

Оптимальный режим работы многоагрегатной дизельной электростанции

Васильева А. А.¹, инженер-исследователь,
 Васьков А. Г.², к.т.н., зав. лабораторией,
 Сигель А. С.³, инженер-исследователь (“СУ СДК” ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”),
 Шестопалова Т. А.⁴, к.т.н., зав. кафедрой (ГВИЭ ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”),
 Шуркалов П. С.⁵, к.т.н., старший научный сотрудник
 (“СУ СДК” ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”)

В статье рассмотрены способы математического моделирования зависимостей расхода топлива от загрузки дизельных генераторных установок, учёт которых при моделировании режимов работы солнечно-дизельных энергокомплексов может позволить снизить потребление дизельного топлива и количество часов работы дизельных генераторов.

Ключевые слова: оптимизация, дизельная электростанция, солнечно-дизельный энергокомплекс, удельный расход топлива, распределение нагрузки.

Optimal operation of the diesel power plant

Vasileva A. A.¹, research engineer of CSSDC laboratory,
 Vaskov A. G.², PhD, head of CSSDC laboratory,
 Siegel A. S.³, research engineer of CSSDC laboratory,
 Shestopalova T. A.⁴, PhD, head of HRES department,
 Shurkalov P. S.⁵, PhD, senior researcher of CSSDC laboratory (MPEI).

The article considers methods of mathematical modeling of dependencies of fuel consumption on the load of diesel generating sets, the accounting of which in modeling the modes of operation of solar-diesel energy complexes can reduce the consumption of diesel fuel and the number of hours of operation of diesel generators.

Keywords: optimization, diesel power plant, solar-diesel power complex, specific fuel consumption, load distribution.

Проблема эксплуатации дизельных электростанций в России. В России остро стоит проблема энергоснабжения отдалённых населённых пунктов, не имеющих присоединения к объединённой энергосистеме. Согласно [1], изолированные объекты генерации существуют в 23 регионах страны. Чаще всего в составе изолированных энергетических систем в качестве основного источника энергии используются дизельные электростанции (ДЭС).

Общей проблемой эксплуатации всех ДЭС является высокий расход топлива, что приводит к повышенным эксплуатационным расходам. Существует несколько способов снижения объёмов использования дорогостоящего топлива. Например, можно заменить устаревшее оборудование действующей электростанции на более современное или же внедрить энергосберегающие технологии.

Кроме того, прибегают к строительству гибридных электростанций, где к основному генерирующему оборудованию ДЭС добавляется вспомогательное генерирующее оборудование (ветро- или солнечная электростанция). Электростанции на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволяют чаще отключать дизель-генераторы, либо частично их разгружать, что даёт выигрыш в абсолютном расходе дизельного топлива. Однако ввиду того, что величина удельного расхода топлива ДЭС во многом определяется распределением мощности между включёнными в работу дизельными агрегатами, удельный расход дизельного топлива той или иной дизельной генераторной установки (ДГУ) из-за этого может увеличиваться, то есть оборудование будет работать менее эффективно.

Согласно [2] для ДГУ, работающих параллельно друг с другом или в составе крупной энергосистемы, распределение нагрузки активной мощности (кВт) является функцией регулятора двигателя, а распределение реактивной мощности (кВАр) — функцией возбуждения генератора. Поэтому данный вопрос, как правило, изучается по-отдельно-

¹ VasilyevaAA@mpei.ru

² VaskovAC@mpei.ru

³ SigelAS@mpei.ru

⁴ ShestopalovaTA@mpei.ru

⁵ ShurkalovPS@mpei.ru

сти. Однако в контексте данной статьи наибольший интерес представляет именно распределение активной мощности между ДГУ, в связи с чем вопрос распределения реактивной мощности далее не рассматривается.

Математическое моделирование ДГУ. На сегодняшний день существуют разные модели, которые используются для математического моделирования ДГУ. Из их общего числа можно выделить два вида математического моделирования:

- поэлементное моделирование ДГУ;
- моделирование ДГУ посредством расчёта величины потребляемого топлива.

Поэлементное математическое моделирование ДГУ в основном применяется для анализа переходных процессов, происходящих в энергосистеме с дизельными генераторами. Для оценки режимов работы энергетических комплексов, в состав которых входят ДГУ, настолько детальное моделирование редко применяется.

Моделирование ДГУ посредством расчёта величины потребляемого ими топлива является гораздо более простым способом. Так расход топлива дизель-генератора зависит от номинальной мощности генератора и фактической выходной мощности, выдаваемой им. Использование кривой расхода топлива, предоставляемой производителем ДГУ, является точным способом определения расхода топлива при любой нагрузке дизель-генератора. Однако, как правило, в паспортных характеристиках ДГУ производители указывают лишь значение расхода топлива при номинальной мощности и не включают саму кривую расхода топлива. Особенно это касается генераторов малой мощности [3].

Для решения этой проблемы существует несколько способов расчёта расхода топлива дизель-генератора:

- расчёт с использованием эмпирических коэффициентов;
- расчёт в соответствии с методикой, утвержденной Министерством энергетики Российской Федерации [4];
- расчёт в соответствии с методикой компании АО “Лонмади” [5].

Расчёт с использованием эмпирических коэффициентов. Согласно [3] расход топлива ДГУ в л/ч может быть рассчитан по формуле (1):

$$FC_G = A_G P_G + B_G P_{R-G}, \quad (1)$$

где P_G, P_{R-G} — соответственно выходная и номинальная мощности ДГУ (кВт); A_G, B_G — коэффициенты, рассчитываемые по кривой расхода топлива [л/(кВт · ч)].

Как правило, значения коэффициентов A_G и B_G принимаются следующими: $A_G = 0,246$ л/(кВт · ч) и $B_G = 0,08145$ л/(кВт · ч) [3]. Согласно [6], результаты расчёта расхода топлива ДГУ по этим значениям хорошо согласуются с предоставляемыми производителями дизель-генераторов значениями расходов при номинальной мощности ДГУ.

Для перерасчёта расхода топлива в удельный расход условного топлива [гр.у.т./кВт · ч] используется формула (2):

$$b_{у.т.} = 1,45 \cdot \frac{FC_{GP}}{P_G}, \quad (2)$$

где $\rho = 860$ кг/м³ — плотность дизельного топлива; 1,45 — коэффициент перевода дизельного топлива в условное топливо (о.е.).

Метод расчёта, утвержденный Министерством энергетики Российской Федерации. Согласно [4], при отсутствии результатов испытаний дизель-генераторов или паспортных данных установок допускается принимать изменение расхода топлива при работе в ненормальных режимах работы путём введения режимного коэффициента (см. формулу (3)):

$$K_{режи} = 0,9 + \frac{0,1}{N_{\phi i} / N_{ном i}}, \quad (3)$$

где $N_{\phi i}$ — средняя прогнозируемая нагрузка i -го дизель-генератора за соответствующий период (кВт); $N_{ном i}$ — паспортная мощность i -й ДГУ (кВт).

При этом удельный расход условного топлива [гр.у.т./кВт · ч] будет рассчитываться по формуле (4):

$$b_i^{ДГУ} = b_{ном i}^{ДГ} K_{режи} \frac{Q_p^H}{7000}, \quad (4)$$

где $Q_p^H = 10180$ ккал/кг — теплота сгорания топлива.

Показатель расхода топлива ДГУ по паспорту (в технических условиях) [гр./кВт · ч] рассчитывается по формуле (5):

$$b_{ном i}^{ДГ} = \frac{b_{ном}^Д}{\eta_{ном}^Г}, \quad (5)$$

где $b_{ном}^Д$ — показатель расхода топлива по дизель-генератору [гр./кВт · ч]; $\eta_{ном}^Г$ — КПД ДГУ (о.е.).

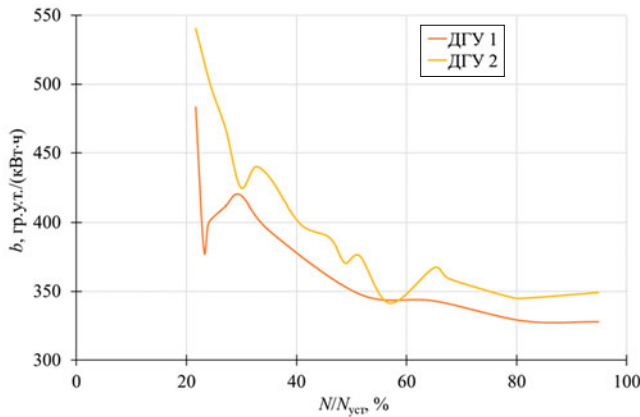


Рис. 1. Зависимости удельного расхода топлива от мощности дизельных агрегатов

Метод расчёта компании АО “Лонмади”. Расчёт расхода топлива по данной методике предполагает использование коэффициентов, учитывающих нагрузку на дизель-генератор и степень его износа [5].

Расход топлива может быть определен по формулам (6) или (8):

$$b_i^{\text{ДГУ}} = \frac{g_{\text{ном}} \cdot H \cdot C \cdot 1,36}{\eta_{\Gamma}} + \frac{B_x}{\mathcal{E}}, \quad (6)$$

где $g_{\text{ном}}$ — удельный расход топлива при мощности в 75 % от номинальной (по паспорту ДГУ) [гр./л/(кВт · ч)]; H, C — коэффициенты, учитывающие нагрузку и изношенность двигателя соответственно (о.е.) (приведены в [5]); η_{Γ} — КПД генератора в зависимости от режима работы (о.е.); \mathcal{E} — планируемая выработка электроэнергии (кВт · ч).

Расход топлива при работе ДГУ на холостом ходу рассчитывается по формуле (7):

$$B_x = 0,15N_{\text{ном}} \cdot g_{\text{ном}} \cdot K_x \cdot C \cdot n, \quad (7)$$

где $N_{\text{ном}}$ — номинальная мощность генератора (л.с.); $K_x = 0,21$ о.е. — коэффициент расхода на холостом ходу для ДГУ мощностью менее 1000 л.с.; n — планируемое число запусков двигателя.

$$b_i^{\text{ДГУ}} = \frac{1,05K \cdot g_{\text{ном}}}{\eta_{\Gamma}} + \frac{1,05K_x \cdot g_{\text{ном}} \cdot N_{\text{ном}} \cdot 0,15}{\mathcal{E}}, \quad (8)$$

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики расходомеров Eurosens Deltfa RS 100

$Q_{\text{мин}}$, л/ч	$Q_{\text{ном}}$, л/ч	$Q_{\text{макс}}$, л/ч	Погрешность, %
10	50	100	±1

где K — коэффициент, учитывающий увеличение расхода из-за колебания нагрузки, (о.е.) и рассчитываемый по формуле (9):

$$K = 0,87 + 0,13 \cdot \frac{N_{\text{ном}}}{N_{\text{ср}}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{ср}}$ — средняя мощность ДГУ (л.с.).

Постановка цели исследования. Как уже было отмечено ранее, общей проблемой эксплуатации всех ДЭС является высокий расход топлива, который во многом определяется распределением мощности между включенными в работу дизельными генераторами. В связи с этим авторским коллективом была поставлена цель: разработать методику и соответствующую математическую модель выбора оптимального состава включенных в работу энергоустановок ДЭС. Критерий выбора — минимум суммарного удельного расхода топлива ДЭС.

Так как в паспортных характеристиках ДГУ зависимости расхода топлива от мощности генератора приводятся довольно редко, то первой задачей исследования являлся выбор наиболее подходящего метода расчёта такой зависимости. Выбор осуществлялся среди способов, рассмотренных выше, а апробация результатов — с помощью имеющегося в распоряжении авторского коллектива экспериментального энергокомплекса.

Экспериментальный энергетический комплекс представляет собой ДЭС, оснащенную двумя дизельными энергоустановками на основе двигателя Perkins 1103A-33T мощностью 36,9 кВт с синхронным генератором LSA 42.3-S5-J6/4m Leroy Somer 40 кВт. Дизельные агрегаты работают на управляемую электрическую нагрузку, представляющую собой набор теплоэлектронагревателей. Мощность нагрузки может изменяться от 0,2 до 51,2 кВт.

Измерительная часть энергокомплекса представлена установленными на каждой ДГУ расходомерами Eurosens Deltfa RS 100. Основные технические характеристики расходомеров представлены в табл. 1.

В паспортных характеристиках ДГУ энергокомплекса отсутствуют зависимости расхода топлива от мощности, поэтому необходимая информация была получена экспериментальным путём с использованием имеющегося измерительного оборудования. В процессе “снятия” зависимостей дизельные генераторы трижды нагружались в диапазоне от 22 до 95 % номинальной мощности, а полученные результаты были в итоге осреднены. Соответствующие графики представлены на рис. 1.

На основе полученных результатов был сделан вывод, что характеристики удельного расхода условного топлива могут отличаться у одинаковых по

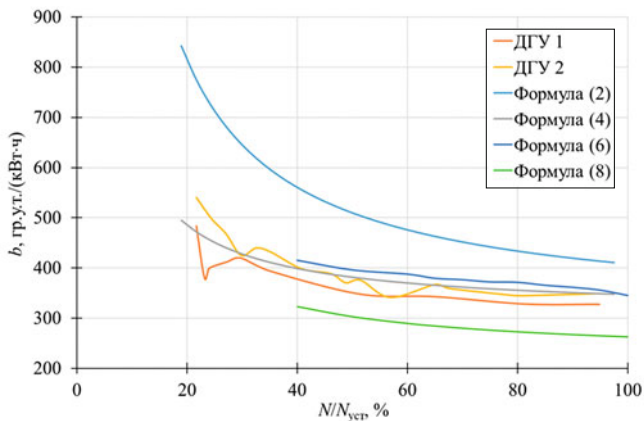


Рис. 2. Измеренные и расчётные зависимости изменения удельного расхода топлива

мощности и условиям эксплуатации ДГУ. По результатам эксперимента они в среднем отличаются на 11,78 %. Таким образом показано, что одинаковые модели дизельных агрегатов обладают различающимися характеристиками и для повышения эффективности режима работы ДЭС необходимо использовать алгоритм определения оптимальной неравномерной загрузки агрегатов.

Выбор математической модели ДГУ. Для выбора наиболее подходящего метода расчёта удельного расхода топлива ДГУ были произведены вычисления с использованием формул (2), (4), (6) и (8). Результаты расчётов представлены на рис. 2 и в табл. 2.

При проведении расчётов использовались следующие паспортные данные ДГУ:

$$b_{\text{НОМ}}^{\text{д}} = 216 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}); \quad g_{\text{НОМ}} = 220 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч});$$

$$\eta_{\text{НОМ}}^{\text{г}} = 90,5 \text{ \%}.$$

Согласно табл. 2, наименьшие отклонения расчётных значений от фактических дает метод расчёта, утвержденный Министерством энергетики Российской Федерации (формула (4)). Данный метод в дальнейшем используется для получения исходных данных, необходимых для оптимизации состава включенных в работу энергоустановок ДЭС.

Математическая модель выбора оптимального состава включенных в работу энергоустановок ДЭС. Математическая модель выбора оптимальной загрузки дизельных энергоустановок ДЭС была разработана на языке программирования Python. Основными исходными данными, необходимыми для осуществления оптимизации работы ДЭС являются следующие:

- типоразмер ДГУ, их основные технические характеристики (номинальная мощность, соответствующее ей потребление топлива и зависимость расхода топлива от мощности генератора) и количество агрегатов каждого типа;
- минимальное и максимальное значения нагрузки;
- величина шага, с которым будет изменяться нагрузка от минимального до максимального значения при проведении соответствующих расчётов.

Основным критерием распределения нагрузки между дизель-генераторами является минимум включенных в работу агрегатов, т.е. $n_{\text{ДГУ}}^{\text{раб}} \rightarrow \min$.

Т а б л и ц а 2

Значения относительной погрешности между расчётными и измеренными зависимостями изменения удельного расхода топлива (%)

Загрузка ДГУ, %	Сравнение с ДГУ 1				Сравнение с ДГУ 2			
	Формула (2)	Формула (4)	Формула (6)	Формула (8)	Формула (2)	Формула (4)	Формула (6)	Формула (8)
21,68	60,44	2,22	–	–	43,47	12,56	–	–
24,39	79,98	13,16	–	–	44,99	8,84	–	–
27,10	65,62	7,04	–	–	45,75	5,81	–	–
29,81	54,37	2,24	–	–	52,31	0,87	–	–
35,23	51,31	4,48	5,55	17,82	37,86	4,80	8,27	25,12
51,49	44,90	9,19	13,83	12,90	34,14	1,08	5,38	19,36
65,04	34,99	6,66	10,57	17,09	26,08	0,39	3,27	22,57
81,30	31,46	8,13	13,04	16,97	25,13	2,92	7,59	20,97
94,85	26,26	6,47	8,46	19,26	18,53	0,05	1,82	24,20
Среднее	49,92	6,62	10,29	16,81	36,47	4,15	5,27	22,45

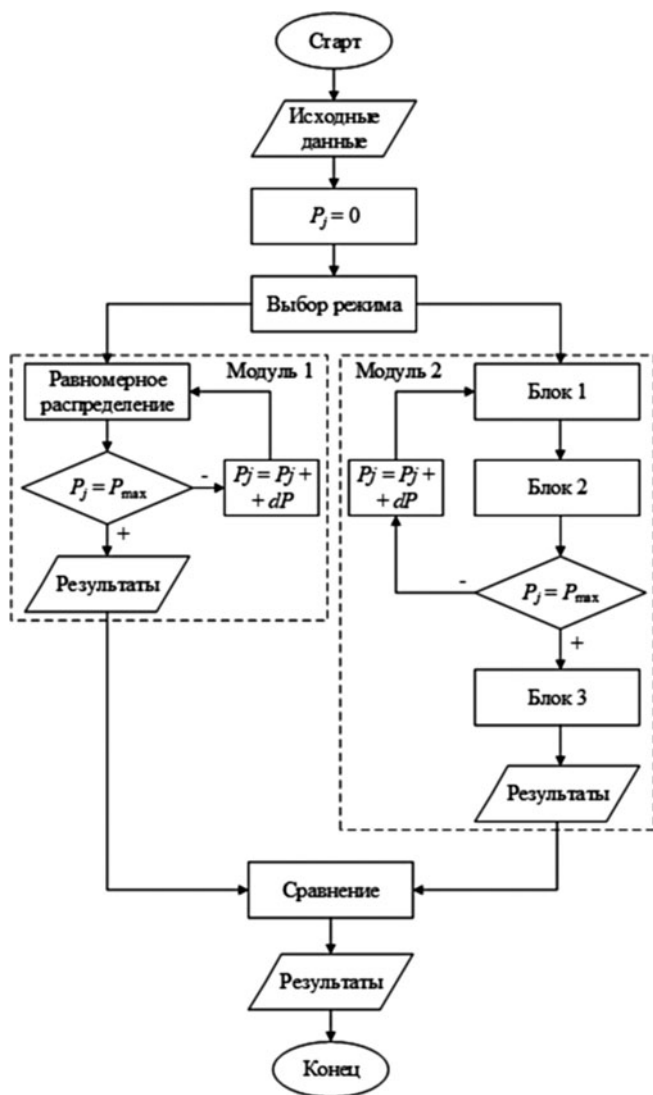


Рис. 3. Блок-схема математической модели

Основным результатом оптимизации работы ДЭС являются: оптимальный состав работающих ДГУ при заданном значении нагрузки, соответствующие ему значения загрузки каждой из ДГУ и величина потребляемого топлива, как каждым дизельным агрегатом, так и всей ДЭС в целом

Математическая модель включает в себя 2 модуля.

Модуль 1. “Равномерное распределение нагрузки”. Принцип работы данного модуля заключается в определении согласно формуле (10) удельной мощности ДЭС (о.е.) в зависимости от нагрузки:

$$N_{\text{ДЭС}}^{\text{уд}} = \frac{P_{\text{потр}}}{N_{\text{ДЭС}}^{\text{уст}}}, \quad (10)$$

где $P_{\text{потр}}$ — нагрузка потребителя (кВт); $N_{\text{ДЭС}}^{\text{уст}}$ — установленная мощность ДЭС (кВт).

Мощность каждого из включённых в работу дизель-генераторов определяется по формуле (11):

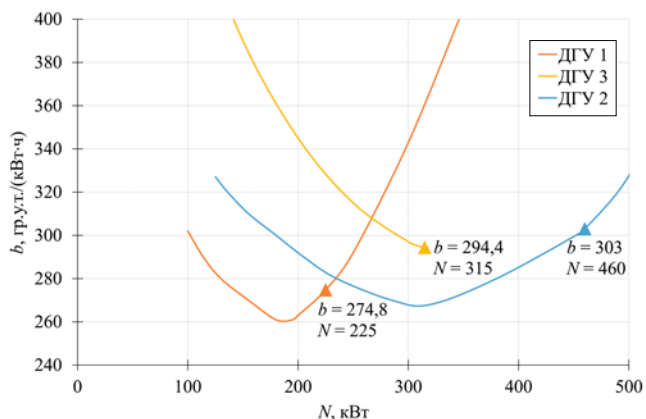


Рис. 4. Удельные характеристики расхода дизелей с их оптимальной загрузкой

$$N_{\text{ДГУ}i} = N_{\text{ДГУ}i}^{\text{ном}} N_{\text{ДЭС}}^{\text{уд}}, \quad (11)$$

где i — номер ДГУ; $N_{\text{ДГУ}}^{\text{ном}}$ — номинальная мощность ДГУ (кВт).

Значения расхода топлива и его удельные величины определяются по расходным характеристикам и формулам, упомянутым в разделе “Математическое моделирование ДГУ”.

Модуль 2. “Неравномерное распределение нагрузки”. Данный модуль состоит из нескольких блоков и отвечает за создание “карты возможных вариантов состава работающих ДГУ ДЭС”, а также за выбор оптимального варианта. “Карта” создается с учётом каждого значения нагрузки потребителя $P_{\text{потр}}$, которая может изменяться от минимального до максимального значения с некоторым шагом (см. исходные данные).

Блок 1. “Возможные варианты состава оборудования”. Блок осуществляет генерацию всех возможных комбинаций работающих ДГУ при нагрузке $P_{\text{потр}}$ с учётом критерия $n_{\text{ДГУ}}^{\text{раб}} \rightarrow \min$ и условия $N_{\text{ДЭС}}^{\text{уст}} \geq P_{\text{потр}}$.

Блок 2. “Возможные варианты загрузки оборудования”. Блок отвечает за генерацию всех возможных вариантов загрузки ДГУ для каждой из ранее сформированных комбинаций состава оборудования. При распределении нагрузки между дизель-генераторами принимается, что их мощность может изменяться с тем же шагом, что и нагрузка потребителя. В процессе генерации вариантов загрузки ДГУ также осуществляется расчёт потребления топлива каждой ДГУ и ДЭС в целом, а также значения удельного расхода топлива.

На основе результатов работы блоков 1 и 2 формируется “карта возможных вариантов состава работающих ДГУ ДЭС”, сохраняется в соответствующий файл и, в последствии, может быть использо-

вана для оперативного выбора оптимального состава оборудования в зависимости от заданной нагрузки потребителя.

Блок 3. “Выбор оптимального состава оборудования”. В зависимости от нагрузки потребителя блок 3 осуществляет выбор из ранее составленной “карты” вариант, для которого характерен минимальный суммарный удельный расход топлива. Таким образом, результатом работы данного блока является состав ДЭС с минимальным количеством задействованных в работе дизель-генераторов и минимальным потреблением топлива.

В общем виде блок-схема разработанной математической модели представлена на рисунке 3. Как видно из рисунка, в зависимости от требований оператора математическая модель может выполнять следующий ряд операций:

- определение оптимального состава включенных в работу ДГУ при условии их равномерной загрузки;
- определение оптимального состава включенных в работу ДГУ при условии их неравномерной загрузки;
- выбор наиболее эффективного режима работы ДЭС из первых 2-х вариантов (выбор между равномерной и неравномерной загрузкой ДГУ).

Пример результата работы математической модели при определении оптимального распределения нагрузки в 1000 кВт по 3-м разным дизель-генераторам ДЭС представлен на рис. 4.

Апробация математической модели. Для апробации математической модели в качестве объекта исследования был выбран существующий солнечно-дизельный энергокомплекс (СДЭК), расположенный в городе Верхоянск в Якутии (координаты: 67° 33' с.ш., 133° 23' в.д.).

Основная исходная информация, которая была использована:

- характеристики дизельных генераторов СДЭК (табл. 3);

Т а б л и ц а 3

Характеристика дизельных генераторов СДЭК в г. Верхоянск

Тип агрегата	Марка двигателя	Мощность, кВт
АД-400	КТА19-G4	400
АД-400	КТА19-G4	400
АД-520	КТА38-G2A	520
АД-520	КТА38-G2A	520
ДГА-315	6ЧН 25/34	315
ДГА-315	6ЧН 25/34	315

- суточные графики нагрузки для характерных дней каждого месяца года;

- суточные графики выработки электроэнергии солнечными модулями СДЭК.

Согласно [7], выбраны следующие основные критерии выбора оптимального состава включенных в работу дизель-генераторов СДЭК:

- количество выработанной электроэнергии ДЭС;
- коэффициент использования установленной мощности (КИУМ);
- удельный расход условного топлива (УРУТ) на отпущенную электроэнергию.

Основные результаты исследования. Апробация математической модели осуществлялась для вариантов с равномерным распределением нагрузки между ДГУ СДЭК и с оптимальным распределением нагрузки. Основные результаты представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что между 2-мя рассмотренными вариантами имеется небольшое различие в выработке электроэнергии — порядка 0,19 %. Это обусловлено особенностью работы разработанного алгоритма, а именно – шагом оптимизации. В данном случае значения нагрузки изменялись с шагом в 5 кВт, погрешность в результатах расчетов менее чем в 1 % можно считать несущественной.

Кроме вышеупомянутых критериев работы ДГУ СДЭК были проанализированы и другие: абсолютный расход топлива и количество включений дизельных генераторов. Результаты приведены в табл. 5.

На основе анализа результатов из табл. 4 и 5 были сделаны следующие основные выводы касательно эффективности оптимального распределения нагрузки между ДГУ по сравнению с равномерным распределением:

- удельный расход топлива снизился на 2,68 %;
- абсолютный расход топлива снизился на 16,06 %;
- количество включений ДГУ снизилось на 42,86 %.

Таким образом, предлагаемый вариант позволяет добиться более экономичного использования ископаемого топлива, т.к. за счёт снижения количества

Т а б л и ц а 4

Основные результаты апробации математической модели

Распределение нагрузки между ДГУ	Выработка, кВт · ч	КИУМ, %	УРУТ, гр.ул./(кВт · ч)
Равномерное	107465	15,11	371,4
Оптимальное	107665	15,14	361,4

Основные результаты по работе ДГУ при разных вариантах распределения нагрузки

Равномерное распределение нагрузки					
ДГУ	Время работы, ч	Количество включений, шт.	Выработка, кВт · ч	КИУМ, %	Абсолютный расход, л
1	68	18	25404	22,05	7385
2	23	5	8520	7,40	2314
3	51	13	24265	16,20	10373
4	0	0	0	0,00	0
5	135	27	34098	37,59	11579
6	52	21	15179	16,73	4543
Итого	397	84	107465	15,11	36196
Оптимальное распределение нагрузки					
ДГУ	Время работы, ч	Количество включений, шт.	Выработка, кВт · ч	КИУМ, %	Абсолютный расход, л
1	165	21	39440	34,24	11344
2	109	10	43600	37,85	11749
3	51	13	24305	16,23	7166
4	0	0	0	0	0
5	1	1	80	0,09	30,74
6	3	3	240	0,26	92,22
Итого	397	48	107665	15,14	30382

ва включений снижается расход топлива на холостой ход ДГУ. Кроме этого, уменьшается и вероятность аварий.

Несмотря на положительные результаты проведенного исследования, следует отметить, что всё ещё имеется большой простор для доработки разработанной математической модели. Так на данный момент она не учитывает неоптимальную работу ДГУ при загрузке менее 50 % от номинальной мощности агрегата, не способна осуществлять прогнозирование нагрузки и подсчёт расхода дизельного топлива на холостой ход, а износ ДГУ задается вручную на этапе ввода исходных данных. В дальнейших исследованиях предполагается добавить в модель и эти возможности для более точного

моделирования режимов работы не только ДЭС, но и СДЭК.

Выводы

Автоматизированные системы управления СДЭК должны предусматривать возможность управления в едином цикле всем используемым оборудованием: солнечным и батарейным инвертором, дизельными агрегатами. Проведённая работа показала, что равномерное распределение активной мощности между ДГУ ДЭС не является оптимальным решением. Снизить величину удельного расхода топлива позволяет предложенный в статье подход, основанный на поиске точки минимального удельного расхода топлива для всей ДЭС. Это возможно при неравномерной загрузке ДГУ. Предложенное в статье решение позволяет снизить объём потребляемого топлива на несколько процентов.

Соблюдение этических норм

Финансирование: исследование, приведшее к этим результатам, получило финансирование от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках грантового соглашения № FSWF-2022 – 0006.

Список литературы

1. *Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России: аналитический доклад, март 2020* / Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2020. — 78 с.
2. *Mahon L. L. J. Diesel Generator Handbook*. Butterworth-Heinemann Ltd, 1992. — 656 p.
3. *Ismail M. S., Moghavvemi M., Mahlia T. M. I. Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate*. Energy Conversion and Management, 2013. Vol. 69. Pp. 163 – 173.
4. *Приказ от 30 декабря 2008 г. № 323 “Об утверждении порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии”* (с изменениями на 30 ноября 2015 г.) / Министерство энергетики Российской Федерации, 2015. — 75 с.
5. *Как считается расход топлива дизельного генератора* // АО “Лонмади”. 2023. URL: <https://www.jcbgenerators.ru/tekhnicheskaya-biblioteka/kak-schitaetsya-raskhod-topliva-dizelnogo-generatora.html> (дата обращения: 10.04.2023).
6. *Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Aguistin, José M. Yusta-Loyo, José A. Domínguez-Navarro, Ignacio J. Ramírez-Rosado, Juan Lujano, Ismael Aso*. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. Applied Energy, Elsevier, 2011. Vol. 88(11). Pp. 4033 – 4041.
7. *Правила технической эксплуатации дизельных электростанций (ПТЭД)* / Министерство топлива и энергетики Российской Федерации, 1993. — 51 с.