствием значительных концентраций населения. Как правило, это небольшие населенные пункты с числом жителей от 50 до 200 чел. Причем указанные поселения расположены на значительном удалении друг от друга и вне зоны централизованного электроснабжения. По данным [1, 2] таких поселений более 31000, расположенных на более 2/3 всей площади страны, где проживает более 11 млн населения. Характерной в этом плане является Республика Саха – более 130 поселений с общей установленной мощностью 210 МВт, Якутия, Бурятия,

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра и другие северные территории. Типовое решение задачи электроснабжения в данном случае строится на применении дизель-генераторных установок (ДГУ). Требования надежности электроснабжения, требования энергоэффективности приводят к формированию в населенных пунктах электротехнических комплексов содержащих: несколько ДГУ, как правило различной мощности [3], системы аккумулирования электрической энергии, системы управления и потребителя.

Эксплуатация комплексов, построенных на ДГУ в северных регионах, имеет ряд осо-

бенностей, обусловленных совокупностью причин как экономического характера, так и социотехнических:

- высокая стоимость дизельного топлива в месте потребления, вызванная сложной транспортной логистикой (вплоть до использования вертолетного транспорта);

- отсутствие электрической связи с центральной энергетической системой или с крупными региональными сетями;

- кадровый «голод» в местах производства электрической энергии;

- агрессивные природно-климатические условия эксплуатации;

- высокие требования к экологичности процесса производства электрической энергии, особенно в местностях приравненных к районам Крайнего Севера;

- социальная защищенность коренных и малочисленных народов, проживающих на удаленных территориях;

- высокая себестоимость электроэнергии, произведенной ДЭУ.

Один из путей решения выявленных выше противоречий – включение в комплексы производства электрической энергии возобновляемых источников энергии (ВИЭ): ветро-генераторных установок (ВЭУ), фотоэлектрических панелей (ФП), микрогидроэлектростанции (МГЭС), и других [4]. Для таких комплексов, содержащих кроме ДГУ еще и ВИЭ, принято наименование – гибридные источники электрической энергии (ГИЭЭ) [5].

На процесс энергопреобразования, при работе ГИЭЭ, оказывает существенное влияние характер нагрузки потребителя. Соответственно, возникает необходимость оптимизировать, по некоторому критерию (например, энергоэффективность) состав всех элементов, входящих в ГИЭЭ и участвующих в процессе энергопреобразования.

В настоящее время все более активно применяются методики управления ГИЭЭ, базирующиеся на краткосрочных прогнозах, в том числе и с применением наукастинга (сверхкраткосрочный прогноз метеословий).

Совокупность указанных выше обстоятельств делает актуальным построение модели ГИЭЭ с учетом графиков электрической нагрузки потребителей.

Еще одной характерной особенностью рассматриваемого класса ГИЭЭ является сочетание «физической» изолированности отдельных источников (отсутствие электрической связи) с административной или корпоративной принадлежностью отдельных комплексов одному «владельцу».

Введем в рассмотрение понятие «Регионально обособленный электротехнический

комплекс (РОЭТК)» – обособленная совокупность изолированных систем электроснабжения, характеризующаяся отсутствием электрической связи между отдельными изолированными системами электроснабжения, при одновременном наличии «слабых связей» и «слабых взаимодействий» между всеми изолированными системами электроснабжения, входящими в данную совокупность, и значительными отклонениями характеристик потребления электрической энергии от «типовой».

Отметим, что данное определение является развитием подходов, сформулированных в работах [6, 7].

Цель данной работы – построение модели регионально обособленного электротехнического комплекса с учетом графиков электрической нагрузки потребителей.

Задачи:

1. Выявить особенности характеристик потребления электрической энергии ГИЭЭ, входящих в РОЭТК.

2. Выявить возможность «типизации» характеристик потребления электрической энергии ГИЭЭ, входящих в РОЭТК.

3. Выявить структуру модели регионально обособленного электротехнического комплекса с учетом графиков электрической нагрузки потребителей.

### Материалы и методы исследования

Исходными данными являются данные об электрических нагрузках децентрализованной зоны электроснабжения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры за 2017–2018 гг.

В период проведения исследования в децентрализованную зону входило 24 населенных пункта в семи районах округа. Электроснабжение осуществлялось от дизельных электростанций (ДЭС). Установленная мощность ДЭС от 5000 кВт (с. Саранпауль) до 36 кВт (д. Таурова). В 2018 г. в д. Николкина установлена солнечно-дизельная электростанция. Средняя установленная мощность ДЭС порядка 300 кВт [8].

Дальнейшему исследованию подлежит 21 населенный пункт с непрерывным характером электроснабжения. Населенные пункты с прерывистым электроснабжением остаются за рамками настоящего исследования.

Первый этап – изучение характеристик электропотребления. Применим для этого аппарат суточных графиков электрической нагрузки (СГЭН) [9, 10]. Ряд исследователей вводят в рассмотрение типовые суточные графики электрической нагрузки. Это справедливо при анализе единичных поселений или поселений близких по укладу хозяйствования и соответственно структуре электропотребления. При этом вне рассмотрения остается эффект «бизнес-связей» или «слабых связей», что значительно влияет на формирование критериев оптимального состава оборудования ГИЭЭ.

Следующий фактор, требующий детального исследования СГЭН, прогнозирование потре-

ния электрической нагрузки, в целях оптимального управления ГИЭЭ. При этом появляется возможность существенно повысить как ресурс ДЭУ, входящих в состав ГИЭЭ, так и снизить общее (для всего РОЭТК) потребление дизельного топлива [11, 12].

Основные закономерности графиков суточных нагрузок для РОЭТК ХМАО – Югра отражены в табл. 1 и 2, соответственно суточный график электрических нагрузок летний и суточный график электрических нагрузок зимний.

Таблица 1

Суточная электрическая нагрузка. Лето

Населенный пункт	W, кВт*ч	Рср, кВт	Рск, кВт	Рm, кВт	Км	Кз.г.	Кф.г.
Саранпауль	16635	693,1	720,0	1182	1,71	0,586	1,04
Кедровый	6936	289,0	301,6	375	1,30	0,771	1,04
Сосьва	6293	262,2	272,9	418	1,59	0,627	1,04
Урманый	3658	152,4	157,0	190	1,25	0,802	1,03
Шугур	3618	150,8	155,4	194	1,28	0,779	1,03
Няксимволь	2724	113,5	117,4	162	1,43	0,701	1,03
Кирпичный	2617	109,0	113,2	150	1,38	0,727	1,04
Корлики	2440	101,7	108,0	154	1,51	0,660	1,06
Елизарово	2300	95,9	104,2	172	1,79	0,557	1,09
Ванзеват	1852	77,2	79,5	100	1,30	0,772	1,03
Б. Атлым	1832	76,3	79,6	108	1,41	0,707	1,04
Согом	1801	75,0	88,5	101	1,35	0,743	1,18
Горнореченск	1340	55,8	58,5	86	1,54	0,649	1,05
Ломбовож	1270	52,9	56,3	90	1,70	0,588	1,06
Кимкъясуй	506	21,1	21,9	30	1,42	0,702	1,04
Анеева	388	16,2	16,7	21	1,30	0,770	1,03
Сартынья	309	12,9	13,3	16	1,24	0,805	1,03
Тугияны	214	8,9	11,4	21	2,36	0,424	1,28
Нумто	146	6,1	9,3	17	2,79	0,358	1,53
Пашторы	125	5,2	6,6	10	1,92	0,521	1,27
Карым	106	4,4	4,6	5,6	1,27	0,789	1,03

Таблица 2

Суточная электрическая нагрузка. Зима

Населенный пункт	W, кВт*ч	Рср, кВт	Рск, кВт	Рm, кВт	Км	Кз.г.	Кф.г.
Саранпауль	37853	1577,2	1619,0	1817	1,15	0,868	1,03
Кедровый	17268	719,5	736,8	809	1,12	0,889	1,02
Сосьва	14640	610,0	625,3	732	1,20	0,833	1,03
Согом	10319	430,0	440,2	490	1,14	0,877	1,02
Урманый	10267	427,8	440,3	539	1,26	0,794	1,03
Корлики	8395	349,8	359,0	394	1,13	0,888	1,03
Елизарово	7221	300,9	312,5	401	1,33	0,750	1,04
Няксимволь	6660	277,5	285,3	346	1,25	0,802	1,03
Шугур	6470	269,6	277,4	327	1,21	0,824	1,03
Кирпичный	6459	269,1	277,4	324	1,20	0,831	1,03
Б. Атлым	4718	196,6	201,9	247	1,26	0,796	1,03
Ванзеват	3684	153,5	157,4	178	1,16	0,862	1,03
Горнореченск	2661	110,9	113,9	135	1,22	0,821	1,03
Ломбовож	1893	78,9	82,9	121	1,53	0,652	1,05
Анеева	1427	59,5	60,9	69	1,16	0,862	1,03
Кимкъясуй	1019	42,5	43,9	58	1,37	0,732	1,03
Карым	673	28,0	29,0	40	1,43	0,701	1,04
Сартынья	358	14,9	15,4	18	1,21	0,829	1,03
Тугияны	285	11,9	15,3	33,6	2,83	0,354	1,29
Нумто	168	7,0	10,8	20	2,86	0,350	1,54
Пашторы	149	6,2	7,9	12	1,93	0,517	1,27

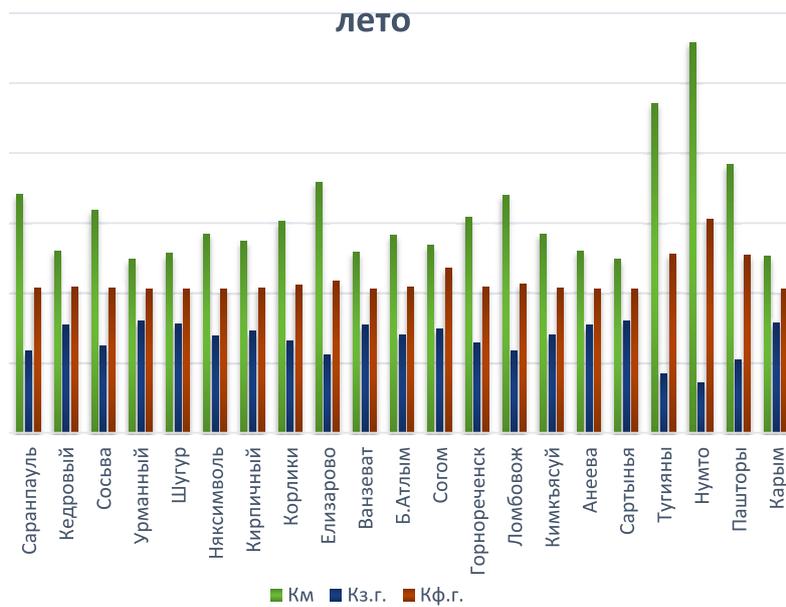


Рис. 1. Интегральные параметры суточных графиков электрической нагрузки, лето

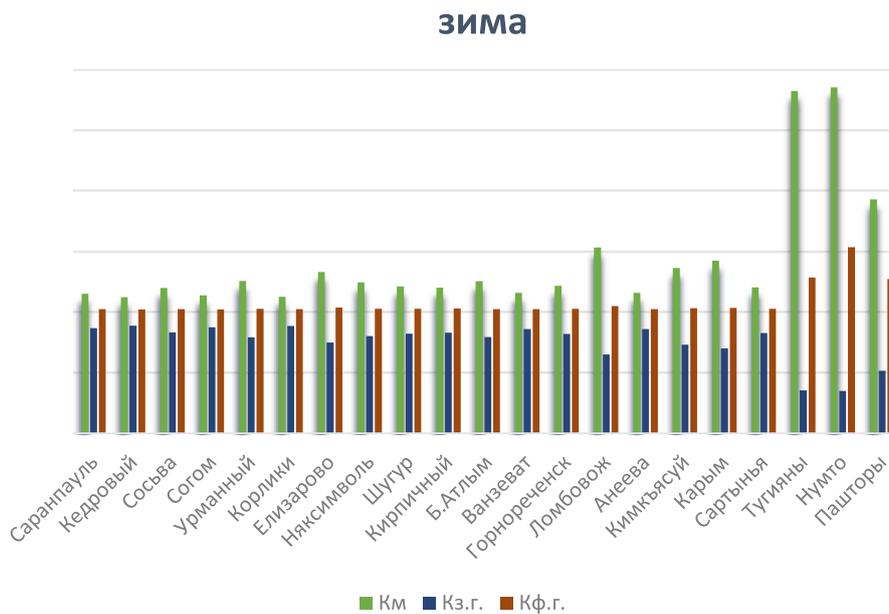


Рис. 2. Интегральные параметры суточных графиков электрической нагрузки, зима

Динамика интегральных параметров отражена на рис. 1 и 2:

Км – коэффициент максимума, устанавливает связь между средней и максимальной нагрузкой;

Кз.г. – коэффициент заполнения графика, коэффициент обратный коэффициенту максимума;

Кф.г. – коэффициент формы графика, характеризует степень неравномерности графика нагрузки;

W, кВт\*ч – суточная энергия потребленная поселением;

Ср, кВт – средняя суточная мощность электростанции поселения;

Ср, кВт – среднеквадратичная мощность;

Рм, кВт – максимальная мощность.

Энергетический подход к математическому моделированию электротехнических комплексов и систем, развиваемый в работе [6] и базирующийся на формализме Лагранжа, с неукоснительностью приводит к построению исходных математических моделей основных взаимодействующих физиче-

ски разнородных энергопреобразующих элементов РОЭТК, структурно состоящих из системы дифференциальных и системы алгебраических уравнений в следующем виде:

$$\frac{dU_*^T}{dt} = f(Q_\Sigma, Q_b, t), \quad (1)$$

$$U_*^T = U_*^T(Q_\Sigma, Q_b), \quad (2)$$

где  $Q_\Sigma$  и  $Q_b$  – векторы обобщенных координат и обобщенных скоростей, содержат (например, в виде ряда Фурье) информацию о графике нагрузки каждого ГИЭЭ, входящего в РОЭТК.

### Результаты исследования и их обсуждение

Все интегральные коэффициенты (табл. 1, 2) характеризуются значительными разбросами:  $K_m$  – от 1,02 до 1,54 – зимой, и 1,03–1,53 летом;  $K_{з.г}$  – от 0,35 до 0,889 зимой и 0,358 – 0,805 летом;  $K_{ф.г}$  – от 1,13 до 2,86 – зимой, и 1,24–2,79 летом. Особенно значительны отличия в зимнем коэффициенте заполнения графика  $K_{з.г}$  – порядка 254 %!

Выявленное обстоятельство не позволяет применять для моделирования РОЭТК в форме уравнений (1)–(2) « типовые » графики суточной нагрузки, поскольку достоверность прогноза графика нагрузки здесь существенно меньше рекомендованной в [13] достоверности в 80 %.

### Выводы

1. Выявлен значительный (до 254 %) разброс интегральных характеристик суточных графиков потребления электрической энергии ГИЭЭ, входящих в РОЭТК.

2. Выявлена, для анализируемого РОЭТК, невозможность построения « типовых » характеристики потребления электрической энергии ГИЭЭ, входящих в РОЭТК. Как следствие, для достоверного краткосрочного прогноза электропотребления электрической нагрузки отдельным поселением, необходимо в модель регионально обособленного электротехнического комплекса включить « персонифицированные » графики, например в виде ряда Фурье, поскольку « типовые » будут содержать в себе кратные разбросы по отдельным показателям, что приводит к мало достоверным прогнозам.

3. Выявлена структура и построена модель регионально обособленного электротехнического комплекса с учетом, например, в форме ряда Фурье индивидуальных графиков электрической нагрузки потребителей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства ХМАО – Югры в рамках научного проекта № 18-47-860017.*

### Список литературы

1. Суржикова О.А. Региональные энергетические программы и электроснабжение удаленных, малонаселенных поселений // Вестник науки Сибири. 2012. № 3 (4). С. 109–113.
2. Елистратов В.В. Автономное энергоснабжение энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2016. № 3 (171). С. 72–75.
3. Карамов Д.Н. Оптимизация состава оборудования автономных энергокомплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Иркутск, 2016. 26 с.
4. Ковалев В.З., Архипова О.В. Энергетические аспекты регионально обособленного электротехнического комплекса // Вестник Югорского государственного университета. 2015. № 2 (37). С. 217–218.
5. Григораш О.В., Кривошей А.А., Смык В.В. Автономные гибридные электростанции // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 124 [Электронный ресурс]. URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/10/pdf/95.pdf> (дата обращения: 06.12.2018).
6. Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Mathematical modeling of regional isolated electrotechnical complex // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. vol. 12. no 16. P. 5481–5484.
7. Архипова О.В., Ковалев В.З., Ремизов П.Н. Моделирование автономных энергетических систем // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=16838> (дата обращения: 06.12.2018).
8. Стратегия социально-экономического развития Ханты-Мансийского автономного округа – Югры до 2020 года и на период 2030 года: Официальный сайт Департамента экономического развития Ханты-Мансийского автономного округа – Югры [Электронный ресурс]. URL: [https://dereconom.admhmao.ru/upload/iblock/d92/101\\_gr.pdf](https://dereconom.admhmao.ru/upload/iblock/d92/101_gr.pdf) (дата обращения: 11.12.2018).
9. Воропай Н.И., Стычински З.А., Козлова Е.В., Степанов В.С., Сулов К.В. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 1. С. 84–90.
10. Болоев Е.В., Войтов О.Н., Голуб И.И., Семенова Л.В. Алгоритм оптимизации реконфигурации и суточных графиков нагрузки распределительной электрической сети // Изв. РАН. Энергетика. 2018. № 1. С. 25–34.
11. Ivanin O.A., Direktor L.B. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 17–26. DOI: 10.1134/S0040363618050041.
12. Lukutin B.V., Shandarova E.B., Matukhin D.L., Igisenov A.A., Shandarov S.M. Simulation and optimization of wind and diesel power supply systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. № 177 (1). 012090. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012090.
13. Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шуртов Е.А. Исследование закономерностей формирования графиков электрических нагрузок децентрализованных потребителей Республики Саха (Якутия) // Электрические станции. 2008. № 9. С. 53–58.