

## **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПЕРВОЙ КАТЕГОРИИ ОСОБОЙ ГРУППЫ**

**Карякин А.Л.<sup>1</sup>, Булыгин Д.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФБГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, Россия (620144, г. Екатеринбург, ГСП-126, ул. Куйбышева, 30), e-mail: karyakin.a@ursmu.ru

В статье рассматривается актуальная задача проектирования дизельных электростанций для систем питания потребителей первой категории особой группы. Решение задачи выполнено на основе предложенных параметрических моделей электротехнического комплекса дизельной электростанции, источника бесперебойного питания и потребителей. Модели имеют непрерывную и дискретную формы. Приведены возможные постановки задачи оптимального проектирования и методы их решения. На основе модели в непрерывной постановке получено неравенство, которое позволяет оценить минимальное число дизель-генераторных установок в составе дизельной электростанции, необходимое для обеспечения ее работы в заданном диапазоне мощностей с заданной загрузкой дизельных двигателей. На основе модели дизельной электростанции в дискретной форме предложена методика и алгоритм выбора оптимального количества и мощности дизель-генераторных установок по критерию минимума стоимости при заданных значениях коэффициента минимальной и максимальной загрузки ступени дизельной электростанции. Приведен пример определения оптимальных параметров дизельной электростанции для различных функций стоимости дизель-генераторных установок.

Ключевые слова: дизель-генератор, дизельная электростанция, оптимизация параметров, диапазон нагрузок электростанции.

## **THE CHOICE OF DIESEL GENERATOR'S ELECTRICAL PARAMETERS FOR ELECTRICAL SYSTEMS SUPPLY FIRST CATEGORY OF SPECIAL GROUPS**

**Karyakin A.L.<sup>1</sup>, Bulygin D.A.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia (620144, Ekaterinburg, Kuybysheva street, 30), e-mail: karyakin.a@ursmu.ru

The article describes the actual problem of designing systems for diesel power supply to the consumers of the first category of a special group. Solution of the problem is made on the basis of the proposed parametric model of the diesel power plant. The models are continuous and discrete forms. The possible formulations of the problem of optimal design and methods of their solutions. Based on the model obtained in the continuous production of inequality, which allows us to estimate the minimum number of diesel generator sets in the diesel power needed to ensure that it works in a given power range with a given load diesel engines. Based on the model of a diesel power plant in discrete form the technique and the algorithm for selecting the optimal number and capacity of diesel generator sets by the minimum cost for given values of the coefficient of minimum and maximum load level diesel power. An example of determining the optimum parameters of a diesel power plant for a variety of cost functions of diesel generator sets.

Key words: diesel generator, diesel power plant, the optimization of the parameters, the range of load power.

### **Введение**

Электротехнические комплексы электроснабжения потребителей первой категории особой группы используются в центрах хранения данных, многофункциональных высотных зданиях, нефтяной и газодобывающей промышленности, геологоразведке, других отраслях промышленности и народного хозяйства. Отличительной особенностью таких систем является наличие дополнительного питания от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания, в качестве которого применяют источник

бесперебойного электропитания на основе аккумуляторных батарей и дизельные генераторы, объединённые в дизельную электростанцию

Опубликованы работы [1-4], в которых рассмотрены вопросы управления дизель-генераторными установками (ДГУ) в переходных режимах работы. Однако одной из основных задач проектирования комплексов электроснабжения потребителей первой категории особой группы является выбор количества и мощности дизель-генераторных установок (ДГУ) в составе дизельной электростанции (ДЭС), от правильного решения которой зависит эффективность электротехнического комплекса на этапах его реализации и эксплуатации.

Ранее авторами были получены уравнения и неравенства параметрической модели дизельной электростанции. Модель дизельной электростанции основана на предложенном понятии коэффициентов минимальной и максимальной загрузки дизельной электростанции

$$k_{\min}^{\text{загр}} = \min \{ P_{\text{ном}}(t) / P_n^{\text{ДЭС}} \}, \quad k_{\max}^{\text{загр}} = \max \{ P_{\text{ном}}(t) / P_n^{\text{ДЭС}} \}, \quad (1)$$

где  $P_n^{\text{ДЭС}}$  – номинальная мощность ДЭС на  $n$ -й ступени,  $P_n^{\text{ДЭС}} = \sum_{i=1}^n P_i^{\text{ДГУ}}$ ,  $P_i^{\text{ДГУ}}$  – номинальная мощность ДГУ  $i$ -й ступени.

Коэффициент минимальной загрузки ступени ДЭС равен минимальному отношению мощности, потребляемой нагрузкой, к текущей номинальной мощности электростанции, при котором исключается холостой ход дизельных двигателей, включенных в работу. Коэффициент максимальной загрузки ступени ДЭС определяет отношение мощности, потребляемой нагрузкой, к текущей номинальной мощности электростанции, при котором осуществляется переключение на следующую по мощности ступень.

Параметрическая модель дизельной электростанции представлена в виде системы неравенств, которая описывает ограничения мощности отдельных ДГУ, в соответствии с условиями на загрузку ДЭС:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1^{\text{ДГУ}} > P_{\min}^{\text{нагр}}; \\ P_1^{\text{ДГУ}} \leq \frac{1}{k_{\min}^{\text{загр}}} P_{\min}^{\text{нагр}}; \\ P_n^{\text{ДГУ}} > 0, \quad n \in [2, N] \cap \mathbb{N} \wedge N \geq 2; \\ P_n^{\text{ДГУ}} \leq \left( \frac{k_{\max}^{\text{загр}}}{k_{\min}^{\text{загр}}} - 1 \right) \sum_{i=1}^{n-1} P_i^{\text{ДГУ}}, \quad n \in [2, N] \cap \mathbb{N} \wedge N \geq 2; \\ \sum_{i=1}^N P_i^{\text{ДГУ}} \geq P_{\max}^{\text{нагр}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Введено понятие образа стандартной номинальной мощности на множестве стоимостей

$$\exists \mathbf{C}_{\text{ст}}, \varphi: \forall P_{\text{ст}m}^{\text{ДГУ}} \in \mathbf{P}_{\text{ст}}^{\text{ДГУ}} \rightarrow \exists c_m \left( c_m \in \mathbf{C}_{\text{ст}} \wedge c_m = \varphi(P_{\text{ст}m}^{\text{ДГУ}}) \right) \quad (3)$$

где  $\mathbf{C}_{\text{ст}}$  – упорядоченный набор значений стоимости ДГУ;  $\varphi$  – отображение множества стандартной мощности  $\mathbf{P}_{\text{ст}}^{\text{ДГУ}}$  на множество  $\mathbf{C}_{\text{ст}}$ ;  $c_m$  – стоимость ДГУ с номинальной стандартной мощностью  $P_{\text{ст}m}^{\text{ДГУ}}$ .

Целью исследования является разработка методов поиска оптимальных параметров дизельной электростанции, описываемой системой (2) и условием (3).

### Материал и методы исследования

Возможны следующие формальные постановки задачи оптимизации параметров дизельной электростанции.

Задача I: найти

$$\min_{N \in \mathbb{R}} F \left( \sum_{i=1}^N P_i^{\text{ДГУ}} \right), \mathbf{P}_{\text{ном}}^{\text{нагр}} \leq \sum_{i=1}^N P_i^{\text{ДГУ}}, \mathbf{P}^{\text{ДГУ}} \leq \mathbf{b}, \quad (4)$$

где  $N$  – общее число ступеней ДЭС,  $P_i^{\text{ДГУ}} \in [P_{\text{мин}}^{\text{ДГУ}}, P_{\text{макс}}^{\text{ДГУ}}]$ .

Задача II: найти

$$\min_{N \in \mathbb{N}} F \left( \sum_{i=1}^N P_i^{\text{ДГУ}} \right), \mathbf{P}_{\text{ном}}^{\text{нагр}} \leq \sum_{i=1}^N P_i^{\text{ДГУ}}, \mathbf{P}^{\text{ДГУ}} \leq \mathbf{b}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{ст}m}^{\text{ДГУ}} \in [P_1^{\text{ДГУ}}, \dots, P_m^{\text{ДГУ}}, \dots, P_M^{\text{ДГУ}}]$ ,  $m = \overline{1, M}$  – стандартная мощность ступени ДГУ.

Задача III: найти вектор параметров дизель-генераторных установок, обеспечивающих минимальную стоимость электростанции

$$\min_{N \in \mathbb{R}} S_1 \left( \sum_{i=1}^N C_{\text{ст}i}^{\text{ДГУ}} \right), \mathbf{c}_{\text{ст}}^{\text{ДГУ}} = \varphi(\mathbf{P}_{\text{ст}}^{\text{ДГУ}}), \mathbf{P}_{\text{ном}}^{\text{нагр}} \leq \sum_{i=1}^N P_i^{\text{ДГУ}}, \mathbf{P}^{\text{ДГУ}} \leq \mathbf{b}. \quad (6)$$

Задача IV: найти вектор параметров дизель-генераторных установок, обеспечивающих минимальную стоимость электростанции и топлива, потребляемого за период эксплуатации

$$S_2 = \sum_{i=1}^N C_{\text{ст}i}^{\text{ДГУ}} + \sum_{i=1}^N \int_0^{T_2} C_{\text{ст}i}^{\text{топлива}}(t) dt \rightarrow \min. \quad (7)$$

Задача I характеризуется непрерывной функцией мощности ДГУ, задача II – дискретной.

Для решения задачи I выразим максимально допустимую номинальную мощность ступени ДЭС в функции номера ступени:

$$\forall n \left( n \in [1, N] \cap \mathbb{N} \wedge N \geq 1 \rightarrow P_{n \text{ макс}}^{\text{ДЭС}} = \left( \frac{k_{\text{загр}}^{\text{макс}}}{k_{\text{загр}}^{\text{мин}}} \right)^{n-1} \frac{P_{\text{мин}}^{\text{нагр}}}{k_{\text{загр}}^{\text{мин}}} \right). \quad (8)$$

Общая номинальная мощность ДЭС должна обеспечивать ее работу во всем диапазоне нагрузки. Верхнее ее значение определяется объединением выражения  $P_n^{ДЭС} = \sum_{i=1}^n P_i^{ДГУ}$  с неравенством из системы (2):

$$P_N^{ДЭС} \geq P_{\max}^{нагр}. \quad (9)$$

Тогда число ступеней ДЭС определяется неравенством, следующим из выражений (8), (9):

$$\left( \frac{k_{загр}^{\max}}{k_{загр}^{\min}} \right)^{N-1} \frac{P_{\min}^{нагр}}{k_{загр}^{\min}} \geq P_{\max}^{нагр}, \quad (10)$$

где  $P_{\max}^{нагр}$  – максимальная мощность нагрузки, при которой необходимо обеспечить длительную работу ДЭС.

Выражение (10) дает оценку нижней границы числа ступеней ДЭС и, следовательно, числа ДГУ при заданном диапазоне мощности нагрузки:

$$N \geq \frac{\ln k_{загр}^{\max} + \ln \left( P_{\max}^{нагр} / P_{\min}^{нагр} \right)}{\ln k_{загр}^{\max} - \ln k_{загр}^{\min}}. \quad (11)$$

Неравенство позволяет оценить минимальное число ДГУ в составе ДЭС, необходимое для обеспечения ее работы в заданном диапазоне мощностей с заданной загрузкой дизельных двигателей.

Для решения задачи в постановке II разработаны алгоритм и программа. Алгоритм решения включает следующие шаги: 1) мощности отдельных ДГУ выбираются последовательно и в соответствии с системой неравенств (2); 2) расчетная мощность ДГУ округляется до ближайшего меньшего значения из ряда стандартных значений номинальной мощности; 3) после каждого шага делается проверка ДЭС на способность обеспечить энергией максимальную нагрузку, что соответствует последнему выражению системы (2); 4) на последнем этапе мощность ДГУ последней ступени корректируется: она соответствует наименьшей стандартной мощности, превышающей разность между мощностью максимальной длительной нагрузки и номинальной мощностью предпоследней ступени ДЭС. Алгоритм позволяет произвести более точную оценку минимального количества ДГУ для обеспечения работы ДЭС в заданном диапазоне мощностей с заданной загрузкой дизельных двигателей с учетом дискретности функции мощности.

Решение задачи минимизации стоимости в постановке III основано на том, что имеется отображение (3) множества номинальной стандартной мощности ДГУ на множество стоимостей.

Тогда пространство возможных решений

$$\mathbf{S} = \left\{ (P_1^{ДГУ}, \dots, P_N^{ДГУ}) \mid \forall P_n^{ДГУ} \in \mathbf{P}^{ДЭС} \rightarrow P_n^{ДГУ} \in \mathbf{P}_{ст}^{ДГУ} \right\} = (\mathbf{P}_{ст}^{ДГУ})^N$$

можно представить матрицей, где строка представляет возможное решение, а номер столбца соответствует номеру ступени ДЭС.

В пространстве  $\mathbf{S}$  выделим область допустимых решений, удовлетворяющих системе неравенств (2). Для этого выделим в пространстве  $\mathbb{R}^N$ , представляющем собой  $n$ -ю декартову степень множества действительных чисел, область  $\mathbf{R}$ , которую можно интерпретировать как множество удовлетворяющих системе (2) векторов  $\mathbf{P}^{ДЭС}$ , компоненты которых являются действительными числами.

$$\mathbf{R} = \left\{ \begin{array}{l} (P_1^{ДГУ}, \dots, P_N^{ДГУ}) : P_1^{ДГУ} \in \left( P_{мин}^{нагр}; \frac{1}{k_{загр}^{мин}} P_{мин}^{нагр} \right) \wedge \\ \left( \forall n \in [2; N] \cap \mathbb{N} \rightarrow P_n^{ДГУ} \in \left( P_{мин}^{нагр}; \left( \frac{k_{загр}^{max}}{k_{загр}^{мин}} - 1 \right) \sum_{i=1}^{n-1} P_i^{ДГУ} \right) \wedge \sum_{i=1}^N P_i^{ДГУ} \geq P_{max}^{нагр} \right) \end{array} \right\}. \quad (12)$$

Множество допустимых решений  $\mathbf{D}$  определяется пересечением этих множеств:

$$\mathbf{D} = \mathbf{S} \cap \mathbf{R} \quad (13)$$

Для решения задачи оптимизации нужно выбрать вектор из множества  $\mathbf{D}$  такой, чтобы стоимость элементов этого вектора была наименьшей. Или формально:

$$F(\mathbf{P}^{ДЭС*}) = \min_{\mathbf{P}^{ДЭС} \in \mathbf{D}} F(\mathbf{P}^{ДЭС}).$$

Геометрическая интерпретация множества  $\mathbf{R}$  как области в  $N$ -мерном гильбертовом пространстве, ограниченной гиперплоскостями согласно системе неравенств (2), для случая трех ступеней ДЭС, представлена на рис. 1.

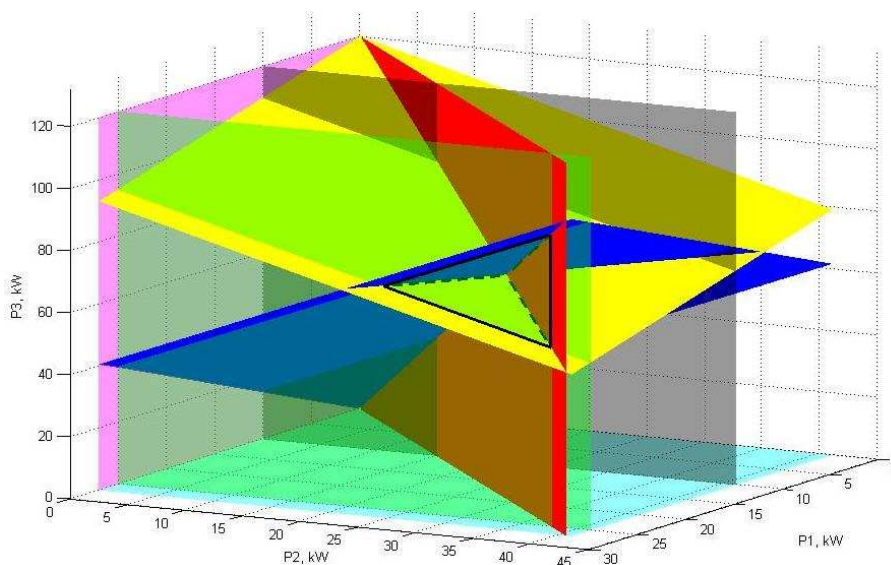


Рисунок 1 – Трехмерная область  $\mathbf{R}$

черный –  $P_{1\min}$ , пурпурный -  $P_{2\min}$ , голубой –  $P_{3\min}$ , зеленый –  $P_{1\max}$ , красный –  $P_{2\max}$ ,  
 синий –  $P_{3\max}$ , желтый  $(P_1+P_2+P_3)_{\min}$

Из анализа рис. 2 следует, что имеются дополнительные ограничения на диапазон возможных значений номинальной мощности для любой ступени ДЭС при известном количестве ступеней.

Ограничение на нижнее значение ДГУ  $n$ -й ступени в функции номинальных мощностей предыдущих ступеней:

$$\forall n \left( \begin{array}{l} n \in [2; N] \cap \mathbb{N} \rightarrow P_n^{\text{ДГУ}} \geq \left( \frac{k_{\text{загр}}^{\min}}{k_{\text{загр}}^{\max}} \right)^{N-n} \\ P_{\max}^{\text{нагр}} - \sum_{i=1}^{n-1} P_i^{\text{ДГУ}} \end{array} \right). \quad (14)$$

Тогда с учетом системы неравенств (2) и выражения (14) можно записать диапазон возможных значений номинальной мощности для любой ступени ДЭС при известном количестве ступеней:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1^{\text{ДГУ}} \in \left( P_{\min}^{\text{нагр}}; \frac{P_{\min}^{\text{нагр}}}{k_{\text{загр}}^{\min}} \right] \cap \mathbf{P}_{\text{ст}}^{\text{ДГУ}}, \\ P_n^{\text{ДГУ}} \in \left[ \left( \frac{k_{\text{загр}}^{\min}}{k_{\text{загр}}^{\max}} \right)^{N-n} P_{\max}^{\text{нагр}} - \sum_{i=1}^{n-1} P_i^{\text{ДГУ}}; \left( \frac{k_{\text{загр}}^{\max}}{k_{\text{загр}}^{\min}} - 1 \right) \sum_{i=1}^{n-1} P_i^{\text{ДГУ}} \right] \\ \cap \mathbf{P}_{\text{ст}}^{\text{ДГУ}}, \forall n \in [2; N] \cap \mathbb{N}. \end{array} \right. \quad (15)$$

Последнее выражение уточняет и дополняет систему неравенств (2).

Разработаны алгоритм и программа решения задачи оптимизации параметров дизельной электростанции в постановке III.

Алгоритм решения задачи оптимизации основан на использовании функции кодирования, переводящей множество допустимых решений во множество кодировок [5], и содержит следующие шаги.

– из множеств допустимой мощности и стоимости ДГУ формируют матрицы, соответствующие области возможных решений  $\mathbf{S}$  и области отображения  $\mathbf{C}_S$   
 $\mathbf{C}_S = \varphi(\mathbf{S}) = (\mathbf{C}_{cm})^N$  таким образом, что соответствующие друг другу элементы этих матриц имеют одинаковые индексы;

– из областей  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{C}_S$  удаляются решения, которые не удовлетворяют системе (2), и получают матрицы, соответствующие областям  $\mathbf{D}\mathbf{C}_D$  и где  $\mathbf{C}_D$  – множество допустимых кодировок;

– в матрице, изображающей область  $C_D$ , отыскиваются строки с минимальной суммой элементов, причем строки являются образами одноименных строк из матрицы, которой представлена область  $D$ , которые и являются решением задачи оптимизации.

### Результаты исследования и их обсуждение

Произведен выбор оптимальных параметров ДГУ в составе ДЭС для следующих исходных данных: производитель ДГУ – *Wilson*, ряд мощностей ДГУ – [11; 14,4; 17,6; 26,4; 40; 44; 52; 70,4; 88; 120; 132; 160; 20; 220; 280; 320; 400] кВт, функции стоимости ДГУ *Wilson* для различных исполнений (по данным открытых источников) представлены на рис. 2.

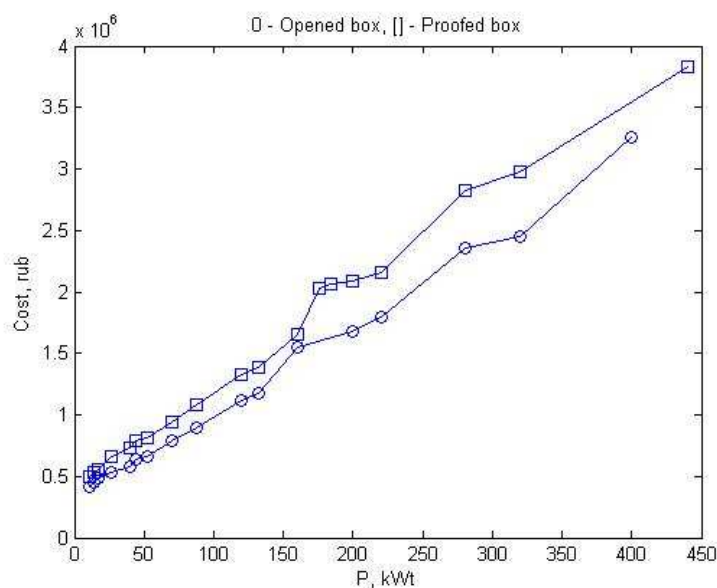


Рисунок 2 – Функции стоимости ДГУ *Wilson* для различных исполнений

Результаты решения задачи оптимизации, которыми являются множества значений мощности ДГУ в составе ДЭС, приведены в табл. 1. Важной является последовательность компонентов множества мощностей, так как она определяет последовательность включения ДГУ в работу.

Таблица 1 – Результаты решения задачи оптимизации

P <sub>min</sub> , кВт	P <sub>max</sub> , кВт	Исполнение ДГУ			
		Открытое		Защищенное	
		P <sub>i</sub> , кВт	Стоимость, руб.	P <sub>i</sub> , кВт	Стоимость, руб.
10	100	[11, 11, 26.4, 52]	2 023 824,0	[17.6 17.6 52 14.4]	2 457 659,0
		-	-	[17.6 17.6 14.4 52]	2 457 659,0
		-	-	[17.6 14.4 17.6 52]	2 457 659,0
		-	-	[14.4 17.6 17.6 52]	2 457 659,0
20	100	[40, 52, 11]	1 653 069,0	[40, 52, 11]	2 038 641,0
		[40, 11, 52]	1 653 069,0	[40, 11, 52]	2 038 641,0
30	100	[52, 52]	1 321 518,0	[52, 52]	1 626 306,0
40	100	[52, 52]	1 321 518,0	[88 14.4]	1 608 635,0
≥48	100	[120]	896 214,0	[120]	1 323 795,0

Из анализа полученных результатов следует, что существенное влияние на количество ДГУ в составе ДЭС и распределение их мощности оказывает соотношение минимальной и максимальной мощности ДЭС при длительной работе  $P_{\min}^{ДЭС}$  и  $P_{\max}^{ДЭС}$ , а также вид функциональной зависимости стоимости ДГУ от мощности. Увеличение стоимости в случае использования нескольких ДГУ меньшей мощности оправдывается значительным улучшением условий функционирования ДГУ при малых нагрузках дизельной электростанции и уменьшением эксплуатационных затрат на приобретение топлива.

### **Выводы**

Таким образом, поставлена и решена задача оптимального проектирования дизельной электростанции для питания потребителей первой категории особой группы с учетом ограничения на коэффициент загрузки дизель-генераторных установок. Результаты решения представлены в форме ряда мощностей дизель-генераторных установок в составе дизельной электростанции, последовательность элементов в котором определяет последовательность включения дизель-генераторных установок в работу.

### **Список литературы**

1. Герасимов А. Дизель-генераторные электростанции. Работа при переменной частоте вращения дизеля / А. Герасимов, В. Толмачев, К. Уткин // Новости электротехники. - 2005. - № 4.
2. Гринкруг Я.С., Соловьев В.А., Ткачева Ю.И. Определение оптимального распределения мощности нагрузки между дизель-генераторами в дизельной электростанции : межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск : МГТУ, 2006.
3. Завалишин В.В. Дизель-генераторная установка автономного электроснабжения с микропроцессорной системой управления // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2010. - № 3 (47). - С. 38-41.
4. Хватов О.С. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.М. Тарасов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина. - 2010. - № 2.
5. Уайлд Д. Оптимальное проектирование / пер. с англ. – М. : Мир, 1981. – 272 с., ил.

### **Рецензенты:**

Носырев Михаил Борисович, д.т.н., профессор, первый проректор, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург.

Зобнин Борис Борисович, д.т.н., профессор, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург.