

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

*Н. В. Устюгов, О. М. Проталинский*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Москва, Российская Федерация*

Цель исследования: построить математическую модель прогноза потребления электрической энергии и мощности для шести ценовых категорий в системе электроснабжения предприятия и на ее основе разработать алгоритм, позволяющий потребителю выбрать выгодную стоимость электроэнергии. Рассмотрение системы как целостного комплекса взаимодействующих объектов велось с позиции причинно-следственных связей и взаимного влияния. Для анализа научных данных применялись принципы системности, структуризации, целостности, иерархичности и множественности. Структурно-функциональный подход позволил изучить элементы (подсистемы) и зависимости между ними в рамках единой системы. Проведено исследование текущего состояния, на основе исходных данных выполнен прогноз электрического потребления предприятия, построена математическая модель электрической энергии и мощности для шести ценовых категорий, разработан алгоритм определения ценовой категории, позволяющий найти финансово выгодную ценовую категорию. Проведенное исследование является основой для выбора потребителями на территории Российской Федерации финансово выгодной ценовой категории и стоимости электрической энергии. Выполнена независимая экспериментальная проверка алгоритма определения ценовой категории, статья расходов «Оплата потребленной электрической энергии» по объекту сократилась. Эксперимент показывает практическую применимость математической модели прогноза и экономическую эффективность алгоритма определения ценовой категории электрической энергии.

**Ключевые слова:** ценовая категория, электрическая энергия, мощность, потребление электроэнергии, стоимость, прогноз, алгоритм определения, математическая модель.

**Для цитирования:** Устюгов Н. В., Проталинский О. М. Математическая модель потребления электроэнергии в организационно-технической системе // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 3. С. 116–124. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-116-124.

### **Введение**

Управление системой электроснабжения предприятия включает ряд составляющих, одной из которых является оптимизация потребления электрической энергии. Рост цен на электроэнергию и постоянное увеличение объема ее потребления обуславливают актуальность данного вопроса. Оптимизация потребления электроэнергии и минимизация ее стоимости являются перспективными направлениями исследований для мирового сообщества в целом [1–4]. Существует ряд управленческих решений, позволяющих минимизировать затраты на электроснабжение при неизменном объеме вырабатываемой продукции [5–8]. Одним из этих решений является определение оптимальной ценовой категории потребления электроэнергии для предприятия. Ценовая категория определяется из прогноза электропотребления, условий планирования почасового расхода, выбора тарифа на транспортировку и наличия автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии [9–11]. Каждое предприятие может определить для себя ценовую категорию потребления из шести существующих и перейти на одну из них: 1-я и 2-я – для потребителей с единовременно потребляемой мощностью до 670 кВт, остальные – для потребителей с мощностью свыше 670 кВт.

### **Предлагаемое решение задачи**

Решение задачи вычисления оптимальной ценовой категории сводится к построению математической модели прогноза потребления электрической энергии и мощности в системе электро-

снабжения предприятия и реализуется в виде алгоритма нахождения оптимальной ценовой категории, позволяющего потребителю найти выгодную стоимость электроэнергии,  $C_{33}$  [12–15]. В процессе моделирования мощность выступает как физическая величина, характеризующая передачу и преобразование электроэнергии.

В качестве критерия оптимальности используем финансовые расходы на оплату потребляемой предприятием электроэнергии [16]:

$$K_{\text{фр}} \rightarrow \min.$$

Для определения ценовой категории на следующем этапе требуется построение математической модели прогноза с горизонтом прогнозирования в 1 год, на основе архивных данных электропотребления с глубиной минимум один предыдущий год [17]. Прогноз необходим для оценки предшествующего потребления электрической энергии и планирования последующего оптимального режима работы электрооборудования.

Первичная обработка архивных данных электропотребления предприятия «Аэропорт Внуково» выявила общую тенденцию: с понедельника по пятницу – скачкообразно высокое потребление: днем максимальное, а ночью минимальное; в нерабочие дни потребление низкое. В дальнейшем анализ показал, что на точность прогноза влияет глубина архивных данных. Максимально точный прогноз можно получить при исследовании электропотребления за все время работы электроустановки.

### Математическая модель

Поскольку математическая модель определения стоимости электрической энергии имеет 6 вариантов расчета, возникает необходимость в декомпозиции построения задачи на 6 составляющих, которые отличаются условиями и исходными данными.

Первая составляющая математической модели определения цены электрической энергии (1-я ценовая категория) подразумевает, что объем электроэнергии рассчитывается в целом за месяц, планирования электропотребления нет, тариф на передачу электрической энергии одноставочный. Математическая модель для объектов первой ценовой категории, позволяющая определить стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч,  $C1_{33}$ :

$$C1_{33} = \Pi_{j,m,n}^{\text{пунцэм}} V_m^{\text{план}};$$

$$\Pi_{j,m,n}^{\text{пунцэм}} = (\Pi_m^{\text{свнцэм}} + \Pi_{j,m}^{\text{сет}} + \Pi_m^{\text{пу}} + \Pi_{m,n}^{\text{сн,эм}});$$

$$\Pi_m^{\text{свнцэм}} = \Pi_m^{\text{свнцэ}} + \lambda_m \Pi_m^{\text{свнцм}} + \Delta \Pi_m^{\text{эм, перерасчет}},$$

где  $\Pi_{j,m,n}^{\text{пунцэм}}$  – предельный уровень нерегулируемых цен электроэнергии и мощности на  $j$ -м уровне напряжения в  $n$  группе потребителей;  $V_m^{\text{план}}$  – планируемое электропотребление за календарный месяц;  $\Pi_m^{\text{свнцэм}}$  – цена за электроэнергию и мощность;  $\Pi_{j,m}^{\text{сет}}$  – одноставочный тариф для требуемого уровня напряжения;  $\Pi_m^{\text{пу}}$  – оплата дополнительных услуг;  $\Pi_{m,n}^{\text{сн,эм}}$  – оплата услуг гарантирующего поставщика;  $\Pi_m^{\text{свнцэ}}$  – средневзвешенная нерегулируемая цена электроэнергии на оптовом рынке;  $\lambda_m$  – коэффициент для мощности;  $\Pi_m^{\text{свнцм}}$  – рыночная цена мощности на оптовом рынке электроэнергии;  $\Delta \Pi_m^{\text{эм, перерасчет}}$  – величина изменения средневзвешенной цены.

Вторая составляющая математической модели стоимости электроэнергии (2-я ценовая категория) предписывает потребление электроэнергии распределять по зонам суток, планировать электропотребление не требуется, тариф на транспортировку одноставочный. Модель стоимости электроэнергии,  $C2_{33}$ :

$$C2_{эз} = \sum_c (z \Pi_{j,m,n,z}^{\text{пунцэм}} \cdot V_m^{\text{план},z});$$

$$\Pi_{j,m,n,z}^{\text{пунцэм}} = \Pi_{m,z}^{\text{свнцэм}} + \Pi_{j,m}^{\text{сет}} + \Pi_m^{\text{пу}} + \Pi_{m,n,z}^{\text{сн,эм}}$$

где  $c = z$  – границы для зон в течение суток;  $\Pi_{j,m,n,z}^{\text{пунцэм}}$  – предельный уровень нерегулируемых цен электроэнергии и мощности в зоне суток;  $V_m^{\text{план},z}$  – объем электроэнергии в зоне суток  $z$ ;  $\Pi_{m,z}^{\text{свнцэм}}$  – средневзвешенная нерегулируемая цена в зоне суток;  $\Pi_{m,n,z}^{\text{сн,эм}}$  – цена услуг гарантирующего поставщика, дифференцированная по зонам суток.

Третья ценовая категория характерна тем, что учет электрической энергии производится по часам, почасовое планирование электропотребления отсутствует, тариф на транспортировку одноставочный. Цена электроэнергии,  $C3_{эз}$ , определяется математической моделью

$$C3_{эз} = \left[ \sum_1^T (\Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм,э}} V_h^{\text{план}}) + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм,м}} N_m^{\text{опфрэ}} \right];$$

$$\Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм,э}} = \Pi_{m,h}^{\text{свнцэ,бр}} + \Pi_{j,m}^{\text{сет}} + \Pi_m^{\text{пу}} + \Pi_{m,n,h}^{\text{сн,э}};$$

$$\Pi_{m,n}^{\text{пунцэм,м}} = \Pi_m^{\text{свнцм}} + \Pi_{m,n}^{\text{сн,м}},$$

где  $\Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм,э}}$  – ставка за электрическую энергию (СЭ);  $V_h^{\text{план}}$  – объем электроэнергии в час  $h$ ;  $\Pi_{m,n}^{\text{пунцэм,м}}$  – ставка за мощность предельного уровня нерегулируемых цен;  $N_m^{\text{опфрэ}}$  – величина мощности почасовых объемов потребления;  $\Pi_{m,h}^{\text{свнцэ,бр}}$  – цена электроэнергии на оптовом рынке, дифференцированная по часам;  $\Pi_{m,n,h}^{\text{сн,э}}$  – сбытовая надбавка гарантирующего поставщика, учитываемая в стоимости электроэнергии в час;  $\Pi_{m,n}^{\text{сн,м}}$  – оплата работ гарантирующего поставщика, входящая в цену за мощность.

Четвертая составляющая математической модели стоимости электроэнергии (для 4-й ценовой категории) определяет, что расчет за электрическую энергию выполняется по часам суток, прогнозирование почасового электропотребления не требуется, тариф на передачу электрической энергии двухставочный. Стоимость электроэнергии,  $C4_{эз}$ , для 4-й ценовой категории определяется математической моделью

$$C4_{эз} = \left[ \sum_1^T (\Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм,э}} V_h^{\text{план}}) + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм,м}} N_m^{\text{опфрэ}} + \Pi_{j,m}^{\text{пунцэм,с}} N_m^{\text{пнд}} \right];$$

$$\Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм,э}} = \Pi_{m,h}^{\text{свнцэ,бр}} + \Pi_{j,m}^{\text{сет,п}} + \Pi_m^{\text{пу}} + \Pi_{m,n,h}^{\text{сн,э}};$$

$$\Pi_{j,m}^{\text{пунцэм,с}} = \Pi_{j,m}^{\text{сет,с}},$$

где  $\Pi_{j,m}^{\text{пунцэм,с}}$  и  $\Pi_{j,m}^{\text{сет,п}}$  – ставка за содержание электрических сетей и нормативных технологических потерь;  $N_m^{\text{пнд}}$  – величина мощности, оплачиваемая потребителем;  $\Pi_{j,m}^{\text{сет,с}}$  – оплата услуг и работ за эксплуатацию электрической сети.

Пятая составляющая математической модели стоимости электроэнергии (5-я ценовая категория) требует при учете электрической энергии фиксировать расход за каждый час, осуществлять прогноз потребления электроэнергии в почасовом виде, расчеты производить по одному тарифу. Математическая модель 5-й ценовой категории, определяющая стоимость электроэнергии,  $C5_{эз}$ :

$$C5_{\text{э3}} = \left[ \sum_1^T \left( \Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм, э1}} V_h^{\text{план}} + \Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э2}} \left( \max \left( V_h^{\text{факт}} - V_h^{\text{план}} \right); 0 \right) \right) + \right. \\ \left. + \Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э3}} \left( \max \left( V_h^{\text{план}} - V_h^{\text{факт}} \right); 0 \right) + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э4}} V_h^{\text{план}} + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э5}} \cdot \left| V_h^{\text{факт}} - V_h^{\text{план}} \right| + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, м}} N_m^{\text{опфрэ}} \right];$$

$$\Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм, э1}} = \Pi_{m,h}^{\text{свнцэ, рсв}} + \Pi_{j,m}^{\text{сет}} + \Pi_m^{\text{пу}} + \Pi_{m,n,h}^{\text{сн, э1}};$$

$$\Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э2}} = \Pi_{m,h}^{\text{свнцэ, +}} + \Pi_{m,n,h}^{\text{сн, э2}};$$

$$\Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э3}} = \Pi_{m,h}^{\text{свнцэ, -}} + \Pi_{m,n,h}^{\text{сн, э3}};$$

$$\Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э4}} = \left| \Pi_m^{\text{рсв, небаланс}} \right| + \left| \Pi_{m,n}^{\text{сн, э4}} \right|;$$

$$\Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э5}} = \left| \Pi_m^{\text{рб, небаланс}} \right| + \left| \Pi_{m,n}^{\text{сн, э5}} \right|;$$

где  $\Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э2}}$  – СЭ, учитывающая разницу между фактическим электропотреблением и плановым;  $\Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э3}}$  – СЭ, прилагаемая к величине превышения планового почасового потребления над фактическим;  $\Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э4}}$  – СЭ, применяемая к сумме плановых почасовых объемов покупки электроэнергии;  $\Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э5}}$  – СЭ, применяемая к сумме фактических и плановых почасовых объемов покупки электроэнергии;  $\Pi_{m,h}^{\text{свнцэ, рсв}}$  – цена электроэнергии, дифференцированная по часам на оптовом рынке;  $\Pi_{m,h}^{\text{свнцэ, +}}$  – цена электроэнергии для объема фактического потребления, превышающего прогнозируемый;  $\Pi_{m,h}^{\text{свнцэ, -}}$  – цена электроэнергии для объема прогнозируемого потребления, превышающего фактический;  $\Pi_m^{\text{рсв, небаланс}}$  – величина электроэнергии, рассчитанная на основе ценовых заявок на сутки вперед;  $\Pi_m^{\text{рб, небаланс}}$  – величина, приходящаяся на единицу электрической энергии, рассчитанная для системы, определяемая на расчетный период.

Шестая составляющая математической модели стоимости электроэнергии (для 6-й ценовой категории) регламентирует, чтобы осуществлялся почасовой учет электроэнергии, прогнозирование выполнялось на каждый час, при расчетах применялись две ставки. Математическая модель для 6-й ценовой категории, определяющая стоимость электроэнергии,  $C6_{\text{э3}}$ :

$$C6_{\text{э3}} = \left[ \sum_1^T \left( \Pi_{j,m,n,h}^{\text{пунцэм, э1}} V_h^{\text{план}} + \Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э2}} \left( \max \left( V_h^{\text{факт}} - V_h^{\text{план}} \right); 0 \right) \right) + \right. \\ \left. + \Pi_{m,n,h}^{\text{пунцэм, э3}} \left( \max \left( V_h^{\text{план}} - V_h^{\text{факт}} \right); 0 \right) + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э4}} V_h^{\text{план}} + \right. \\ \left. + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, э5}} \left| V_h^{\text{факт}} - V_h^{\text{план}} \right| + \Pi_{m,n}^{\text{пунцэм, м}} N_m^{\text{опфрэ}} + \Pi_{j,m}^{\text{пунцэм, с}} N_m^{\text{пнд}} \right].$$

### Результаты исследования

Авторами спроектирован алгоритм, включающий предложенные математические модели, определяющий ценовую категорию электропотребления предприятия (рис. 1).

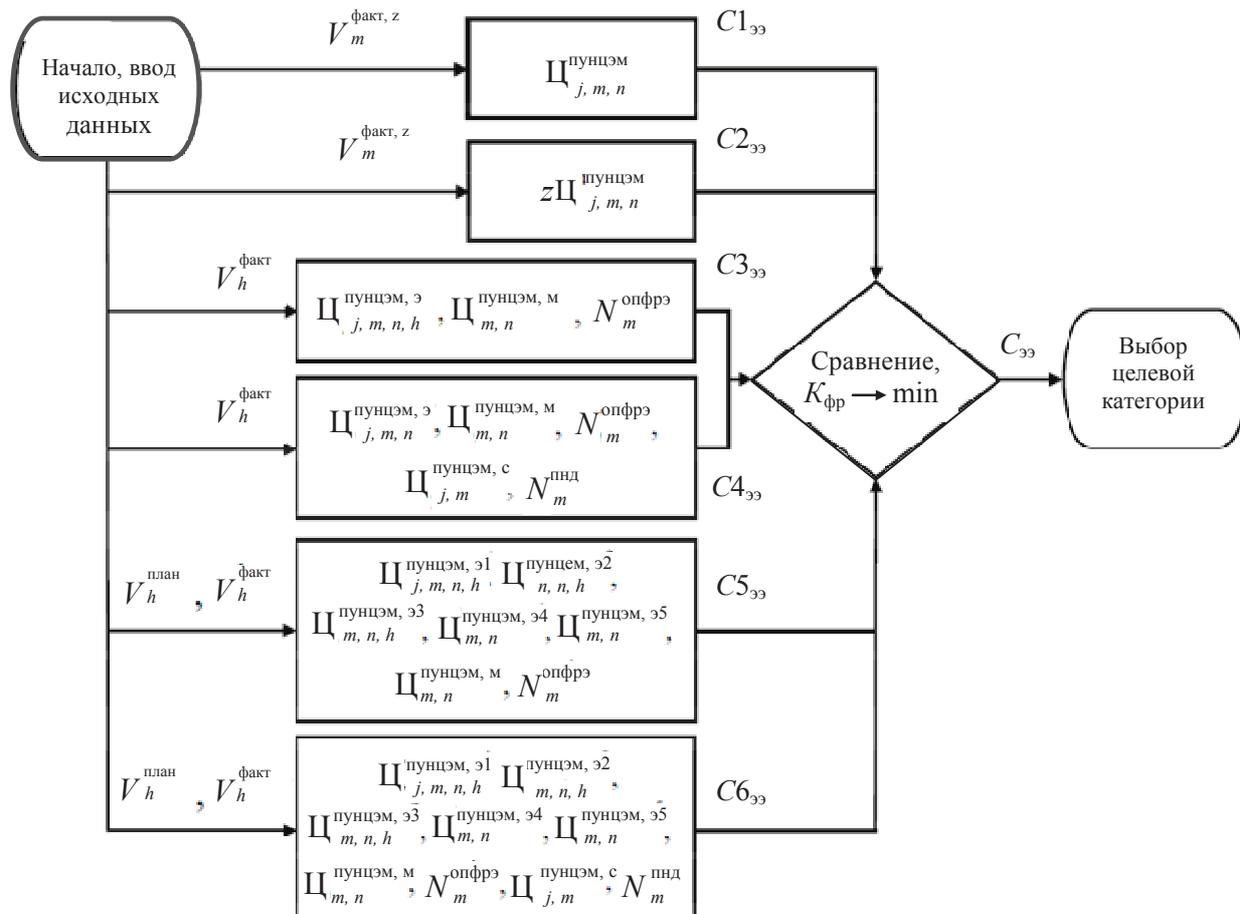


Рис. 1. Алгоритм определения ценовой категории электропотребления предприятия

Среднесрочный прогноз прошел успешную проверку в ходе проведения эксперимента на действующем объекте – стационарном комплексе «Аэропорт Внуково».

Вычисления в алгоритме производятся исходя из предположения, что у потребителя есть возможность произвести технологическое подключение любой необходимой мощности. Вводятся исходные данные в виде архивного потребления электрической энергии за все время работы электроустановки. Выполняется параллельный прогноз по 6-и составляющим, в результате получаем стоимость электроэнергии и производим сравнительный анализ. Вычисления по алгоритму завершаются определением минимальной стоимости электроэнергии и финансово выгодной ценовой категории. Для составления прогноза разработана таблица архивного электропотребления исследуемого объекта, выполненная в программном обеспечении АльфаЦентр (рис. 2).

Тоннели б.протяженности  
N[ 9374 ] т/т Внуково  
с 01-10-2019 до 01-11-2019

Профили по всем измерениям всех фидеров Объекта за период  
с 01-10-2019 до 01-11-2019

упорядочено по 1) кл.напр., 2) N секц., 3) N фид., 4) коду изм.

выгружается 30-10-2019 8

				0.4 кВ секц. 1				0.4 кВ секц. 2			
				Ввод 1		Ввод 1		Ввод 2		Ввод 2	
				5067380		5067380		5067359		5067359	
				A1140		A1140		A1140		A1140	
				30		30		30		30	
				4 000,00000		4 000,00000		4 000,00000		4 000,00000	
				0,000		0,000		0,000		0,000	
(см.справочник АЦ) код изм.				1	2	3	4	1	2	3	4
Календарь				Дпр	Дртд	Рпр	Рртд	Дпр	Дртд	Рпр	Рртд
01.10.2019	вт	рабочий	1 01:00	139,880	0,000	47,956	0,000	92,996	0,000	54,108	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	2 02:00	130,052	0,000	28,964	0,000	91,084	0,000	39,896	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	3 03:00	127,748	0,000	29,420	0,000	90,468	0,000	38,776	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	4 04:00	127,640	0,000	29,888	0,000	88,448	0,000	35,176	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	5 05:00	126,688	0,000	29,720	0,000	87,504	0,000	34,948	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	6 06:00	129,016	0,000	40,980	0,000	94,080	0,000	46,120	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	7 07:00	130,860	0,000	43,644	0,000	94,060	0,000	48,992	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	8 08:00	130,560	0,000	44,052	0,000	95,744	0,000	49,980	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	9 09:00	132,368	0,000	48,876	0,000	97,256	0,000	48,020	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	10 10:00	130,508	0,000	51,032	0,000	93,184	0,000	46,140	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	11 11:00	131,284	0,000	52,172	0,000	97,352	0,000	50,912	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	12 12:00	132,072	0,000	53,072	0,000	97,716	0,000	51,920	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	13 13:00	131,300	0,000	49,440	0,000	97,020	0,000	53,216	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	14 14:00	133,560	0,000	53,308	0,000	96,716	0,000	48,840	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	15 15:00	129,728	0,000	48,308	0,000	96,428	0,000	47,896	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	16 16:00	129,860	0,000	48,380	0,000	93,932	0,000	47,540	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	17 17:00	132,204	0,000	55,680	0,000	96,340	0,000	48,880	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	18 18:00	135,984	0,000	57,140	0,000	95,044	0,000	50,120	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	19 19:00	142,228	0,000	54,368	0,000	89,832	0,000	47,320	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	20 20:00	144,100	0,000	53,224	0,000	90,696	0,000	47,380	0,000
01.10.2019	вт	рабочий	21 21:00	144,104	0,000	54,744	0,000	93,068	0,000	48,484	0,000

Рис. 2. Результаты электропотребления объекта на основе архивных данных

Табличная модель включает архивные данные с 13 ноября 2015 г. по 31 декабря 2018 г. и представляет календарное электропотребление, разделенное по дням недели и часам. Часы установлены как временные интервалы, например: 7-й час – интервал времени с 06:00 до 07:00. Информация в таблице разделена по питающим кабельным линиям и счетчикам электроэнергетики. Потребление фиксируется по 2-м показателям: активная (Апр) и реактивная (Рпр) энергия. По сложившейся практике потребители оплачивают сумму 2-х показателей, полную электрическую мощность (кВт).

### Заключение

Выполнено независимое экспериментальное исследование всех объектов и подсистем в системе электроснабжения предприятия, на примере тоннельного участка со стационарным комплексом «Аэропорт Внуково» произведены вычисления, определение и переход на выгодную ценовую категорию, что привело к экономии в 2019 г. 2,1 млн руб., статья расходов «Оплата потребленной электрической энергии» сократилась на 7,6 %.

Проведено исследование текущего состояния и построена математическая модель стоимости электрической энергии и мощности для системы электроснабжения предприятия, предложен алгоритм, являющийся основой для разработки программного обеспечения, позволяющего на основе исходных данных автоматически построить прогноз электропотребления, вычислить планируемый объем и стоимость электроэнергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wenn sich Vorteile addieren, 01. Juni 2017. URL: <https://www.automationnet.de/wenn-sich-vorteile-addieren-73374> (дата обращения: 21.02.20).
2. Offenheit als Prinzip, 30. September 2019. URL: <https://www.automationnet.de/offenheit-als-prinzip-85840> (дата обращения: 21.02.20).
3. Virtuelle Instrumente, 14. Mai 2019. URL: <https://www.automationnet.de/virtuelle-instrumente-82544> (дата обращения: 21.02.20).

4. *Vernetzte* Möglichkeiten, 24. April 2019. URL: <https://www.automationnet.de/vernetzte-moeglichkeiten-82185> (дата обращения: 20.02.20).
5. *Verteilte* Intelligenz, 04. Oktober 2019. URL: <https://www.automationnet.de/verteilte-intelligenz-85938> (дата обращения: 20.02.20).
6. *Offenheit* als Prinzip, 30. September 2019. URL: <https://www.automationnet.de/offenheit-als-prinzip-85840> (дата обращения: 20.02.20).
7. *Vernetzt* und elektrifiziert, 26. August 2019. URL: <https://www.automationnet.de/vernetzt-und-elektrifiziert-84054> (дата обращения: 20.02.20).
8. *Digitale* Transformation im Blick, 10. April 2019. URL: <https://www.automationnet.de/digitale-transformation-im-blick> (дата обращения: 20.02.20).
9. *Remote* alles im Blick, 20. Mai 2019. URL: <https://www.automationnet.de/remote-alles-im-blick-82626> (дата обращения: 20.02.20).
10. *Einstecken* und loslegen, 15. April 2019. URL: <https://www.automationnet.de/einstecken-und-loslegen-82101> (дата обращения: 20.02.20).
11. *Maschinenbau* 4.0, 18. Juni 2019. URL: <https://www.automationnet.de/maschinenbau-4-0-83273> (дата обращения: 20.02.20).
12. *Fachkonferenz* für industrielle Automatisierung am 16./17. Mai, 06. Mai 2019. URL: <https://www.automationnet.de/fachkonferenz-fuer-industrielle-automatisierung-am-16-17-mai-81764> (дата обращения: 20.02.20).
13. *Automatisierung* auf neuem Niveau, 22. Februar 2018. URL: <https://www.automationnet.de/automatisierung> (дата обращения: 20.02.20).
14. *Was* wird kommen, 29. März 2018. URL: <https://www.automationnet.de/was-wird-kommen-74030> (дата обращения: 20.02.20).
15. *Planen* auf vielen Ebenen, 21. Februar 2019. URL: <https://www.automationnet.de/planen-auf-vielen-ebenen-80800> (дата обращения: 20.02.20).
16. *Участникам* оптового рынка. URL: <https://www.ats-energo.ru/uchastnikam-optovogo-ryn-ka/rynok-moschnosti> (дата обращения: 19.02.20).
17. *Тарифы* и оплата. URL: <https://www.mosenergo-sbyt.ru/website/faces/individuals/tariffs-n-payments> (дата обращения: 19.02.20).

Статья поступила в редакцию 28.02.2020

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Устюгов Никита Викторович** – Россия, 111250, Москва; Национальный исследовательский университет «МЭИ»; аспирант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами; [ustyugovnv@dom.mos.ru](mailto:ustyugovnv@dom.mos.ru).

**Проталинский Олег Мирославович** – Россия, 111250, Москва; Национальный исследовательский университет «МЭИ»; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами; [protalinskiy@gmail.com](mailto:protalinskiy@gmail.com).



## MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION IN ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEM

*N. V. Ustyugov, O. M. Protalinskiy*

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The article presents the purpose of the study as building a mathematical model for forecasting the consumption of electric energy and power for six price categories in the power sup-

ply system of the enterprise and developing an algorithm that allows the consumer to choose the best cost of electricity. Consideration of the system as an integral complex of interacting objects was carried out from the standpoint of cause-effect relationships and mutual influence. For the analysis of scientific data, the principles of consistency, structuring, integrity, hierarchy and multiplicity were applied. The structural-functional approach allowed to study the elements (subsystems) and the dependencies between them within a single system. The study of the current state was carried out; a forecast was made of the electric consumption of the enterprise using the initial data; a mathematical model of electric energy and power was developed for six price categories; an algorithm for determining the price category was developed, which allows finding a financially profitable price category. The study can be used as the basis for consumers in the Russian Federation to choose a financially favorable price category and cost of electric energy. There has been performed an independent experimental verification of the algorithm for determining the price category, the item of expenses “payment of consumed electric energy” for the facility has been reduced. The experiment shows the practical applicability of the mathematical forecast model and the economic efficiency of the algorithm for determining the price category of electric energy.

**Key words:** price category, electric energy, power, electric power consumption, cost, forecast, determination algorithm, mathematical model.

**For citation:** Ustyugov N. V., Protalinskiy O. M. Mathematical model of electric power consumption in organizational-technical system. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2020;3:116-124. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-116-124.

#### REFERENCES

1. *Wenn sich Vorteile addieren, 01. Juni 2017*. Available at: <https://www.automationnet.de/wenn-sich-vorteile-addieren-73374> (accessed: 21.02.20).
2. *Offenheit als Prinzip, 30. September 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/offenheit-als-prinzip-85840> (accessed: 21.02.20).
3. *Virtuelle Instrumente, 14. Mai 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/virtuelle-instrumente-82544> (accessed: 21.02.20).
4. *Vernetzte Möglichkeiten, 24. April 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/vernetzte-moeglichkeiten-82185> (accessed: 20.02.20).
5. *Verteilte Intelligenz, 04. Oktober 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/verteilte-intelligenz-85938> (accessed: 20.02.20).
6. *Offenheit als Prinzip, 30. September 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/offenheit-als-prinzip-85840> (accessed: 20.02.20).
7. *Vernetzt und elektrifiziert, 26. August 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/vernetzt-und-elektrifiziert-84054> (accessed: 20.02.20).
8. *Digitale Transformation im Blick, 10. April 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/digi-tale-transformation-im-blick> (accessed: 20.02.20).
9. *Remote alles im Blick, 20. Mai 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/remote-alles-im-blick-82626> (accessed: 20.02.20).
10. *Einstecken und loslegen, 15. April 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/einstecken-und-loslegen-82101> (accessed: 20.02.20).
11. *Maschinenbau 4.0, 18. Juni 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/maschinenbau-4-0-83273> (accessed: 20.02.20).
12. *Fachkonferenz für industrielle Automatisierung am 16./17. Mai, 06. Mai 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/fachkonferenz-fuer-industrielle-automatisierung-am-16-17-mai-81764> (accessed: 20.02.20).
13. *Automatisierung auf neuem Niveau, 22. Februar 2018*. Available at: <https://www.automationnet.de/automatisierung> (accessed: 20.02.20).
14. *Was wird kommen, 29. März 2018*. Available at: <https://www.automationnet.de/was-wird-kommen-74030> (accessed: 20.02.20).
15. *Planen auf vielen Ebenen, 21. Februar 2019*. Available at: <https://www.automationnet.de/planen-auf-vielen-ebenen-80800> (accessed: 20.02.20).

16. *Uchastnikam optovogo rynka [Participants of the wholesale market]*. Available at: <https://www.ats-energo.ru/uchastnikam-optovogo-ryn-ka/rynok-moschnosti> (accessed: 19.02.20).

17. *Tarify i oplata [Tariffs and payment]*. Available at: <https://www.mosenergo-sbyt.ru/website/faces/individuals/tariffs-n-payments> (accessed: 19.02.20).

The article submitted to the editors 28.02.2020

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

***Ustyugov Nikita Victorovich*** – Russia, 111250, Moscow; National Research University “Moscow Power Engineering Institute”; Postgraduate Student of the Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; [ustyugovnv@dom.mos.ru](mailto:ustyugovnv@dom.mos.ru).

***Protalinskiy Oleg Miroslavovich*** – Russia, 111250, Moscow; National Research University “Moscow Power Engineering Institute”; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; [protalinskiy@gmail.com](mailto:protalinskiy@gmail.com).

