
Модель режимного нормирования электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса на основе рангового анализа

Д.Г. Морозов

Балтийский федеральный университет имени Канта, Калининград

Аннотация: Для обеспечения устойчивой и надежной работы изолированных энергосистем необходимы модели, основанные на быстрой обработке и анализе негауссовых данных, что способствует повышению энергоэффективности и улучшению управления электропотреблением. В рамках теории оптимального управления электропотреблением на основе комплексной процедуры рангового анализа была разработана модель режимного нормирования, отличающиеся от известных тем, что в первый раз использован аппарат R-распределения на основе рангового анализа, а так же устройством и способом режимного нормирования, позволяющая в автоматическом режиме обеспечить необходимый устойчивый режим электропотребления регионального электротехнического комплекса в условиях ресурсных ограничений.

Ключевые слова: Режимное нормирование, ранговый анализ, OLAP-куб данных, метод половинного деления, энтропия, топологические данные, ранговая топологическая мера, план ресурсных ограничений, аппроксимация, региональный электрический комплекс, электропотребление.

Одной из Важных задач Российской электроэнергетики является обеспечение устойчивой и надежной работы изолированных территориально энергосистем (ИТЭ). Особую важность эта задача приобрела в условиях напряженной внешнеполитической обстановке [1]. Оперативно-диспетчерское управление ИТЭ осуществляется посредством отдачи диспетчерских команд, выдачи распоряжений и разрешений, путем непосредственного воздействия на технологический режим работы или эксплуатационное состояние объектов диспетчеризации с использованием автоматизированных систем управления и диспетчеризации (АСУД) [2].

Программное обеспечение этих систем не включает в себя научно обоснованные модели и методики режимного нормирования электропотребления, что не позволяет в полном объёме принимать диспетчеру качественные управляющие решения [3,4]. Развитие моделей и

методик режимного нормирования электропотребления осуществляется в рамках различных научных школ Российской Федерации. Наиболее перспективные исследования в данной области реализуются на основе техноценологического подхода профессора Б.И. Кудрина, основным инструментом, которого является ранговый анализ [5].

Ведущими научными школами в данном направлении являются Московская, Калининградская и Новомосковская. В работах Б.И. Кудрина, В.И. Гнатюка, В.В. Фуфаева, Ю.В. Матюниной, С.Д. Хайтуна, Д.В. Луценко, О.Р. Кивчуна, П.Ю. Дюндика, А.А. Шейнина, Б.В. Жилина, М.Г. Ошуркова, О.Е. Лагуткина и др. отражены законы и закономерности построения, функционирования и развития электроэнергетических систем [6].

Однако в связи с переходом к цифровой энергетике требуется разработка и применение цифровых моделей, основанных на обработке и анализе больших объемов данных, позволяющих создать предпосылки для повышения обеспечения устойчивого электропотребления ИТЭ и совершенствования математического и алгоритмического обеспечения АСУД. Кроме того, важной задачей является необходимость сопровождения процесса электропотребления в ИТЭ непрерывным мониторингом основных параметров и их фиксации в базе данных [7].

С этой целью на основе рангового анализа разработана модель режимного нормирования электропотребления, концептуальная структура которой представлена на рис. 1.

Модель включает в себя пять этапов. На первом этапе осуществляется импорт, обработка и верификация данных по электропотреблению. Сбор данных может осуществляться различными способами: с помощью автоматизированных систем контроля и учёта электроэнергии (АСКУЭ), по каналам телеметрии, а также, используя технологии беспроводных персональных сетей (bluetooth, wi-fi) [8].

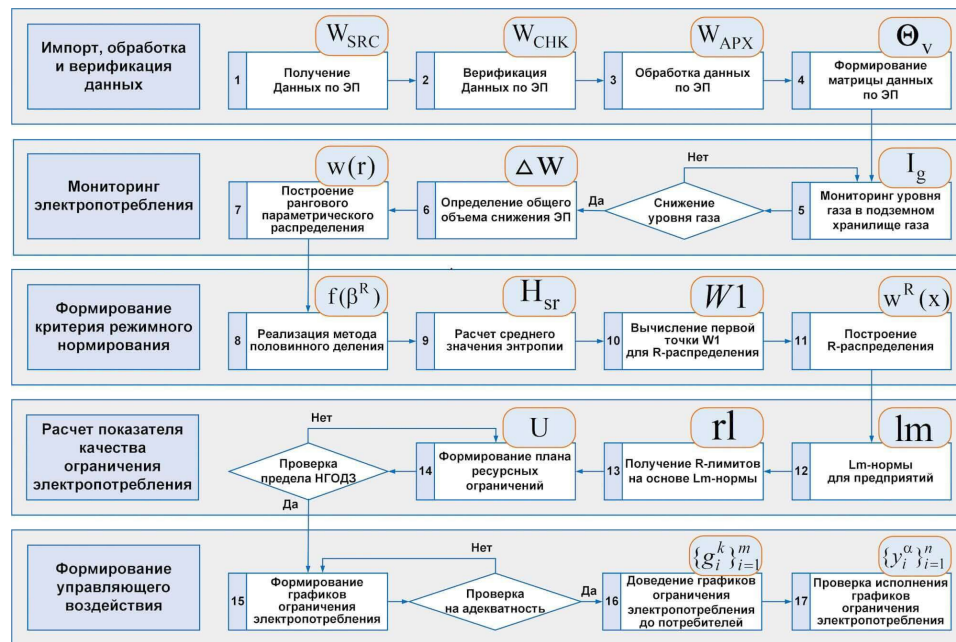


Рис. 1 – Структура модели режимного нормирования электропотребления

В результате импорта формируется множество входных данных (1) по электропотреблению Θ_v , включающее в себя подмножества «сырых» $W_{SRC} = \{W_j^{SRC}\}_{j=1}^n$, верифицированных, $W_{CHK} = \{W_j^{CHK}\}_{j=1}^n$, ранжированных $W_{RNG} = \{W_j^{RNG}\}_{j=1}^n$ и аппроксимированных данных $W_{APX} = \{W_j^{APX}\}_{j=1}^n$.

$$[\Theta_v] \xrightarrow{i=1..n} \begin{bmatrix} W_{11}^{SRC} & W_{12}^{SRC} & W_{13}^{SRC} & \dots & W_{1n}^{SRC} \\ W_{21}^{CHK} & W_{22}^{CHK} & W_{23}^{CHK} & \dots & W_{2n}^{CHK} \\ W_{31}^{RNG} & W_{32}^{RNG} & W_{33}^{RNG} & \dots & W_{3n}^{RNG} \\ W_{41}^{APX} & W_{42}^{APX} & W_{43}^{APX} & \dots & W_{4n}^{APX} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где W^{SRC} – подмножество «сырых» данных по электропотреблению; W^{CHK} – подмножество верифицированных данных по электропотреблению; W^{RNG} – подмножество ранжированных данных по электропотреблению; W^{APX} – подмножество аппроксимированных данных по электропотреблению [9].

Каждое подмножество в (1) формируется с помощью расчётных и графических модулей математического и алгоритмического обеспечения (МАО) рангового анализа. Реализуются операции устранения нулевых и явно ошибочных данных, выбросов. Осуществляется их ранжирование и аппроксимация.

На втором этапе моделирования осуществляется мониторинг электропотребления, который предусматривает непрерывный анализ уровня газа в подземном хранилище газа (ПХГ) с помощью стандартных автоматизированных средств электронной индикации на основе индикаторной функции $I_g = \{i_i^g\}_{i=1}^m$. При снижении уровня газа менее, чем 100% на основе оценки множества внутренних $\Lambda_1 = \{\lambda_i^1\}_{i=1}^n$ и внешних факторов $\Lambda_2 = \{\lambda_i^2\}_{i=1}^n$ лицо принимающее решение формирует величину снижения электропотребления, которая представляет собой суммарный параметрический ресурс по электропотреблению, полученный на основе разности суммарного значения электропотребления инерционного рангового распределения и величины снижения. Далее осуществляется построение рангового параметрического распределения $w(x)$ на текущий момент времени.

Величина снижения электропотребления формируется на третьем этапе в рамках формирования критерия режимного нормирования.

Определение 2.1. Критерий режимного нормирования электропотребления – способ определения в ходе итерационного процесса режимной нормы, значение которой имеет наименьшее абсолютное или относительное отклонение от нижней границы области допустимых значений рангового параметрического распределения для фиксированного ранга.

Он позволяет сопоставить характеристики степени достижения цели и помогает осуществить выбор необходимой стратегии ограничения электропотребления на основе процедуры режимного нормирования. Целевая

функция формирования критерия режимного нормирования электропотребления (2) определяется с помощью следующего выражения:

$$F(x) = \{H_{sr}, \beta, w_1, \square w, w(x), w^R(x)\} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где H_{sr} – среднее значение энтропии; β – ранговый коэффициент; w_1 – первая точка рангового параметрического распределения; $w(x)$ – функция инерционного рангового распределение по электропотреблению; $w^R(x)$ – функция R-распределения по электропотреблению; $\square w$ – величина снижения электропотребления.

Основными этапами формирования критерия режимного нормирования электропотребления являются: расчёт среднего значения энтропии для каждого ранга $w(x)$ на заданном временном интервале, определение рангового коэффициента β и первой точки w_1 для построения $w^R(x)$.

Среднее значение энтропии для заданного временного интервала (3) определяется следующим образом:

$$H_{sr} = - \sum_{x=1}^n \frac{W_1^R}{x^{\beta R} \cdot (w(x) - \square w)} \cdot \ln \frac{W_1^R}{x^{\beta R} \cdot (w(x) - \square w)}, \quad (3)$$

где W_1^R – первая точка на R-распределении; $w(x)$ – функция инерционного рангового параметрического распределение по электропотреблению; $\square w$ – величина снижения электропотребления; β^R – ранговый коэффициент R-распределения; x – непрерывный аналог ранга; n – количество объектов.

Расчет рангового коэффициента для рангового распределения (4) осуществляется с помощью следующего выражения:

$$f(\beta^R) = -H_{sr} - \sum_{x=1}^n \frac{1}{x^{\beta R} \cdot \sum_{x=1}^n \frac{1}{x^{\beta}}} \cdot \ln \frac{1}{x^{\beta R} \cdot \sum_{x=1}^n \frac{1}{x^{\beta}}}. \quad (4)$$

где $f(\beta^R)$ – функция зависимости коэффициента ранговый коэффициент R-распределения от значения непрерывного аналога ранга; H_{sr} – среднее

значение энтропии для каждого ранга R-распределения; β^R – ранговый коэффициент R-распределения.

Соответственно первую точку для R-распределения (5) можно определить следующим образом:

$$w_1^R = \frac{w(x) - \square w}{\sum_{x=1}^n \frac{1}{x^\beta}}. \quad (5)$$

где $w(x)$ – функция инерционного рангового распределение по электропотреблению; $\square w$ – величина снижения электропотребления; x^β – непрерывный аналог ранга R-распределения.

Учитывая выражения (4) и (5) функция построения R-распределения (6) представляется следующим образом:

$$w^R(x) = \frac{w_1^R}{x^{\beta^R}}. \quad (6)$$

где w_1^R – первая точка R-распределения; β^R – ранговый коэффициент R-распределения.

Далее строится R-распределение и определяется режимная норма – Lm-норма, индивидуально для каждого ранга. На рис. 2 представлен графический вид инерционного рангового параметрического распределения по электропотреблению и R-распределения, а также расчётное выражение для получения Lm-нормы.

Определение 2.2. Lm-норма – это количественная мера, показывающая величину требуемого снижения электропотребления при введении режима ресурсного ограничения, численно равна параметрическому расстоянию (измеряемому в кВт·ч / Т) между двумя точками. Первая точка, это значение на исходном ранговом параметрическом распределении, соответствующее рангу объекта. Вторая точка, это значение, соответствующее рангу объекта на R-распределении, построенном для установленного режима ограничения

электропотребления. Алгоритм Lm-нормы основывается на ранговом анализе.

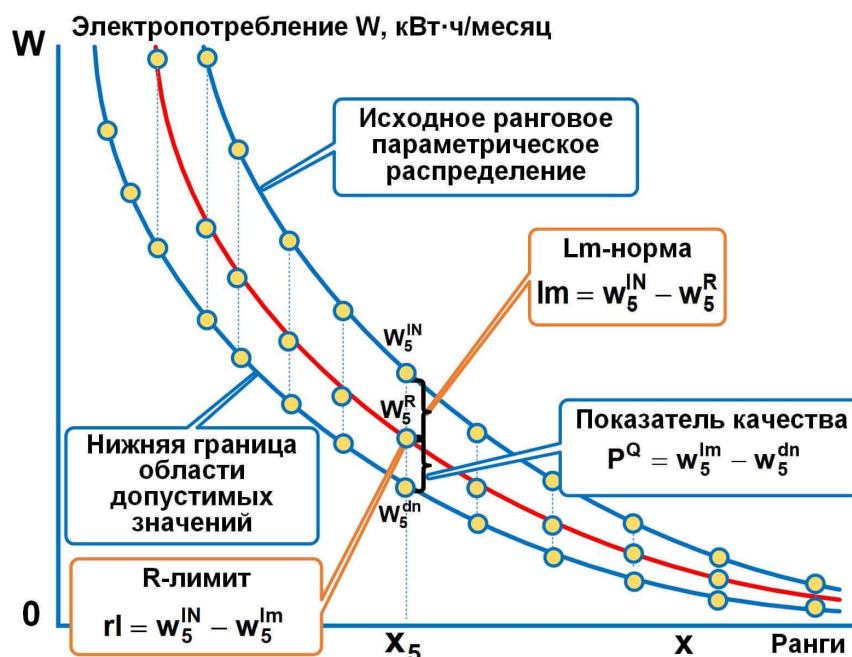


Рис. 2 – Формирование критерия режимного нормирования электропотребления

Определение 2.3. На основе Lm-нормы рассчитывается R-лимит электропотребления, предельная величина электропотребления, предъявляемая объектам после введения R-режима, который численно равен исходному электропотреблению за вычетом Lm-нормы.

Четвертый этап представляет собой расчет показателя качества ограничения электропотребления, представляющего собой меру минимизации потребления электроэнергии приемником или потребителем, при условии обязательного выполнения основных функциональных задач по предназначению. Количественно данный показатель может быть оценен с помощью абсолютного или относительного значения Lm-нормы, под которым понимается отклонение (соответственно, абсолютное или

относительное) значения электропотребления от нижней границы области допустимых значений.

На примере рис. 2 показатель качества ограничения электропотребления для пятого ранга (7) можно представить в виде следующего выражения:

$$P_5^Q = w_5^{lm} - w_5^{dn}, \quad (7)$$

где w_5^{lm} – значение электропотребления на R-распределении для пятого ранга; w_5^{dn} – значение электропотребления на нижней границе области допустимых значений для пятого ранга.

На последнем этапе модели формируется управляющее воздействие по режимному нормированию электропотребления. Его общая технология включает в себя цикл подготовки и принятия решений, который имеет ярко выраженную иерархическую структуру. Для принятия решений в ходе реализации режимного нормирования электропотребления оценивается множество исходов при ограничении электропотребления $G_r = \{g_i^k\}_{i=1}^m$.

Для реализации модели режимного нормирования использовались данные по электропотреблению с 2014 по 2022 гг. крупных потребителей Калининградской области, представленные в схемах и программах перспективного развития электроэнергетики Калининградской области [10].

Оценка адекватности результатов моделирования предполагала два этапа: на первом рассчитывались ошибки моделирования между двумя матрицами данных: данных по электропотреблению на 12 месяцев 2021 г., полученных в результате моделирования (рис. 3) и фактическими данными ограничения электропотребления на 2021 г., импортированными из графиков ограничения электропотребления крупных потребителей на территории Калининградской области по данным АО «Россети Янтарь».

На втором этапе оценки адекватности работы модели производился анализ остатков. Они должны быть независимыми, иметь нулевые средние, одинаковую дисперсию, также их распределение должно быть нормальным. В ходе проверки стандартизированные остатки исследовались на наличие выбросов, под которым в данном случае называется остаток, который по абсолютной величине превосходящий остальные и отличающийся от среднего по остаткам более чем на три стандартных отклонения.

Анализ графиков на рис. 4 показал, что динамика суммарной абсолютной ошибки находится в пределах от $1,3 \cdot 10^6$ до $8,9 \cdot 10^6$ кВт·ч в месяц свидетельствующих о хороших прогностических способностях модельных данных, что подтверждает их качество.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Name	Rang	lim_1	lim_2	lim_3	lim_4	lim_5	lim_6	lim_7	lim_8	lim_9
2	ЗАО «АГРОПРОДУКТ»	1	12144,2	10794,8	97072,8	83205,2	69337,7	65300,6	48975,5	91856,4	45928,2
3	ОАО «ПРИБАЛТИЙСКИЙ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД»	2	59548,4	52931,9	47618,3	40815,7	34013,3	32032,9	24024,7	44667,4	22333,7
4	ООО «МИРАТОРГ ЗАПАД»	3	38917,2	34593,1	31133,5	26685,9	22239,0	20043,7	15707,8	28937,8	14468,9
5	ООО «МОЛОЧНЫЕ ИНВЕСТИЦИИ»	4	28601,7	25423,7	22891,1	19922,1	17945,1	16354,1	14177,02	121072,9	10536,5
6	ООО «ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ АГРО»	5	22412,3	19922,1	17945,1	16354,1	14177,02	121072,9	10536,5	91856,4	45928,2
7	АО «КАЛИНИНГРАДСКИЙ ЯНТАРНЫЙ КОМБИНАТ»	6	18286,1	16254,3	14648,7	12556,1	10463,4	8654,5	7390,87	13208,1	6604,06
8	ООО «ПЯТЫЙ ЭЛЕМЕНТ»	7	15338,8	13634,5	12293,7	10537,5	8781,22	8270,33	6202,74	10961,0	5480,51
9	ЗАО «КАЛИНИНГРАДСКИЙ ЯНТАРНЫЙ КОМБИНАТ»	8	13128,3	11669,6	10527,5	9023,55	7519,63	7082,19	5311,65	9275,7	4637,85
10	МП «КАЛИНИНГРАДСКИЙ ЯНТАРНЫЙ КОМБИНАТ»	9	11409,1	10141,4	9153,75	7846,07	6538,39	6158,09	4618,57	7964,89	3982,45
11	ООО «КАЛИНИНГРАДСКИЙ ЯНТАРНЫЙ КОМБИНАТ»	10	10033,6	8918,7	7918,4	7094,9	6379,5	5775,0	5228,79	4481,82	3734,85
12	МП «КАЛИНИНГРАДСКИЙ ЯНТАРНЫЙ КОМБИНАТ»	11	8908,3	7918,4	7094,9	6379,5	5775,0	5228,79	4481,82	3734,85	3517,8
13	ООО «ВИЧЮНАИ-РУСЬ»	12	7970,53	7094,9	6379,5	5775,0	5228,79	4481,82	3734,85	3517,8	2638,35
14	ОАО «КАЛИНИНГРАДСКАЯ ГЕНЕРИРУЮЩАЯ КОМПАНИЯ»	13	7177,02	6379,5	5775,0	5228,79	4481,82	3734,85	3517,8	2638,35	4219,74
15	ОАО «КАЛИНИНГРАДСКИЙ КАРЬЕР»	14	6496,87	5775,0	5228,79	4481,82	3734,85	3517,8	2638,35	4219,74	2109,87
16	ИП А.Р. АРУТЮНОВ	15	5907,41	5251,03	4757,79	4078,11	3398,42	3200,97	2400,73	3770,32	1885,16
17	ООО «ГАЗПРОМ ГЕОТЕХНОЛОГИИ»	16	5391,63	4792,56	4345,67	3724,86	3104,05	2923,74	2192,8	3377,08	1688,54
18	ВОИНСКИЕ ЧАСТИ	17	4936,53	4388,03	3982,04	3413,18	2844,31	2679,12	2009,34	3030,1	1515,05
19	ООО «ФАРВАТЕР»	18	4532,0	4028,45	3658,81	3136,12	2613,43	2461,69	1846,26	2721,67	1360,84
20	ООО «АВТОТОР-ЭНЕРГО»	19	4170,05	3706,71	3369,6	2888,23	2406,86	2267,14	1700,35	2445,72	1222,86

Рис. 3 – Фрагмент модельных данных по электропотреблению крупных потребителей за 2021 г.

Динамика суммарной относительной ошибки показал высокую точность моделирования в пределах от 6,7 % до 11,2 %. Анализ остатков показал, что они лежат в области доверительного интервала. Это свидетельствует об отсутствии различного рода существенных аномалий. Кроме того, они не имеют ярко выраженных выбросов и распределены по нормальному закону. Это является подтверждением адекватности разработанной модели.

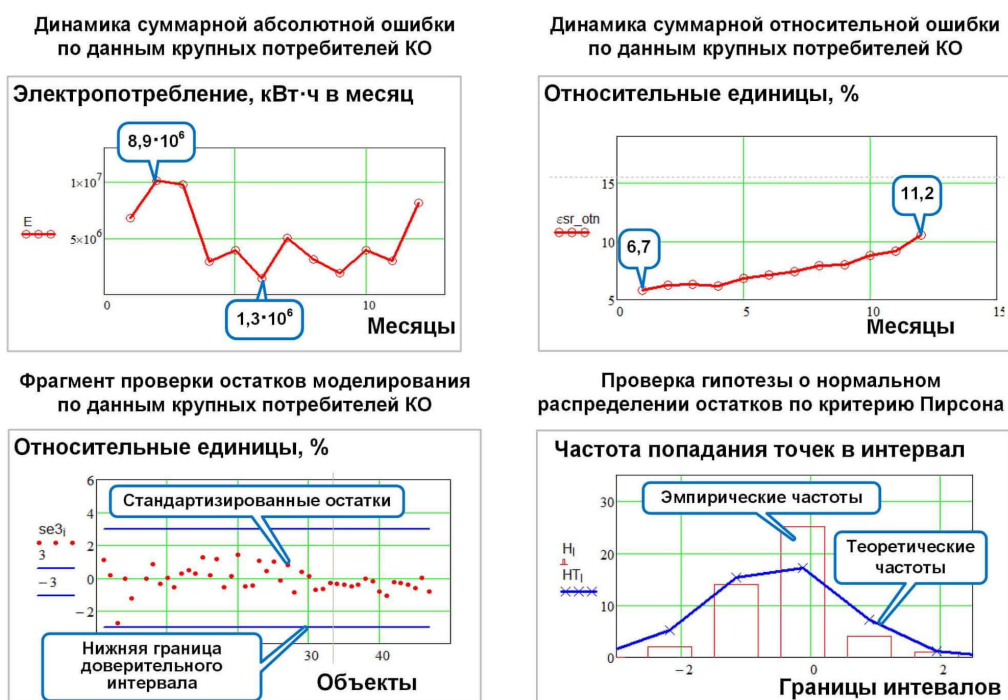


Рис. 4 – Проверка адекватности модели режимного нормирования

Таким образом, разработана модель режимного нормирования, отличающаяся от известных впервые введенными понятиями Im -норма и R -лимит ограничения электропотребления, на основе которых построен научно обоснованный математический аппарат ограничения электропотребления в условиях ресурсных ограничений.

Обеспечение устойчивого электропотребления и сохранение технологических процессов на объектах региона в изолированном режиме функционирования энергосистемы осуществляется на пяти этапах модели: импорте, обработки и верификации данных, мониторинга электропотребления, формировании критерия режимного нормирования, расчете показателя качества ограничения электропотребления и формировании управляющего воздействия.

Литература

1. Дебиев М.В., Курбанов З.М., Кагиров Х.Л., Исаев М.Р., Дебиева А.М. Автоматизированная система управления региональными электрическими

сетями // Инженерный вестник Дона. 2025. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10124 (дата обращения: 20.07.2025).

2. Фрасын П.Г., Никитин Н.В. Методологические основания выбора средств автоматизации сопровождения программной среды верхнего уровня автоматизированных систем управления технологическими объектами// Инженерный вестник Дона. 2025. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10124 (дата обращения: 20.07.2025).

3. Simon, H. A. Administrative Behavior: A Study of Decision Making Processes in Administrative Organization / New York: The Free Press, 1947, – P. 67–92.

4. Wiener, N. Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine. – 1948. – P. 37–46.

5. Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В., Режимное нормирование электропотребления при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4-3(42). – С. 116-120.

6. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов / Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во Калининградского инновационного центра «Техноценоз»], [2012]. – URL: gnatukvi.ru/index.files/zakon.pdf.

7. Кивчун О.Р. Методика режимного нормирования электропотребления объектов регионального электротехнического комплекса в условиях ресурсных ограничений. Известия тульского государственного университета. Тула Издательство ТулГУ 2023, Выпуск 11, С. 157-163.

8. Гнатюк, В. И. Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению. – URL: gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf (дата обращения: 06.07.2025).

9. Кивчун, О. Р. Векторный ранговый анализ. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. – URL: gnatukvi.ru/vran.pdf.

10. Разработка и реализация методов управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса в условиях ресурсных ограничений (на примере Калининградской области): отчет о НИР / рук/ В. И. Гнатюк; исполн.: Кивчун О. Р. [и др.] БФУ им. И. Канта. – Калининград, 2024. – 356 с. – Рег. № НИОТР 124100300181-7.

References

1. Debiev M.V., Kurbanov Z.M., Kagiroy X.L., Isaev M.R., Debieva A.M. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2025. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10124 (date assessed: 20.07.2025).
2. Frasy`n P.G., Nikitin N.V. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2025. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2025/10124 (date assessed: 20.07.2025).
3. Simon, H. A. Administrative Behavior: A Study of Decision Making Processes in Administrative Organization. New York: The Free Press, 1947, pp. 67–92.
4. Wiener, N. Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine. 1948. pp. 37–46.
5. Gnatyuk V.I., Kivchun O.R., Lucenko D.V., Morozov D.G. Morskie intellektual`ny`e texnologii. 2018. № 4-3(42). pp. 116-120.
6. Gnatyuk V.I. Izd-vo Kaliningradskogo innovacionnogo centra «Texnocenoz», 2012. URL: gnatukvi.ru/index.files/zakon.pdf.
7. Kivchun O.R., Morozov D.G. Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tula Izdatel'stvo TulGU 2023, Vy`pusk 11, pp. 157-163.
8. Gnatyuk, V. I. Cifrovoj dvojn timer texnocenoza po e`lektropotrebleniyu [The digital twin of the technocenosis of power consumption]. URL: gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyin.pdf.
9. Kivchun, O. R. Vektorny`j rangovy`j analiz. [Vector rank analysis]. Kaliningrad: Izd-vo KICz «Texnocenoz», 2019. URL: gnatukvi.ru/vran.pdf.



10. Razrabotka i realizaciya metodov upravleniya e`lektropotrebleniem ob`ektov regional`nogo e`lektrotexnicheskogo kompleksa v usloviyax resursny`x ograni-chenij (na primere Kaliningradskoj oblasti) [Development and implementation of power consumption management methods for regional electrotechnical facilities under resource constraints (using the Kaliningrad Region as an example)] : Kivchun O. R., otchet o NIR ruk V. I. Gnatyuk; ispoln.: BFU im. I. Kanta. Kaliningrad, 2024. 356 s. Reg. № NIOTR 124100300181-7.

Дата поступления: 8.07.2025

Дата публикации: 25.08.2025