

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТИ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНОЗЕМЬЯ

3

Том 18

ЛИПЕЦК
ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
2022

**Вести высших учебных заведений Черноземья
Научно-технический журнал**

**Том 18, № 3 (69) – декабрь 2022 г.
Основан в 2005 году**

Главный редактор
д-р техн. наук, проф.
Шпиганович Александр Николаевич

Заместитель главного редактора
д-р техн. наук, проф.
Зацепина Виолетта Иосифовна

Ответственный секретарь
канд. техн. наук, доц.
Шачнев Олег Ярославович

Члены редакционного совета:

Сараев Павел Викторович, д-р техн. наук, доц. (Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк)
Погодаев Анатолий Кириянович, д-р техн. наук, проф. (Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк)
Бялы Витольд, д-р техн. наук, проф. (Силезский технический университет, Польша, Гливице)
Волгчев Станислав, д-р техн. наук, проф. (Лиссабонский университет, Португалия, Лиссабон)
Руомей Ли, д-р техн. наук, проф. (Китайское общество электротехники, Китай)
Краснянский Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф. (Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов)
Лукас Вильмар Адольфович, д-р техн. наук, проф. (Берлинский технический университет, Германия, Берлин)
Найзабеков Абдрахман Батырбекович, д-р техн. наук, проф. (Рудненский индустриальный институт, Казахстан, Рудный)
Сухинин Борис Владимирович, д-р техн. наук, проф. (Тульский государственный университет, Россия, Тула)
Тимошин Сергей Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф. (Гомельский государственный технический университет, Беларусь, Гомель)
Трояновска Малгорзата, д-р техн. наук, проф. (Аграрный университет, Польша, Краков)
Моркун Владимир Станиславович, д-р техн. наук, проф. (Криворожский национальный университет, Украина, Кривой Рог)
Реза Дерахшани, д-р филос. наук (Утрехтский университет, Нидерланды, Утрехт)

Редакционная коллегия выпуска:

Электроэнергетика

Чернышова Т.И., д-р техн. наук, проф. (Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов)
Качанов А.Н., д-р техн. наук, проф. (Орловский государственный университет, Россия, Орел)
Шевырев Ю.В., д-р техн. наук, проф. (Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Россия, Москва)
Грачева Е.И., д-р техн. наук, проф. (Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань)

Автоматизация и информатика

Клюев Р.В., д-р техн. наук, проф. (Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Россия, Владикавказ)
Калинин В.Ф., д-р техн. наук, проф. (Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов)

Настоящий номер журнала подготовлен к печати Липецким государственным техническим университетом

Адрес редакции:
398055, Липецк, ул. Московская, д. 30, каб. 210.
E-mail: kaf-eo@stu.lipetsk.ru
Контактные телефоны: (4742) 32–80–48; 32–80–49
Факс: (4742) 32–80–48

УДК 621.311

DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОНОПОТРЕБИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ СХЕМНОЙ НАДЕЖНОСТИ**MODELING OF THE TECHNICAL CONDITION OF AN EQUIPMENT OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF MONO CONSUMERS TAKING INTO ACCOUNT CIRCUIT RELIABILITY**

© 2022

Секретарев Юрий Анатольевич^{1,3}, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий**Горшунов Андрей Андреевич^{1,4}**, аспирант кафедры систем электроснабжения предприятий**Меняйкин Денис Анатольевич²**, начальник электротехнической лаборатории**Sekretarev Yuri Anatolyevich^{1,3}**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Power Supply Systems of Enterprises**Gorshunov Andrey Andreevich^{1,4}**, Postgraduate of the Department of Power Supply Systems of Enterprises**Menyakin Denis Anatolyevich²**, Chief of the Electrotechnical Laboratory¹*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск (Россия)*²*АО "Региональные электрические сети" филиал "Новосибирские городские электрические сети", Новосибирск (Россия)*³*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk (Russia)*⁴*Novosibirsk city electric networks branch of JSC "Regional electric networks", Novosibirsk (Russia)***E-mail: sekretarevua@mail.ru****E-mail: gorshunovandrej@yandex.ru****E-mail: denmen1305@mail.ru**³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7908-9586>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4592-9580>

Аннотация: Оценка надежности систем электроснабжения осуществляется на этапах планирования, проектирования и строительства. Расчет схемной надежности осуществляется на основе статистической информации об отказах электрооборудования. Во время эксплуатации происходит изменение технического состояния оборудования, и надежность схемы снижается. Целью статьи является исследование влияния текущего технического состояния элементов на схемную надежность системы электроснабжения. Для расчета надежности схем электроснабжения применены элементы теории вероятностей. Использована статистика об отказах воздушных линий для рассматриваемых схем за 10 лет эксплуатации. Для получения информации о техническом состоянии систем электроснабжения применена методика расчета индекса технического состояния. На основе статистической информации об отказах рассчитаны результирующие показатели надежности и вероятности безотказной работы для каждой схемы. Разработана и реализована имитационная модель для моделирования текуще-

го технического состояния электрооборудования. Реализация модели представлена программным комплексом. Получены значения вероятностей безотказной работы с учетом индекса технического состояния. Значение вероятности безотказной работы рассматриваемых систем электроснабжения с учетом текущего технического состояния их элементов снижается. Полученные оценки показывают необходимость мониторинга текущего технического состояния электрооборудования и регулярного перерасчета значений показателей надежности для схем электроснабжения.

Ключевые слова: надежность, показатели надежности, системы электроснабжения, восстанавливаемые элементы, вероятность безотказной работы, блок-схема, индекс технического состояния, монопотребитель.

Для цитирования: Секретарев Ю.А., Горшунов А.А., Меняйкин Д.А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2022. – Т. 18, № 3 (69). – С. 3–14. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_3.

Abstract: The reliability of power supply systems is assessed at the planning, design and construction stages. The calculation of circuit reliability is carried out on the basis of statistical information about failures of electrical equipment. During operation, the technical condition of the equipment changes, and the reliability of the circuit decreases. The purpose of the article is to study the influence of the current technical condition of the elements on the circuit reliability of the power supply system. Elements of probability theory are applied to calculate the reliability of power supply schemes. Statistics on overhead line failures for the considered power supply schemes over 10 years of operation were used. To obtain information about the technical condition of power supply systems, the method of calculating the technical condition index is applied. Using statistical information about failures, the resulting reliability indicators and the probability of failure-free operation for each power supply scheme are calculated. A simulation model has been developed and implemented to simulate the current technical condition of electrical equipment. The implementation of the model is represented by a software package. The values of the probabilities of trouble-free operation are obtained taking into account the index of technical condition. The value of the probability of trouble-free operation of the considered power supply systems, taking into account the current technical condition of their elements, is reduced. The obtained estimates show the need to monitor the current technical condition of electrical equipment and regularly recalculate the values of reliability indicators for power supply schemes.

Keywords: reliability, reliability indicators, power supply systems, recoverable elements, probability of trouble-free operation, block diagram, technical condition index, monoconsumer.

For citation: Sekretarev Y.A., Gorshunov A.A., Menyakin D.A. Modeling of the technical condition of an equipment of power supply systems of mono consumers taking into account circuit reliability // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2022. – Vol. 18, № 3 (69). – P. 3–14. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_3.

ВВЕДЕНИЕ

Элементы систем электроснабжения (коммутационные аппараты, линии электропередач, трансформаторы и др.) оказывают значительное влияние на схемную надежность при проведении расчетов. Помимо этого влияние на расчеты надежности оказывает и режим работы системы (ограничения пропускной способности, степень резервирования и др.).

Свойство изделия, которое способно реализовывать функции, учтенные при проек-

тировании, при этом сохраняя эксплуатационные характеристики в определенном диапазоне за время своей эксплуатации, называется надежностью. Надежность системы электроснабжения – свойство снабжать электроэнергией потребителей с сохранением качества в соответствии с действующими нормативами.

Оценка надежности системы электроснабжения производится на стадиях разработки, проектирования, планирования систем электроснабжения. Расчеты надежности проводятся на основе статистической

информации об отказах электрооборудования, собранной за определенный период времени. Полученные оценки надежности не являются постоянными. В течение всего времени эксплуатации происходит старение оборудования, существенно влияющее на состояние системы электроснабжения.

Для снижения частоты отказов электрооборудования в системах электроснабжения необходимо получать достоверные данные о мониторинге технического состояния элементов схемы. Отсутствие данной информации приводит к увеличению частоты отказов, снижению надежности, производительности и эффективности оборудования промышленных предприятий. Ведение учета текущего технического состояния оборудования в течение всего времени эксплуатации позволит увеличивать интенсивность контроля на направлениях, имеющих наибольшие риски.

Целью данной статьи является исследование влияния текущего технического состояния элементов на схемную надежность систем электроснабжения. В качестве рассматриваемых элементов выбраны воздушные линии (ВЛ) классом напряжения 35 кВ. ВЛ являются восстанавливаемыми элементами и обладают несколькими показателями надежности.

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

Для оценки схемной надежности применяются различные показатели надежности. Для расчетов восстанавливаемых элементов схемы применяется параметр потока отказов ω (ППО). Данный показатель характеризуется средним количеством отказов элемента за единицу рассматриваемого времени. ППО выражает частоту отказов или интенсивность отказов элемента. На основе собранной статистики об отказах за определенный период времени ППО рассчитывается по формуле (1).

$$\omega = \frac{m}{n \times T}, \quad (1)$$

где m – количество отказов; n – число рассматриваемых элементов; T – время, за которое происходило наблюдение, год.

Помимо ППО основными показателем надежности также является среднее время восстановления. Среднее время восстановления – время необходимое для восстановления отказавшего элемента. Расчет данного показателя осуществляется по формуле (2).

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}, \quad (2)$$

где t_i – время восстановления i -ого элемента, ч; m – число рассматриваемых элементов.

Распределение Пуассона, выраженное формулой (3), применимо для описания простейшего потока событий.

$$P = \frac{(\lambda \times t)^k}{k!} e^{-\lambda \times t}, \quad (3)$$

где λ – ППО или частота отказов, 1/год; k – количество произошедших событий за интервал времени; t – интервал времени, в течение которого рассматриваются события, год.

При проведении расчетов вероятности безотказной работы применяется формула (3) Пуассона, где предполагается, что рассматриваемые события (отказы) отсутствуют $k = 0$. Тогда выражение, применяемое для расчета вероятности безотказной работы рассматриваемого объекта или элемента, примет вид (4).

$$P = e^{-\omega \times T}, \quad (4)$$

где ω – параметр потока отказов элемента, 1/год; T – интервал времени, в течение которого рассматриваются события, год.

Применяя теорему о противоположных событиях, вероятность отказа элемента можно рассчитать по формуле (5) [1,2].

$$Q = 1 - P. \quad (5)$$

Для удобства расчетов схемной надежности часто применяется метод блок-схем [3,4]. Метод предполагает замену реальных элементов на блоки, характеризующиеся основными показателями надежности дан-

ного элемента. Принцип расчета надежности с применением метода блок-схем заключается в преобразовании элементов (блоков), соединенных последовательно

или параллельно, в один эквивалентный элемент. Преобразованный элемент соединяет два условных узла – генерации и потребителя.

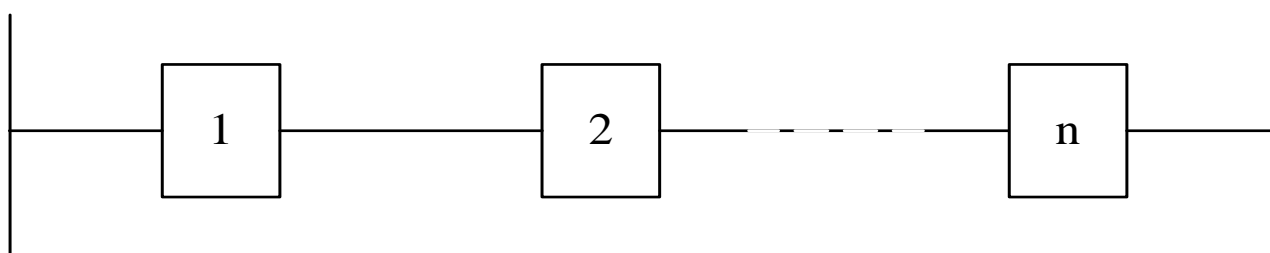


Рис. 1. Схематичное изображение последовательного соединения
Fig. 1. Schematic representation of a serial connection

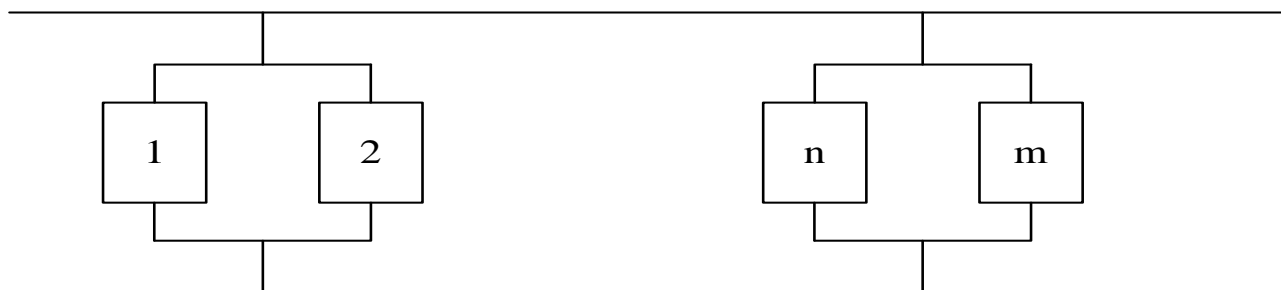


Рис. 2. Схематичное изображение параллельного соединения
Fig. 2. Schematic representation of a parallel connection

Элементы системы электроснабжения могут быть соединены различными способами. Последовательное соединение элементов – это соединение, при котором выход из строя любого элемента в схеме приводит к неработоспособному состоянию всей системы. Для отображения последовательных и параллельных соединений применяют блок – схемы, приведенные на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

Расчет основных показателей надежности (параметра потока отказов и времени восстановления) для последовательно и параллельно соединенных элементов приведен в [5-6].

Показателем технического состояния любого объекта электроэнергетики является интегральная величина – индекс технического состояния (ИТС) единицы оборудования.

Выполнение расчетов индекса технического состояния (ИТС) электрооборудова-

ния производится согласно положениям документа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конструктивные элементы и детали, способные выполнять свои функции только совместно, образуют функциональный узел оборудования и называются группой параметров или факторами. Функциональный узел является составной частью единицы электрооборудования. Порядок расчета ИТС единицы оборудования условно показан на рис. 3. Следовательно, до начала расчетов необходимо произвести оценку каждого отдельного элемента (фактора) или детали. После получения оценок производится расчет функциональных узлов по заданной методике. Результаты расчетов состояния функциональных узлов позволяют получить комплексную оценку всей единицы рассматриваемого оборудования.

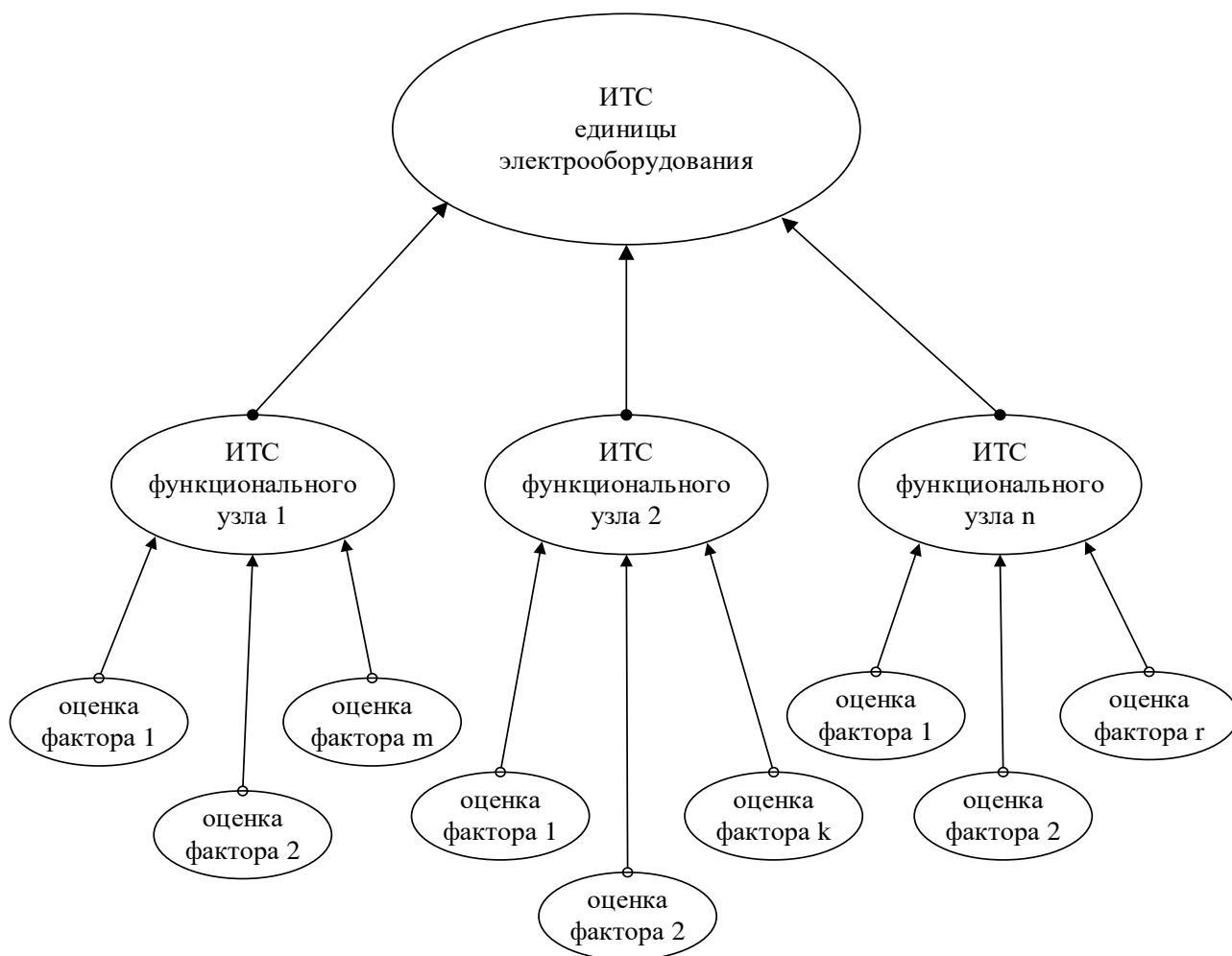


Рис. 3. Схема расчета ИТС единицы оборудования
 Fig. 3. Calculation scheme of TCI unit of equipment

Для определения ИТС единицы оборудования производится оценка технического состояния группы параметров. Для воздушных ЛЭП оценку группы факторов необходимо проводить в отношении каждого отдельного элемента, входящего в состав функционального узла. Оценка производится в ходе технической диагностики [7].

Воздушные ЛЭП классом напряжения 35 кВ и выше являются основным технологическим оборудованием объектов электроэнергетики. Расчет ИТС для данных объектов производится по утвержденной методике [8].

Исследование проводилось для систем электроснабжения монопотребителей. Монопотребитель является потребителем, режим электроснабжения которого полностью зависит от технологических осо-

бенностей производства. Монопотребителями могут являться объекты нефте- и газодобычи [5]. Производство продукции (добыча нефти или газа) является основным видом производства данных потребителей. Свыше 90% потребляемой электроэнергии расходуется непосредственно на добычу. Остановка добывающих установок приводит к резкому снижению потребления электроэнергии. Возникает прямая зависимость между недоотпущенной электроэнергией и выпускаемой продукцией, которая зависит от производительности добывающей установки.

На основе полученных оценок группы параметров производится расчет ИТС функциональных узлов. Полученный результат применяется при расчете ИТС единицы оборудования.

Расчет ИТС функционального узла воздушной линии осуществляется по формуле (6).

$$J_{\text{ф.уз}} = 100 \times \frac{\sum (KB_i \times ОГП_i)}{10}, \quad (6)$$

где KB_i – весовой коэффициент i -ого фактора; $ОГП_i$ – оценка i -ого фактора (группы параметров) в баллах.

Весовой коэффициент – число, которое показывает значимость рассматриваемого узла или групп факторов относительно других узлов и групп, относящихся к рассматриваемому оборудованию [8].

Расчет ИТС единицы оборудования осуществляется по формуле (7).

$$J = \sum (KB_i \times J_{\text{ф.уз}}), \quad (7)$$

где KB_i – весовой коэффициент для i -ого функционального узла; $J_{\text{ф.уз}}$ – индекс технического состояния функционального узла.

ИТС в зависимости от текущего технического состояния элементов оборудования может принимать значения в интервале от 0 до 100 баллов, где 0 – наихудшая оценка состояния, соответственно 100 – наилучшая.

Схемная надежность характеризуется вероятностью безотказной работы P . При

учете фактического технического состояния электрооборудования, отличного от идеального, происходит уменьшение вероятности безотказной работы всей схемы. Событие, характеризующееся вероятностью безотказной работы всей схемы, и событие, связанное с текущим техническим состоянием единицы электрооборудования, считаются независимыми.

Для расчета фактической вероятности безотказной работы применяется показатель ИТС по формуле (8).

$$P_{\text{ИТС}} = P \times J, \quad (8)$$

где P – вероятность безотказной работы, характеризующая схемную надежность; J – индекс технического состояния единицы электрооборудования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе результатов экспертизы, проведенной сотрудниками ПАО «Газпромнефть» были получены веса группы факторов и узлов рассматриваемого электрооборудования. В табл. 1 приведены исходные данные – оценки группы параметров и весовые коэффициенты. В рамках примера оценки факторов приняты максимальными – 1 балл.

Таблица 1

Оценка группы параметров

Table 1

Evaluation of the group of parameters

Узел	Группа параметров (факторы)	Оценка	Весовые коэффициенты
Опора	Крепления	1	0,3
	Подкосы и стойки	1	0,1
	Изоляторы, траверсы, крюки	1	0,2
	Заземляющие устройства	1	0,1
	Разрядники	1	0,3
Пролет	Трасса ВЛ	1	0,3
	Провода	1	0,7

Расчет индекса технического состояния, хотя бы одной единицы электрооборудования, является задачей трудоемкой. Процесс расчета может быть автоматизи-

рован с помощью вычислительных мощностей ЭВМ. Для составления алгоритма программы автоматизированного расчета

был проведен процесс нормирования весовых коэффициентов.

Результат нормирования весовых коэффициентов представлен в табл. 2.

Нормирование весовых коэффициентов

Таблица 2

Normalization of weight coefficients

Table 2

Узел	Параметры	Вес параметров	Вес узла	Результат
Опора	Крепления	0,3	0,334	0,1
	Подкосы и стойки	0,1	0,334	0,03
	Траверса	0,2	0,334	0,07
	Заземляющие устройства	0,1	0,334	0,03
	Разрядники	0,3	0,334	0,1
Пролет	Трасса ВЛ	0,3	0,666	0,2
	Провода	0,7	0,666	0,47
Σ	-	-	-	1

В данной статье рассматриваются двухцепные воздушные линии. Для моделирования информации мониторинга технического состояния данных воздушных линий необходимо преобразовать весовые коэффициенты, приведенные в табл. 2, для функционального узла – пролет. Опора двухцепной линии в составе единицы

электрооборудования является единственным функциональным узлом. Пролет является единственным функциональным узлом, который характеризует одну цепь линии, соответственно на двухцепных линиях данных узлов расположено 2. Веса для узла – пролет представлены в табл. 3.

Весовые коэффициенты функционального узла – пролет

Таблица 3

Weight coefficients of the functional node – span

Table 3

Узел	Параметры	Левая цепь	Правая цепь	Σ
Пролет	Трасса ВЛ	0,2	0,2	0,4
	Провода	0,47	0,47	0,94

Отсутствие статистической информации по частоте появления и скорости распространения дефектов на электрооборудовании, в частности на рассматриваемых воздушных линиях, вызывает сложности в расчетах ИТС единиц электрооборудования. Предполагается, что оценка параметров является случайной величиной от 0 до 1 (0 – наихудшее состояние, 1 – наилучшее) [9]. Для получения необходимых оценок была составлена математическая модель, имитирующая появление дефектов в электрооборудовании с течением времени.

Для моделирования случайной величины применяются псевдослучайные числа. Псевдослучайные числа – последовательность чисел свойственно близкая к последовательности случайных чисел. Для получения псевдослучайных чисел используется генератор – формула или алгоритм, генерирующий последовательность чисел, элементы которой имеют слабую зависимость и подчиняются равномерному (равновероятному) закону распределения [10]. Генератор псевдослучайных чисел реализуется на ЭВМ.

Для получения оценок параметров (факторов) применяется метод статистических

испытаний (метод Монте-Карло). Для этого производится n испытаний для получения n возможных значений и рассчитывается среднее арифметическое.

Математическая модель для моделирования ИТС основана на формулах 6 и 7 и представлена в формуле (9).

$$J = \sum_{i=1}^i \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{RANDOM}_i}{n} \right) \times \text{KB}_i \right), \quad (9)$$

где KB_i – нормированный весовой коэффициент i -ого фактора; RANDOM – псевдослучайное число в диапазоне (0;1); n – количество испытаний; i – количество параметров (факторов).

Разработанная модель была реализована в программном комплексе, имитирующем автоматизированное рабочее место (АРМ). Комплекс способен производить расчеты схемной надежности на основе известной топологии сети, моделировать ИТС и рассчитывать фактическое значение надежности с учетом технического состояния электрооборудования [11].

Программный комплекс состоит из трех основных блоков. Первый блок предназначен для расчетов схемной надежности систем электроснабжения. Входными данными для расчетов являются значения основных показателей надежности и информация о типе соединений элементов рассматриваемой системы. Каждому «входу» и «выходу» элемента присваивается индекс, у резервируемых элементов индексы совпадают. В основе линейного алгоритма расчета находится метод блок – схем и формулы для расчета надежности последовательных и параллельных элементов. Результатом расчетов являются вывод фактических значений показателей и вероятностей отказа и безотказной работы схемы.

Второй блок предназначен для моделирования ИТС рассматриваемой системы электроснабжения. Алгоритм построен на методе Монте-Карло и реализует формулу

(9). Для каждого рассматриваемого параметра определяется число испытаний (циклов). При прохождении через цикл происходит срабатывание генератора псевдослучайных чисел и счетчик цикла увеличивается на единицу. Если счетчик достиг заданного значения испытаний, программа выходит из цикла и переходит к следующему действию, при противоположном исходе цикл будет повторяться, пока не достигнет заданного значения. После прохождения цикла значения элементов последовательностей, полученных для каждого фактора, суммируются и делятся на количество испытаний, получая среднее арифметическое. Оценка, полученная по каждому фактору, умножается на соответствующий весовой коэффициент. Оценки суммируются, образуя значение ИТС, выводимое для пользователя на экран.

Третий блок производит расчеты с учетом результатов оценки схемной надежности в первом блоке и с учетом ИТС, который был получен при моделировании во втором блоке программного комплекса. Алгоритм третьего блока основан на формуле (8). Итоговыми результатами расчетов являются значения фактической вероятности отказа и безотказной работы. Время восстановления объектов не меняется при учете текущего состояния, так как продолжительность ремонтных работ считается неизменной величиной. Схематично работа программного комплекса изображена на рис. 4.

Были составлены и преобразованы блок-схемы для 51 рассматриваемой схемы электроснабжения. Электроснабжение осуществляется для потребителей I и II категорий надежности, следовательно, питающие линии являются двухцепными.

Для расчета надежности всей схемы необходимо преобразовать всю блок-схему в эквивалентный элемент. Преобразование происходит поэтапно, первоначально производится преобразование параллельных элементов, затем последовательных. Участок двухцепной ВЛ представлен тремя блоками.

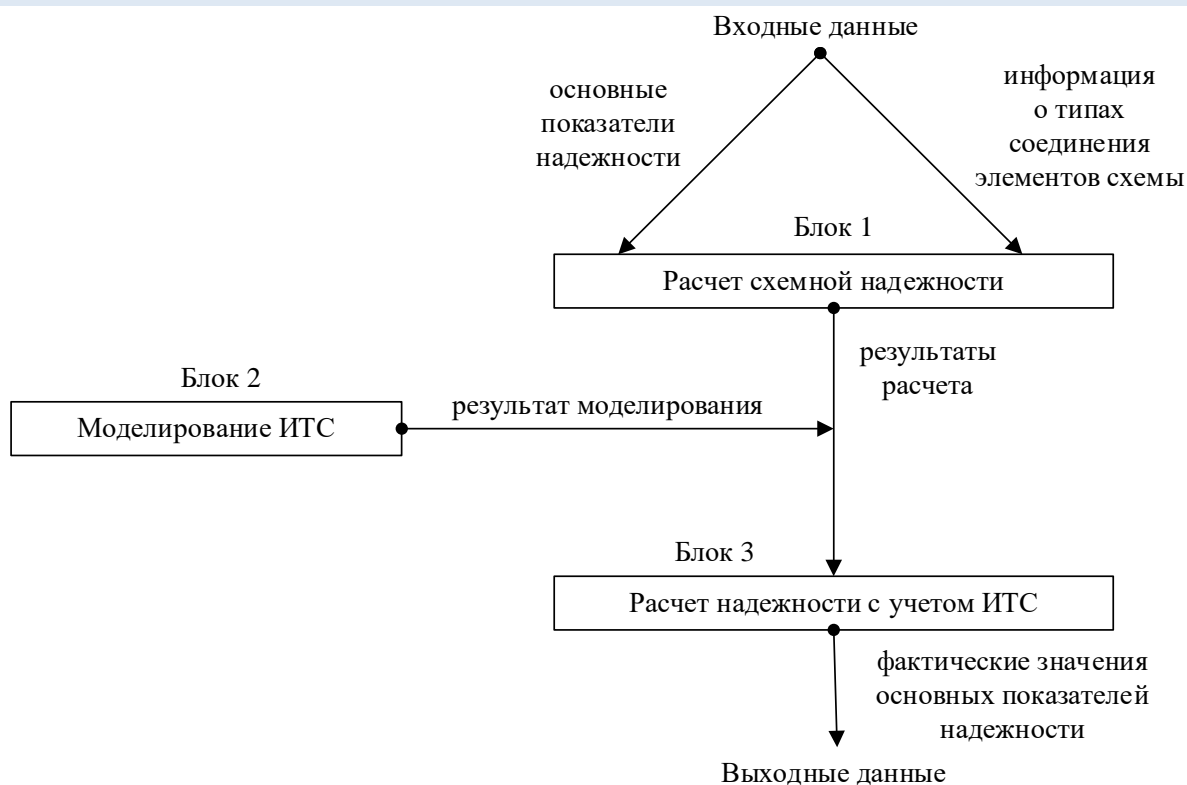
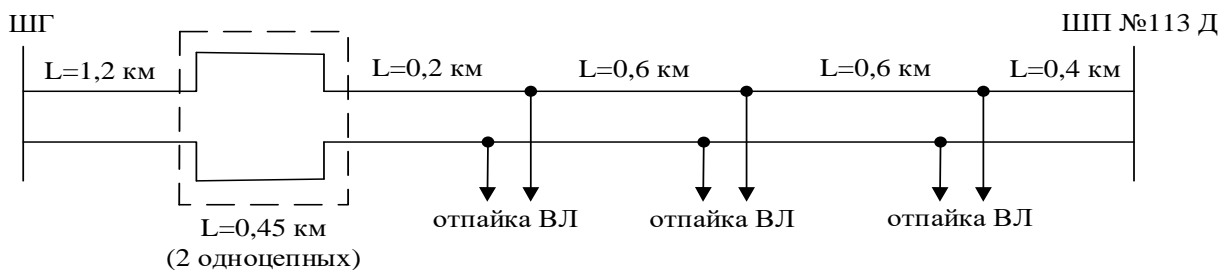
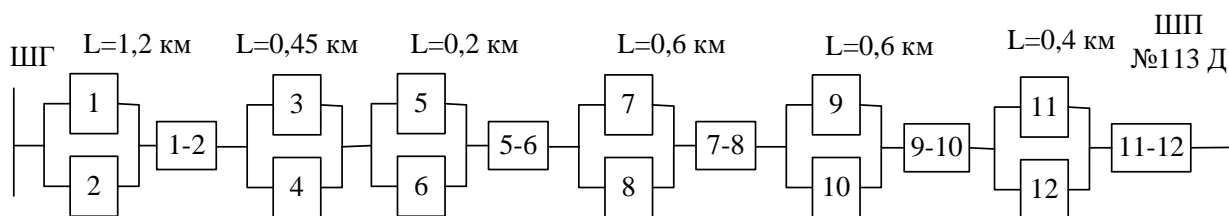


Рис. 4. Схема работы программного комплекса
 Fig. 4. Scheme of operation of the software package



а) схема электроснабжения рассматриваемого потребителя
 a) the power supply scheme of the consumer



б) блок-схема рассматриваемого потребителя
 b) the block diagram of the consumer

Рис. 5. Составление блок-схемы потребителя
 Fig. 5. Drawing up the flowchart of the consumer

Два блока характеризуют возможный отказ каждой отдельной цепи рассматриваемой линии, третий блок характеризует одновременный отказ как первой, так и второй цепи. Особенности географического положения не позволяют строить двухцепную линию на всем протяжении. Участок ВЛ, представленный одноцепными линиями, представлен двумя блоками, характеризующими цепь. На примере одного из потребителей рассмотрен процесс преобразования схемы. На рис. 5а показана

схема электроснабжения потребителя, на рис. 5б составленная блок-схема.

Результаты расчетов схемной надежности и фактического значения надежности с учетом смоделированных данных технического состояния электрооборудования для одного из потребителей приводятся на рис. 6 и 7 соответственно. При учете данных, полученных при моделировании, общая надежность всей схемы значительно снижается, следовательно частота отказов возрастает.

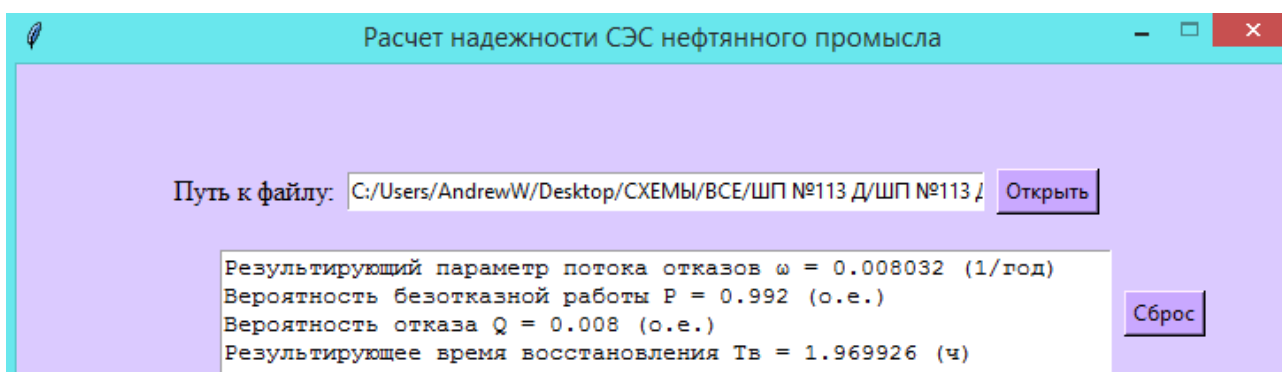


Рис. 6. Интерфейс программы с результатами расчета надежности
Fig. 6. Program interface with reliability calculation results

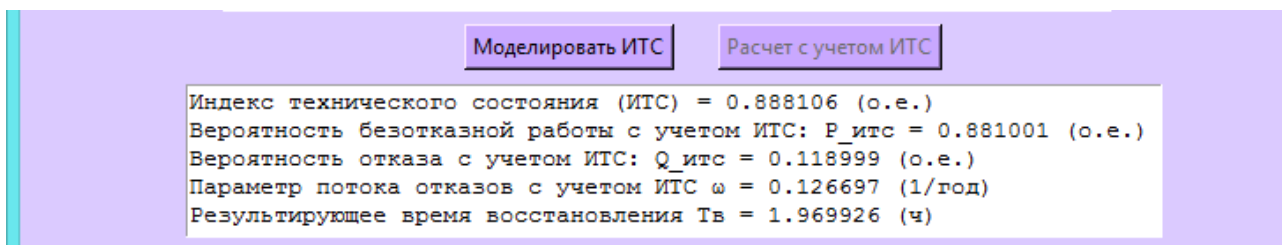


Рис. 7. Интерфейс программы с результатами расчета фактической надежности
Fig. 7. Program interface with the results of calculating the actual reliability

Принятие любых эксплуатационных решений связано с техническим состоянием оборудования. Для оценки надежности схем электроснабжения потребителей необходима актуальная информация об отказах электрооборудования [12-15].

Вероятность отказа рассмотренной схемы СЭС возрастает при учете дефектов, возникающих на электрооборудовании в течение времени эксплуатации объекта. Аналогичный результат, связанный с снижением вероятности безотказной работы, был получен при расчете других 50 рассмотренных схем.

ВЫВОДЫ

1. В данной статье были рассмотрены основные показатели надежности для восстанавливаемых элементов. Оценка схемной надежности производится с помощью метода блок-схем. Рассмотрен метод расчета индекса технического состояния для воздушных линий электропередач.

2. Для реализации алгоритма автоматизированного расчета фактической надежности был произведен процесс нормирования весовых коэффициентов. Для двухцепных ЛЭП результат нормирования рассмотрен-

ных параметров функционального узла «пролет» увеличен в 2 раза.

3. Разработана и реализована в виде программного комплекса математическая модель для расчета ИТС. Были произведены расчеты схемной надежности и надежности с учетом технического состояния элементов системы для 51 схемы.

4. При учете текущего технического состояния электрооборудования результат расчета вероятности безотказной работы схемы одного из рассмотренных потребителей снизился на 11,2%. Максимальное снижение надежности при рассмотрении всех схем достигало 15,7%.

5. С учетом моделируемого текущего технического состояния оборудования результирующая надежность схем электропитания снижается. Оказываемое влияние технического состояния ведет к росту вероятности отказа при оценке надежности. Полученные результаты показывают необходимость вести учет за состоянием отдельных элементов в схемах электроснабжения на протяжении времени эксплуатации. Применение средств мониторинга в реальном времени позволит получать более точную актуальную оценку надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 200 с.
2. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
3. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Chebotareva G.S. et al. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy // Energy Production and Management in the 21st Century IV. V. 246. P. 125-135.
4. Ndawula, M.B., Djokic, S.Z. Hernando-Gil, I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources // Energies. 2019. №12 (3). P. 531
5. Секретарев Ю.А., Левин В.М. Выбор и принятия решений по управлению ремонтами энергооборудования в системах электропитания с монопотребителем // Вестник

Северо-Кавказского федерального университета. 2021. №2 (83). С. 17-25.

6. Секретарев Ю.А., Левин В.М. Оценка влияния на надежность системы электропитания различного рода дефектов ее основных элементов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. № 4 (44). С. 55-63.

7. Байдюк М.А., Комарова Г.В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. №3. С. 78-84.

8. Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей [Электронный ресурс] : приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71679722/> (дата обращения: 5.09.2022)

9. Bounjimi M.E., Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies // International Journal of Engineering Research & Technology. 2021. №10(10). P. 388-393.

10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2003. 479 с.

11. Свидетельство № RU 2022618655. Расчет надежности системы электроснабжения нефтяного промысла в рамках риск-ориентированного подхода / Ю.А. Секретарев, А.А. Горшунов // зарегистр. 13.05.2022. 1 с.

12. Jiang Y., Zhang Zh., McCalley J.D., et al. Risk-based Maintenance Optimization for Transmission Equipment // Proceedings of the Fifteenth International Conference On Systems Engineering (ISENG 2002). Las Vegas, 2002. P 1-7.

13. Левин В.М., Гужов Н.П., Черненко Н.А. и др. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. №2-3(79). С. 139-155.

14. Hashemi-Dezaki H., Askarian-Abyaneh H., Haeri-Khiavi H. Reliability optimization of electrical distribution systems using internal loops to minimize energy not-supplied (ENS).

// *Jornal of Applied Research and Technology*. 2015. №13. P. 416-424.

15. Napoleone L., Roda I., Macchi M. The implications of condition monitoring on asset-related decision-making in the Italian power distribution sector // *IFAC PapersOnLine*. - 2016. Vol. 49, iss. 28. P. 108-113.

REFERENCES

1. Rozanov M.N. Reliability of electric power systems. – M.: Energoatomizdat, 1984. 200 p.

2. Guk Y.B. Reliability analysis of electric power equipment. – L.: Energoatomizdat, 1988. – 224 p.

3. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Chebotareva G.S. et al. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy // *Energy Production and Management in the 21st Century IV*. V. 246. P. 125-135.

4. Ndawula, M.B., Djokic, S.Z. Hernando-Gil, I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources // *Energies*. 2019. №12 (3). P. 531

5. Sekretarev Y.A., Levin V.M. Selection and decision-making on managing repairs of power equipment in power supply systems with mono-consumer // *Vestnik of the North Caucasus Federal University*. 2021. №2 (83). P. 17-25.

6. Sekretarev Y.A., Levin V.M. Evaluation of the effect on the reliability of the electrical supply system of a different kind of defects of its basic elements // *Vestnik of Kazan State Energy University*. 2019. № 4 (44). P. 55-63.

7. Bajdyuk M.A., Komarova G.V. Evaluating technical condition and reliability of electrical machines // *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2019. №3. P. 78-84.

8. On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main

technological equipment and power transmission lines of electric stations and electric networks [Electronic resource] : Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 676 dated July 26, 2017. URL:<https://www.gaant.ru/proucts/ipo/prime/doc/71679722/> (date of access: 5.09.2022)

9. Bounjimi M.E., Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2021. №10(10). P. 388-393.

10. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: Study guide for universities – M.: Vyssh. shk., 2003. 479 P.

11. Certificate No. RU 2022618655. Calculation of reliability of the oil field power supply system within the framework of a risk-oriented approach / Y.A. Sekretarev, A.A. Gorshunov // reg. 13.05.2022. 1 P.

12. Jiang Y., Zhang Zh., McCalley J.D., et al. Risk-based Maintenance Optimization for Transmission Equipment // *Proceedings of the Fifteenth International Conference On Systems Engineering (ISENG 2002)*. Las Vegas, 2002. P. 1-7.

13. Levin V.M., Guzhov N.P., Chernenko N.A. et al. Methodology for managing equipment repairs in oilfield electrical networks // *Scientific Vestnik of Novosibirsk State Technical University*. 2020. №2-3(79). P. 139-155.

14. Hashemi-Dezaki H., Askarian-Abyaneh H., Haeri-Khiavi H. Reliability optimization of electrical distribution systems using internal loops to minimize energy not-supplied (ENS). // *Jornal of Applied Research and Technology*. 2015. №13. P. 416-424.

15. Napoleone L., Roda I., Macchi M. The implications of condition monitoring on asset-related decision-making in the Italian power distribution sector // *IFAC PapersOnLine*. - 2016. Vol. 49, iss. 28. P. 108-113.

УДК 621.3.051.024

DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_15

ГИБРИДНАЯ МИКРОСЕТЬ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

HYBRID AC AND DC MICROGRID BASED ON PHOTOVOLTAIC POWER SOURCES AND RECHARGEABLE BATTERIES

©2022

Зацепина Виолетта Иосифовна, доктор технических наук, профессор
кафедры электрооборудования

Кудрявцев Артем Евгеньевич, аспирант кафедры электрооборудования

Zatsepina Violetta Iosifovna, Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Electrical Equipment

Kudryavtsev Artem Evgenievich, postgraduate student of the Department
of Electrical Equipment

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: tembich001@mail.ru

E-mail: vizatsepina@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8347-4479>

Аннотация: Системы питания постоянного тока достаточно эффективно синхронизируются с возобновляемыми источниками энергии по сравнению с обычными системами на базе переменного тока. Ключевой задачей для успешного внедрения этих систем на рынок является синхронизация с существующими электрическими нагрузками и электросетями в зданиях. Гибридные микросети переменного/постоянного тока сочетают в себе преимущества как систем переменного, так и постоянного тока и могут облегчить процесс интеграции технологий питания постоянным током в существующие системы переменного тока. В этой работе в режиме моделирования исследуется производительность гибридной микросети, соединяющей генерацию энергии фотоэлектрическим способом, а именно со светодиодным освещением в здании. Теоретические и экспериментальные результаты используются для проектирования гибридной микросети.

Ключевые слова: гибридная микросеть, солнечная энергия, аккумуляторная батарея, нагрузки постоянного тока, интеграция в здание

Для цитирования: Зацепина В.И., Кудрявцев А.Е. Гибридная микросеть переменного и постоянного тока на основе фотоэлектрических источников питания и аккумуляторных батарей // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2022. – Т. 18, № 3 (69). – С. 15–23. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_15.

Abstract: DC power systems are quite effectively synchronized with renewable energy sources compared to conventional AC-based systems. A key challenge for the successful market introduction of these systems is synchronization with existing electrical loads and power grids in buildings. Hybrid AC/DC microgrids combine the advantages of both AC and DC systems and can facilitate

the integration of DC power technologies into existing AC systems. In this work, the performance of a hybrid microgrid coupling photovoltaic power generation, specifically with LED lighting in a building, is investigated in simulation mode. The theoretical and experimental results are used to design the hybrid microgrid.

Keywords: Hybrid microgrid, solar power, battery storage, DC loads, building integration

For citation: Zatsepina V.I., Kudryavtsev A.E. Hybrid AC and DC microgrid based on photovoltaic power sources and rechargeable batteries// Vestnik of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2022. – Vol. 18, № 3 (69). – P. 15–23. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_15.

ВВЕДЕНИЕ

Со времен знаменитой "войны токов" в конце 19 века в электрических системах доминирует переменный ток. Одной из причин успеха переменного тока по сравнению с постоянным стало изобретение трансформатора, который может легко преобразовывать энергию при различных уровнях напряжения. Преимущество постоянного тока перед переменным заключается в передаче электроэнергии на большие расстояния с меньшими электрическими потерями [1].

В современном обществе все большее число электрических нагрузок в зданиях, таких как компьютеры, бытовая электроника, светоизлучающие диоды (СИД) или двигатели с переменной частотой вращения питаются постоянным током. В то же время распределенные возобновляемые источники, такие как фотоэлектрические панели, а также аккумуляторы для электромобилей, основаны на постоянном токе. Для интеграции этих технологий в существующие системы электроснабжения переменного тока требуются сложные инверторы постоянного/переменного тока и контроллеры для синхронизации с системами переменного тока и обеспечения высококачественного переменного тока без гармоник. Предыдущая работа показала, что распределение постоянного тока в зданиях в сочетании с генерацией фотоэлектрических элементов и аккумуляторами позволит исключить этапы преобразования переменного тока в постоянный, что приведет к значительному снижению потерь при преобразовании мощности, снижению стоимости компонентов, а также повышению надежности системы [2-4]. Гибридные микросети переменного/постоянного тока были пред-

ложены для улучшения взаимосвязи распределенных энергетических систем, включая многочисленные возобновляемые источники (переменный и постоянный ток), нагрузки, хранилища электроэнергии и электросети. Гибридные микросети переменного/постоянного тока используют преимущества как систем переменного, так и постоянного тока и могут облегчить процесс интеграции технологий питания постоянным током в существующие системы переменного тока.

Предыдущие исследования выявили усовершенствованные схемы контроля и управления питанием для эффективной работы гибридных микросетей переменного/постоянного тока [5-8]. Эта работа посвящена гибридным микросетям, внедренным в зданиях. Представлены результаты моделирования гибридной микросети, соединяющей генерацию фотоэлектрических элементов, аккумуляторную батарею и нагрузки. Модель позволяет проводить детальный анализ производительности системы, влияние размеров компонентов и передовые стратегии управления батареями. В дополнение к теоретическому анализу обсуждаются первоначальные экспериментальные результаты прототипа сети постоянного тока, соединяющей выработку фотоэлектрической электроэнергии со светодиодным освещением в здании. Наконец, представлен дизайн гибридной микросети для жилого исследовательского здания.

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

Микросети постоянного тока в зданиях обещают значительное повышение эффективности и снижение затрат, особенно если они реализуются вместе с фотоэлектрической генерацией на месте и аккумулятор-

ными батареями [9-12]. Несмотря на эти преимущества, существует ряд проблем, который препятствует внедрению микросетей постоянного тока в зданиях. Эти проблемы связаны с отсутствием стандартизированного оборудования (отсутствуют компоненты сети постоянного тока, не все приборы конечного использования имеют возможность подключения к сети постоянного тока) и небольшим промышленным опытом. Поэтому наш подход сосредоточен на гибридных электрических сетях, которые состоят из сетей переменного и постоянного тока, соединенных двунаправленным преобразователем. Таким образом, можно подключать нагрузки как переменного, так и постоянного тока. Топология системы разрабатывается как можно более гибкой, чтобы облегчить последовательную интеграцию технологий постоянного тока в существующие системы переменного тока. Как показано на рис. 1 фотоэлектрические модули подключаются к сети постоянного тока через трекер (MPPT). Батарея подключается через контроллер заряда/разряда. Двунаправленный преобразователь соединяет сеть постоянного и переменного тока. Обратите внимание, что в некоторых коммерческих фотоэлектрических приложении

ях контроллер заряда и двунаправленный преобразователь объединены в одно устройство. Преобразователи постоянного/переменного тока питают нагрузку постоянным током на разных уровнях напряжения. Два напряжения распределения постоянного тока могут использоваться для питания мощных и маломощных нагрузок. Например, стандарт высокого (380 В) и низкого (24 В) напряжения для распределения постоянного тока в центрах обработки данных и жилых домах готовится EMerge Alliance.

В предыдущей работе была разработана модель для оценки производительности микросети постоянного тока. В случае фотоэлектрической системы, рассчитанной на годовую потребность здания (с установленной мощностью 7,4 кВт), микросеть постоянного тока позволяет снижать потери на преобразование энергии примерно на 20% без аккумулятора и на 30% с аккумулятором, что соответствует 2-4% от общей потребности здания в электроэнергии. Кроме того, оценивается влияние фотоэлектрических элементов и размера аккумуляторной батареи на производительность системы.

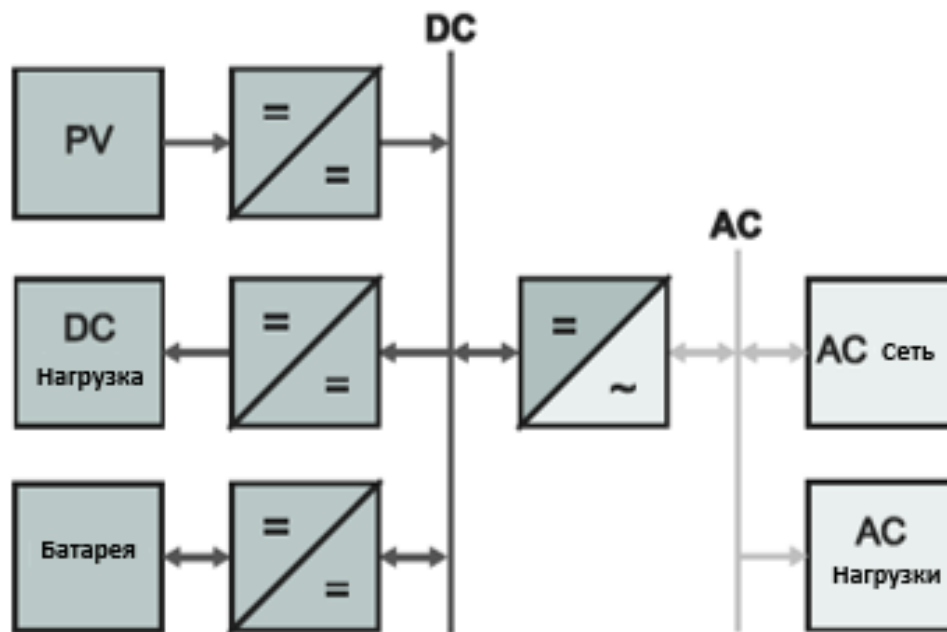


Рис. 1. Гибридная модель микросети переменного/постоянного тока
 Fig. 1. Hybrid AC/DC microgrid model

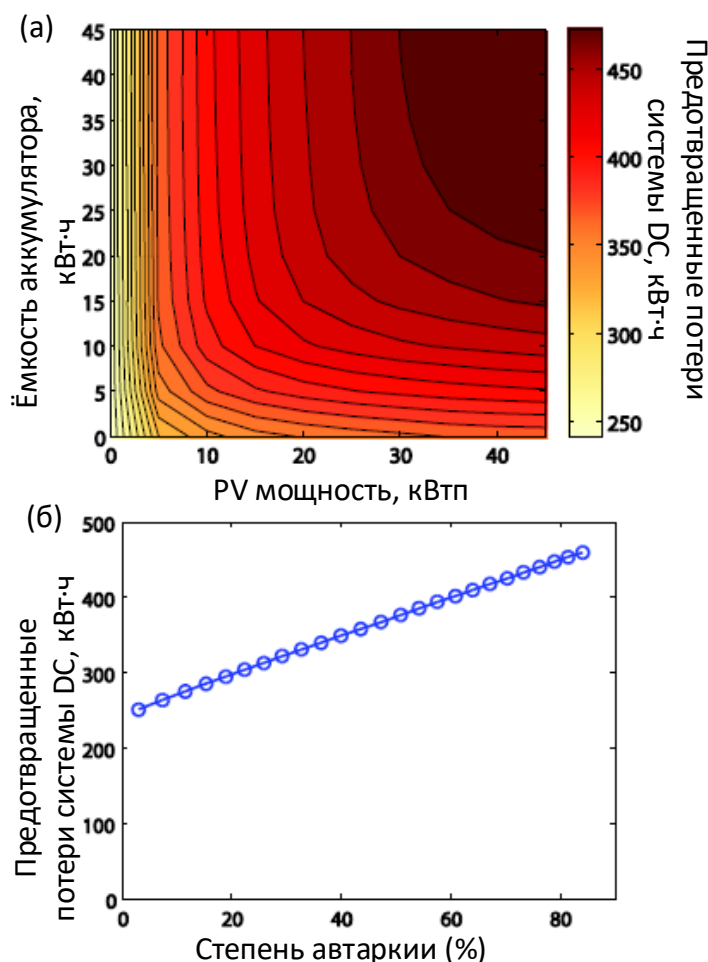


Рис. 2. (а) Предотвращенные потери при преобразовании в микросети постоянного тока по сравнению с обычной системой переменного тока в зависимости от установленной фотоэлектрической мощности и емкости батареи. (б) Предотвращенные потери при преобразовании в зависимости от степени автаркии

Fig. 2. (a) Avoided conversion losses in dc microgrid compared to a conventional ac system as a function of installed PV power and battery capacity. (b) Avoided conversion losses as a function of the degree of autarky

Как показано на рис. 2а, предотвращенные потери системы постоянного тока увеличиваются с масштабированием размеров фотоэлектрической системы. Увеличение предотвращенных потерь является самым высоким при установленной мощности фотоэлектрической системы около 10 кВт/ч и емкости батареи 10 кВт/ч. Дальнейший анализ, представленный на рис. 2б, показывает, что предотвращенные потери и автаркия, т.е. доля общей потребности здания в электроэнергии, которая покрывается за счет фотоэлектрической энергии, вырабатываемой на месте, близки к линейной зависимости. Следовательно, сети постоян-

ного тока наиболее эффективны для зданий с высокой степенью автаркии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прототип микросети постоянного тока, соединяющей производство фотоэлектрической электроэнергии с нагрузками постоянного тока в здании, был установлен для проверки технической осуществимости и измерения ее эффективности по сравнению с обычной системой. Установка позволяет напрямую подключать центральный выпрямитель и фотоэлектрические модули к нагрузкам здания по шине постоянного тока. Основной электрической нагрузкой,

протестированной в прототипе установки, является светодиодное освещение. Для управления освещением используется стандартный интерфейс DALI (Digital Addressable Lighting Interface), облегчающий интеграцию в здание.

На рис. 3 показаны основные компоненты прототипа установки. В эталонном случае (рис. 3а) тестируется стандартная светодиодная осветительная установка с источ-

ником питания переменного/постоянного тока (номинальная мощность 75 Вт) и светодиодными лентами 24 В. Интенсивность света регулируется с помощью диммеров ШИМ. В системе постоянного тока (рис. 3б) центральный выпрямитель питает несколько каналов на 24 В постоянного тока (номинальная мощность 95 Вт). Выход фотоэлектрических модулей подключен к шине 24 В пост. тока через MPPT.

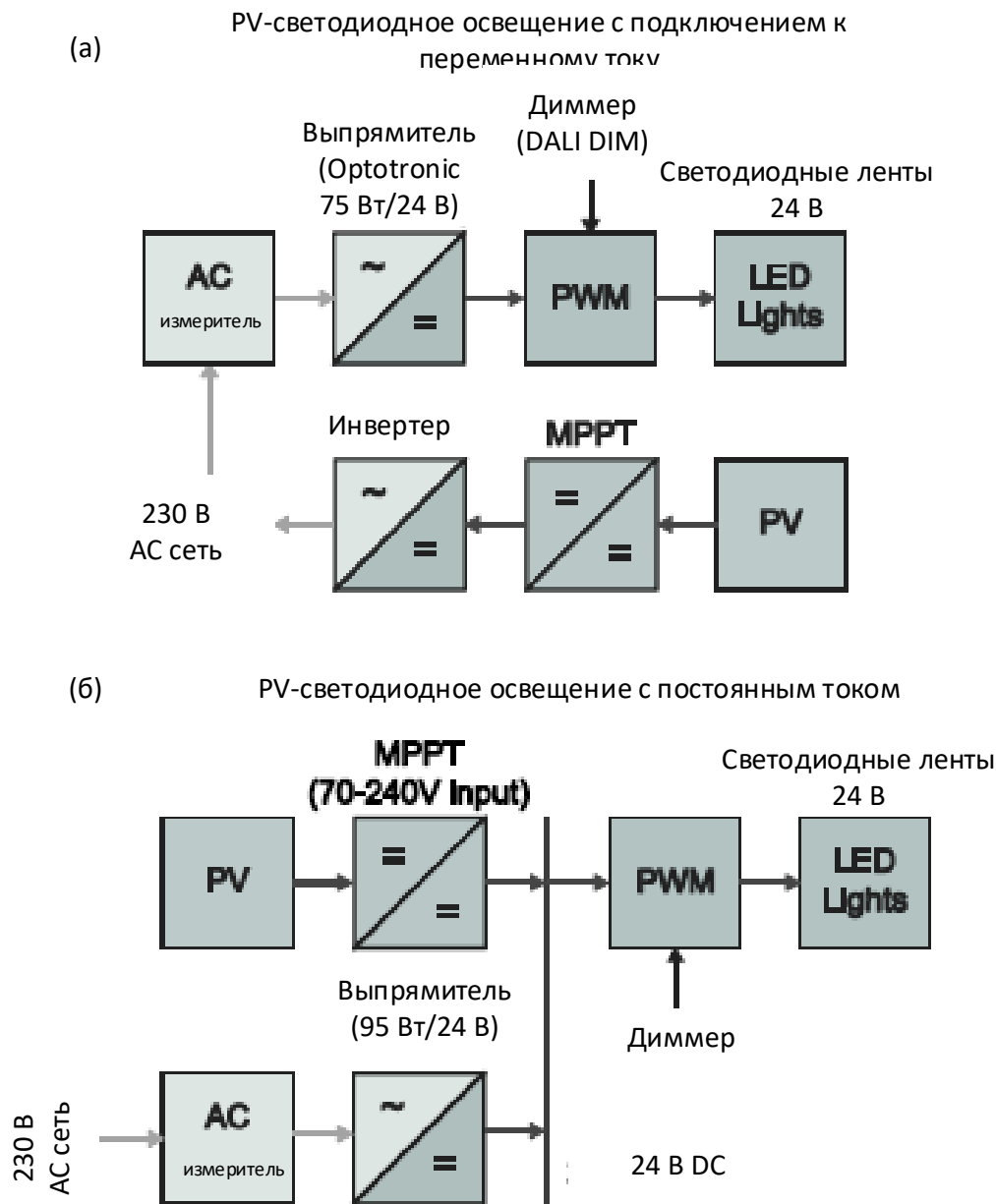


Рис. 3. Основные компоненты и потоки энергии от фотоэлектрического источника питания к светодиодному освещению в эталонной системе переменного тока (а) и прототипе постоянного тока (б)
 Fig. 3. Main components and power flows from PV supply to LED lighting in the reference AC system (a) and the DC prototype (b)

По сравнению с системой переменного тока, можно обойтись без двух ступеней преобразователя для использования электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими модулями. Беспроводной интерфейс управления и мониторинга позволяет регулировать яркость светодиодов и измерять потребление постоянного тока. Дополнительный регистратор данных измеряет потребление переменного тока с интервалом в 5 секунд. В обоих случаях в системе переменного и постоянного тока диммеры позволяют подключать большинство типов светодиодов (при постоянном напряжении и постоянном токе) для широкого применения в зданиях.

Экспериментальные результаты показали, что в зависимости от уровня затемнения и количества подаваемой мощности постоянного тока эффективность преобразования переменного/постоянного тока на 4-8% выше для центрального выпрямителя, используемого в системе постоянного тока по сравнению с источником питания перемен-

ного/постоянного тока эталонной системы. В зависимости от типа электроснабжения (сеть переменного тока или фотоэлектрическая система) ожидается, что общая эффективность системы при полной нагрузке составит примерно 82-86% для эталона и 90-96% для системы постоянного тока. Эффективность системы при полной и частичной нагрузках будет дополнительно исследована в будущих измерениях. В дополнение к светодиодному освещению другие нагрузки постоянного тока, такие как двигатели с переменной частотой вращения, могут питаться от шины 24 В постоянного тока. Производительность системы при этих условиях нагрузки будет проанализирована. Ограничение экспериментальной реализации, как показано на рис. 3б, заключается в том, что можно использовать только однонаправленный преобразователь переменного тока в постоянный. Таким образом, избыточное предложение от фотоэлектрических модулей не может быть передано в сеть переменного тока.

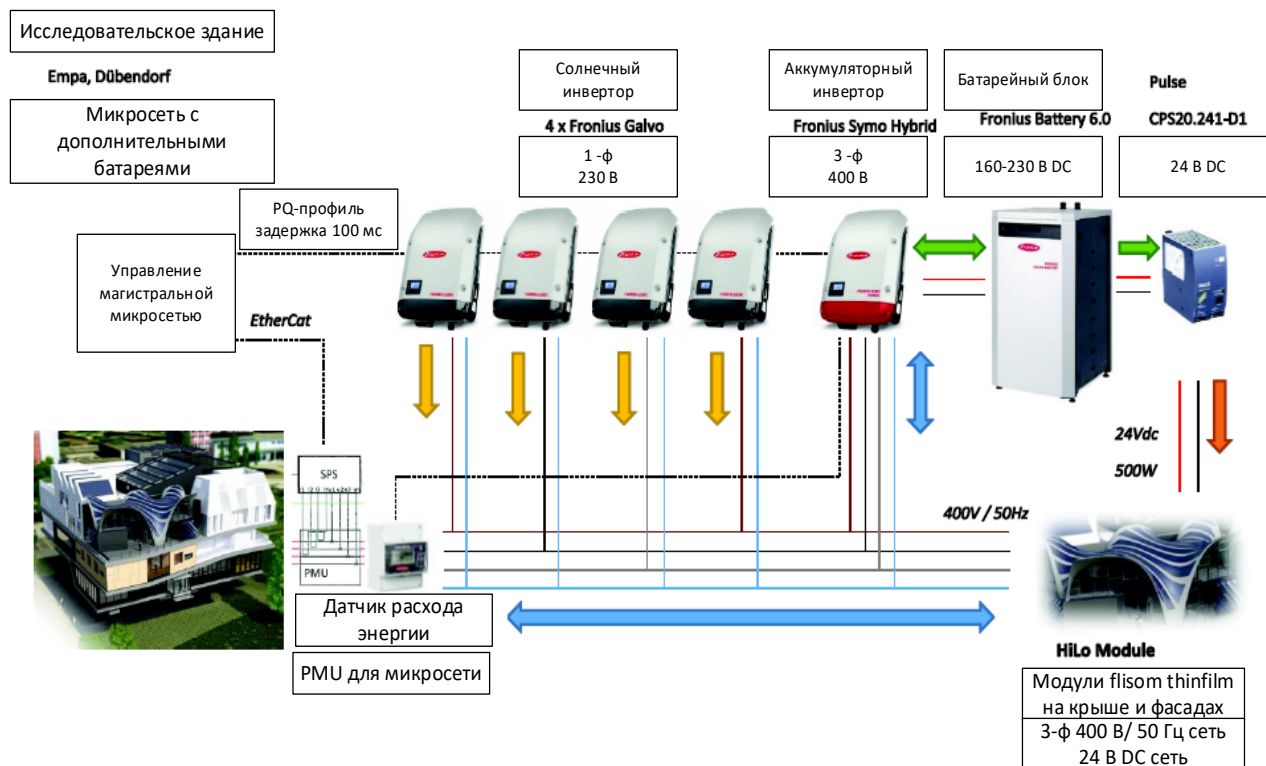


Рис. 4. Фотоэлектрическая система с гибридной микросетью переменного/постоянного тока
 Fig. 4. PV system with hybrid AC/DC microgrid

Схема гибридной микросети переменного/постоянного тока, которую планируется реализовать вместе с фотоэлектрической системой здания NEST/HiLo, показана на рис. 4. Из-за использования тонкопленочных фотоэлектрических модулей требуется гальваническая развязка инвертора [13]. Предлагаемая система состоит из четырех однофазных инверторов и одного трехфазного двунаправленного инвертора/зарядного устройства. Инвертор / зарядное устройство обеспечивает множественные и параллельные потоки энергии между фотоэлектрическими элементами, батареей и сетью переменного тока. Одним из возможных режимов работы является зарядка аккумулятора от сети переменного тока или местного источника переменного тока, такого как микро-ТЭЦ (комбинированная теплоэнергетика) или ветрогенератор [14]. Последний режим работы важен для оптимального, с точки зрения затрат, управления аккумулятором при переменных тарифах на электроэнергию, а также для предоставления вспомогательных сетевых услуг. Также важно, следует ли использовать аккумулятор для аварийного питания в случае отключения электроэнергии. Батарея HiLo состоит из нескольких модулей LFP (литий-железо-фосфат), расположенных последовательно. Повышенное напряжение батареи выгодно с точки зрения эффективности системы. Преобразователь постоянного тока соединяет аккумулятор и сеть 24 В постоянного тока, обеспечивая светодиодное освещение и электронные приборы в здании HiLo энергией [15]. Для подключения нагрузок постоянного тока с более высоким напряжением может быть установлен дополнительный преобразователь постоянного тока.

ВЫВОДЫ

В этой статье были представлены исследования гибридных микросетей переменного/постоянного тока для улучшения интеграции фотоэлектрических систем и аккумуляторных батарей в зданиях. Результаты моделирования показали, что потери при преобразовании энергии могут быть снижены на 20-30% для жилых зданий с чистым нулевым энергетическим балансом. Пре-

имущества гибридных микросетей могут быть еще больше для коммерческих и офисных зданий, со встроенной фотоэлектрической системой, из-за более высокой доли внутренних нагрузок постоянного тока и повышенного самостоятельного потребления фотоэлектрической электроэнергии. Фотоэлектрическая энергия и размер батареи являются важными параметрами для оценки производительности гибридной микросети. Мы считаем, что сети постоянного тока наиболее эффективны для зданий с высокой степенью автаркии, обеспечиваемой высокой долей возобновляемых источников постоянного тока. Первоначальные результаты экспериментального прототипа показывают, что соединение микросети постоянного тока на основе фотоэлектрической энергии со светодиодным освещением приводит к значительному повышению эффективности по сравнению с обычной системой. Наконец, был представлен текущий дизайн гибридной микросети, реализованной с фотоэлектрической системой в здании NEST HiLo. HiLo обеспечит несколько лет исследований на этапе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Wang, L. Goel, X. Liu, F. H. Choo, "Harmonizing AC and DC: A hybrid AC/DC future grid solution", IEEE Power and Energy Magazine, 11(3), 76-83, 2013.
2. V. Vossos, K. Garbesi, H. Shen, "Energy savings from direct-DC in US residential buildings", Energy and Buildings, 68, 223-231, 2014.
3. T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, D. Skrlac, "Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks", IEEE Electrification Magazine, 2(1), 54-65, 2014.
4. J. Hofer, B. Svetozarevic, Z. Nagy, A. Schlueter, "DC Building Network and Storage for BIPV Integration", CISBAT International Conference on Future Buildings and Districts, pp. 681-686, 2015.
5. N. Eghtedarpour, E. Farjah, "Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid", IEEE transactions on smart grid, 5(3), 1494-1505, 2014.

REFERENCES

6. X. Liu, P. Wang, P. C. Loh, „A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(2), 278-286, 2011.
7. P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai, F. Blaabjerg, “Hybrid AC–DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning”, *IEEE transactions on power electronics*, 28(4), 1533-1543, 2013.
8. F. Nejabatkhah, W. L. Yun, "Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid." *IEEE Trans. on Power Electronics*, 30(12), 7072-7089, 2015.
9. А. Кудрявцев, В. Зацепина, "Лабораторная установка для демонстрации преимуществ сети постоянного тока в умном доме", 2022, 2-я международная конференция по технологическому обучению в высшем образовании (TELE), 2022, стр. 105-108.
10. А. Кудрявцев, "Концепция создания энергосберегающей технологии умного дома с питанием от сети постоянного тока на основе альтернативных источников энергии", конференция "Энергосбережение и ресурсосбережение - XXI век 2021", том 2021-ноябрь, стр. 18-22, 10-12 ноября 2021.
11. А. Кибец, "Электроснабжение частного дома с использованием постоянного тока из возобновляемых источников энергии", энергетика: государственные проблемы и перспективы, стр. 98-103, 2021.
12. D. Krivoshta, "Evaluation of the efficiency of power supply of household electrical equipment on direct current", *the potential of modern science*, no. 1, pp. 34-40, 2015.
13. J. Hofer, A. Groenewolt, P. Jayathissa, Z. Nagy, A. Schlueter, “Parametric analysis and systems design of dynamic photovoltaic shading modules”, *Energy Science & Engineering*, 4(2), 134-152, 2016.
14. J. Hofer, Z. Nagy, A. Schlueter, „Electrical design and layout optimization of flexible thin film photovoltaic modules”, *EU PVSEC conference*, Munich, 2016.
15. S. M. MacAlpine, R. W. Erickson, M. J. Brandemuehl, "Characterization of power optimizer potential to increase energy capture in photovoltaic systems operating under nonuniform conditions", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(6), 2936-2945, 2013.
1. P. Wang, L. Goel, X. Liu, F. H. Choo, “Harmonizing AC and DC: A hybrid AC/DC future grid solution”, *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(3), 76-83, 2013.
2. V. Vossos, K. Garbesi, H. Shen, „Energy savings from direct-DC in US residential buildings”, *Energy and Buildings*, 68, 223-231, 2014.
3. T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, D. Skrlec, "Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks", *IEEE Electrification Magazine*, 2(1), 54-65, 2014.
4. J. Hofer, B. Svetozarevic, Z. Nagy, A. Schlueter, "DC Building Network and Storage for BIPV Integration", *CISBAT International Conference on Future Buildings and Districts*, pp. 681-686, 2015.
5. N. Eghtedarpour, E. Farjah, “Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid”, *IEEE transactions on smart grid*, 5(3), 1494-1505, 2014.
6. X. Liu, P. Wang, P. C. Loh, „A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(2), 278-286, 2011.
7. P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai, F. Blaabjerg, “Hybrid AC–DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning”, *IEEE transactions on power electronics*, 28(4), 1533-1543, 2013.
8. F. Nejabatkhah, W. L. Yun, "Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid." *IEEE Trans. on Power Electronics*, 30(12), 7072-7089, 2015.
9. А. Кудрявцев and В. Зацепина, "Laboratory Installation to Demonstrate the Advantages of a DC Network in a Smart Home," 2022 2nd International Conference on Technology Enhanced Learning in Higher Education (TELE), 2022, pp. 105-108.
10. А. Кудрявцев, "The concept of creating an energy-saving smart home technology powered by a dc network based on alternative energy sources", *Energy and resource saving - XXI century conference 2021*, vol. 2021-November, pp. 18-22, 10-12 November 2021.
11. А. Кибец, "Electricity supply of a private house using direct current from renewable

energy sources", energy: state problems and prospects, pp. 98-103, 2021.

12. D. Krivoshta, "Evaluation of the efficiency of power supply of household electrical equipment on direct current", the potential of modern science, no. 1, pp. 34-40, 2015.

13. J. Hofer, A. Groenewolt, P. Jayathissa, Z. Nagy, A. Schlueter, "Parametric analysis and systems design of dynamic photovoltaic shading modules", Energy Science & Engineering, 4(2), 134-152, 2016.

14. J. Hofer, Z. Nagy, A. Schlueter, "Electrical design and layout optimization of flexible thin film photovoltaic modules", EU PVSEC conference, Munich, 2016.

15. S. M. MacAlpine, R. W. Erickson, M. J. Brandemuehl, "Characterization of power optimizer potential to increase energy capture in photovoltaic systems operating under nonuniform conditions", IEEE Transactions on Power Electronics, 28(6), 2936-2945, 2013

УДК 519.85, 621.31

DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_24

МЕТОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

METHOD OF ELECTRICAL CALCULATION OF POWER SUPPLY SYSTEMS AND ALGORITHMS OF ITS IMPLEMENTATION

©2022

Кольниченко Георгий Иванович^{1,2}, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, оборудования и безопасности производств

Тарлаков Яков Викторович^{1,3}, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, оборудования и безопасности производств

Усачев Максим Сергеевич^{1,4}, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, оборудования и безопасности производств

Kol'nichenko Georgiy Ivanovich^{1,2}, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Process automation systems, machinery and equipment, industrial safety

Tarlavov Yakov Viktorovich^{1,3}, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Process automation systems, machinery and equipment, industrial safety

Usachev Maksim Sergeevich^{1,4}, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Process automation systems, machinery and equipment, industrial safety

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)

¹ BMSTU (Mytishchi branch)

E-mail: g_kolnic@mail.ru

²ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1163-9523>

E-mail: tarlavov@bmstu.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9012-2428>

E-mail: usachev@mgul.ac.ru

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5848-8286>

Аннотация: Расчеты установившихся режимов являются самыми распространенными при решении вопросов создания и совершенствования систем электроснабжения.

Поскольку системы электроснабжения содержат нелинейные элементы (а это чаще всего генераторы и нагрузки), то их установившийся режим описывается нелинейными уравнениями. Решение таких уравнений возможно только итерационными методами, что связано с проблемой сходимости итерационного процесса.

Из-за ряда особенностей электрических систем, которые присущи в том числе системам электроснабжения агро- и лесного комплекса, сходимость итерационного процесса может быть замедленной и даже не обеспеченной. В связи с этим авторами предложен прямой

метод расчета с циклической корректировкой исходной для каждого цикла информации с целью учета нелинейности элементов электрической системы.

В основе предлагаемого метода лежат универсальные расчетные формулы для определения собственных и взаимных сопротивлений, которые получены авторами как результат матричного преобразования и решения узловых уравнений.

Предложенный метод и реализующие его алгоритмы сравнительно легко программируются и обеспечивают необходимую быстроту и точность вычислений. Они предназначены для решения ряда практических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией сложносвязанных систем электроснабжения, повышением их надежности и экономичности.

Ключевые слова: электрические системы, электроснабжение, алгоритм расчета, установившийся режим, нелинейные элементы, итерационные методы, собственные и взаимные сопротивления.

Для цитирования: Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Усачев М.С. Метод электрического расчета систем электроснабжения и алгоритмы его реализации // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2022. – Т. 18, № 3 (69). – С. 24–32. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_24.

Abstract: Calculations of steady-state modes are the most common when solving problems of creating and improving power supply systems.

Since power supply systems contain non-linear elements (most often generators and loads), their steady-state mode is described by non-linear equations. The solution of such equations is possible only by iterative methods, which is connected with the problem of convergence of the iterative process.

Due to a number of features of electrical systems, which are inherent, including power supply systems of agro- and forestry complex, the convergence of the iteration process may be slow and even not provided. In this connection, the authors propose a direct method of calculation with cyclic correction of the initial information for each cycle in order to take into account the nonlinearity of the elements of the electric system.

The proposed method is based on the universal calculation formulas for determining the eigen and mutual resistances, which are obtained by the authors as a result of matrix transformation and solution of the nodal equations.

The proposed method and algorithms implementing it are relatively easy to program and provide the necessary speed and accuracy of calculations. They are intended for solving a number of practical problems related to the analysis, design and operation of complex closed-loop power supply systems, increasing their reliability and efficiency.

Keywords: electrical systems, electricity supply, calculation algorithm, steady state, non-linear elements, iterative methods, own and mutual resistance.

For citation: Kol'nichenko G.I., Tarlakov Y.V., Usachev M.S. Method of electrical calculation of power supply systems and algorithms of its implementation // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2022. – Vol. 18, № 3 (69). – P. 24–32. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_24.

ВВЕДЕНИЕ

Расчеты установившихся режимов электрических систем являются наиболее распространенными, так как важнейшие вопросы создания и эксплуатации таких систем могут рассматриваться только в тесной взаимосвязи с методами расчета их установившихся режимов.

Установившимся режимом электрической цепи называют такое ее состояние, при котором параметры режима могут приниматься неизменными.

Установившийся режим электрических систем и цепей рассчитывают при различных способах задания исходных данных в зависимости от физической сути и цели расчета.

Как известно, при расчете установившихся режимов нашли самое широкое применение уравнения узловых напряжений [1-6].

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

В теории цепей элементы электрических схем делятся на активные и пассивные.

Параметры пассивных элементов электрической сети – линий электропередачи и трансформаторов – принимаются постоянными, то есть эти пассивные элементы рассматриваются как линейные. Активные элементы схем замещения электрических сетей и систем – нагрузки и генераторы – представляются в виде линейных или нелинейных источников тока или ЭДС [7, 8].

Система уравнений узловых напряжений формируется по известным правилам и в матричной форме записывается следующим образом

$$Y_y \cdot U = I,$$

где Y_y – матрица собственных и взаимных проводимостей исходной схемы замещения; U – вектор-столбец узловых напряжений; I – вектор-столбец узловых токов.

Узловой ток равен алгебраической сумме источников тока, подключенных к узлу, при этом источники тока, соответствующие генерации и потреблению, имеют разные знаки. Поскольку в состав реальных электрических систем входят нелинейные элементы (а это, как правило) генераторы и нагрузочные ветви, то и уравнения, описывающие их установившиеся режимы, являются нелинейными. Для расчета нелинейных систем применяются различные математические методы (простой итерации, Зейделя, Ньютона и др.).

Использование итерационных методов сопровождается проблемой сходимости итерационных процессов решения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время накоплен большой опыт практических расчетов установив-

шихся режимов на ЭВМ и исследовательских разработок по их усовершенствованию и сопоставлению [9-11].

Достоинствами методов простой итерации и метода Зейделя является то, что они легко программируются и не требуют большой памяти ЭВМ, но их недостаток в медленной сходимости. Простая итерация менее эффективна, чем расчет по Зейделю, а решение на каждом шаге уравнений узловых напряжений методом Гаусса менее эффективно, чем расчет методом Ньютона.

Итерационные методы медленно сходятся, а в ряде случаев расходятся в расчетах схем с устройствами продольной компенсации, с трехобмоточными трансформаторами или автотрансформаторами с очень малым сопротивлением обмотки среднего напряжения. Сходимость итерационного процесса может быть замедленной или вообще не обеспеченной для схем с малым количеством замкнутых контуров, схем с сильной неоднородностью параметров, а также в расчетах режимов, близких к предельным по соображениям статической устойчивости [12, 13]

В связи с перечисленными причинами возникла необходимость в разработке метода расчета установившихся режимов систем электроснабжения, отвечающего условию удобства реализации на ЭВМ и снимающего проблему сходимости итерационного процесса счета. В Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана были разработаны алгоритмы электрического расчета параметров электроснабжения агро- и лесного комплекса, удовлетворяющие перечисленным условиям. Указанные алгоритмы содержат в своей основе формулы для расчета собственных и взаимных сопротивлений, определенных при включенных элементах, соответствующим источникам и нагрузкам рассчитываемой системы электроснабжения.

В нашем случае собственным сопротивлением Z_{jj} называется коэффициент пропорциональности между ЭДС E_j , приложенной в элементе J , и током I_j , протекающем в элементе J и обусловленным ЭДС E_j :

$$Z_{JJ} = \frac{E_J}{I_J}.$$

Собственное сопротивление определяет величину и фазу тока данного источника при отсутствии ЭДС других источников.

Взаимным сопротивлением между элементами J и E_F называется коэффициент пропорциональности между ЭДС E_F, приложенной в элементе F, и током I_J, протекающим в элементе J и обусловленным ЭДС E_F:

$$Z_{JF} = \frac{E_F}{I_J}.$$

Взаимное сопротивление определяет величину и фазу тока элемента J под воздействием только E_F.

Собственные и взаимные сопротивления определяются исключительно конфигурацией схемы и сопротивлениями отдельных ее элементов.

Исходя из этого, будем различать три разновидности сопротивлений в электрической системе (рис. 1):

- 1) собственное сопротивление J-го генератора Z_{JJ};
- 2) взаимное сопротивление между F-ым и J-ым генераторами Z_{JF} или между F-ым генератором и любой ветвью, связанной с точкой нулевого потенциала, Z_{io,F};
- 3) взаимное сопротивление между P-ым генератором и ветвью сети (соединяющей узлы i и j), непосредственно не связанной с точкой нулевого потенциала, Z_{ij,P}.

Эти универсальные формулы были получены нами по результатам анализа и преобразования системы уравнений узловых напряжений. Система уравнений для любой сколь угодно сложной электрической схемы (рис. 1) записывается по известным в электротехнике правилам и в общем случае имеет вид:

$$\sum_0^k y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j) + \sum_0^l y_{ji}(\dot{U}_i - \dot{E}_j) + \sum_0^s y_{i0(\alpha)} \dot{U}_i = 0; \quad (1)$$

i = 1, 2, ..., n,

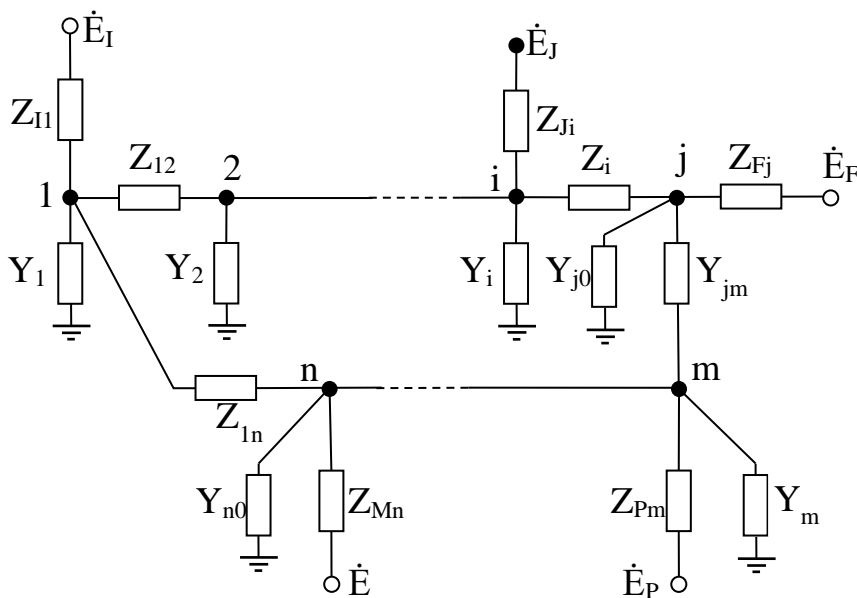


Рис. 1. Пример схемы сложной электрической системы
Fig. 1. An example diagram of a complex electrical system

где: i – номер узла сети; J – номер генератора; k, l, s – соответственно число ветвей сети, генераторов и нагрузок, подключенных к узлу i ; n – число узлов в схеме.

В состав матрицы коэффициентов системы уравнений (1) входит матрица коэффициентов при узловых напряжениях (Y):

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} \dots - y_{1d} \dots - y_{1n} \\ -y_{f1} \dots y_{ff} \dots - y_{fn} \\ -y_{n1} \dots - y_{nf} \dots y_{nn} \end{bmatrix}.$$

Матрица Y квадратная, симметричная, ее порядок равен числу узлов в схеме n .

Недиагональные элементы $y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}}$ это

проводимости ветвей сети, непосредственно примыкающие к узлу i .

Если узел i и узел j не принадлежат одной ветви, то $y_{ij} = 0$, поэтому в матрице Y много нулевых недиагональных элементов, что облегчает ее формирование.

Диагональные элементы y_{ii} матрицы Y это полные узловые проводимости, состоящие из суммы проводимостей нагрузок, генераторов и участков сети, присоединенных к узлу i .

Универсальные расчетные выражения для определения собственных и взаимных сопротивлений были получены нами на основе решения системы уравнений узловых напряжений [14] и имеют вид:

$$Z_{JJ} = \frac{Z_{Ji}^2}{Z_{Ji} + Z_{ii}^*}; \quad (2)$$

$$Z_{JF} = \frac{Z_{Ji} \cdot Z_{Fj}}{Z_{ij}^*}; \quad (3a)$$

$$Z_{io;F} = \frac{Z_{io} \cdot Z_{Fj}}{Z_{ij}^*}; \quad (3b)$$

$$Z_{ij;Pm} = \frac{Z_{ij} \cdot Z_{Pm}}{Z_{im}^* - Z_{jm}^*}. \quad (4)$$

В этих выражениях:

$Z_{Ji}, Z_{Fj}, Z_{Pm}, Z_{io}, Z_{ij}$ – сопротивления элементов электрической системы, относительно которых определяются собственные и взаимные сопротивления;

$Z_{ii}^*, Z_{ij}^*, Z_{im}^*, Z_{jm}^*$ – соответствующие элементы обращенной матрицы узловых проводимостей $Y^{-1} = Z^*$, содержащие индексами номера узлов, в которые включены рассматриваемые ветви;

J, F, P – номера генераторов;

i, j, m – номера узлов сети, к которым присоединены генераторы и ветви сети;

индекс звездочка (*) отличает элементы обращенной матрицы $Y^{-1} = Z^*$ от сопротивлений схемы.

Необходимо отметить, что ранее была доказана невырожденность матрицы Y [15]. Это означает, что всегда существует матрица $Y^{-1} = Z^*$. Именно поэтому выражения (2-4) являются универсальными, то есть они пригодны для расчета собственных и взаимных сопротивлений в электрических системах постоянного и переменного тока, любой конфигурации и принципиально любой сложности.

Таким образом, алгоритм расчета собственных и взаимных сопротивлений включает в себя три основных этапа:

1 – формирование матрицы узловых проводимостей Y на основе информации о параметрах и структуре сети;

2 – обращение матрицы Y и получение элементов обратной матрицы $Y^{-1} = Z^*$;

3 – расчет искомым собственным и взаимным сопротивлениям по формулам (2-4).

Заметим, что общеизвестная в электротехнике формула преобразования многолучевой звезды в эквивалентный много-

угольник $Z_{ij} = Z_i \cdot Z_j \cdot \sum y = \frac{Z_i \cdot Z_j}{1 / \sum y}$ является

частным случаем полученной нами формулы (3). Действительно, в случае схемы с единственной узловой точкой (каковой является многолучевая звезда) матрица Y^{-1} имеет порядок $n = 1$ и состоит из един-

ственного диагонального элемента, численно равного величине, обратной полной узловой проводимости, т.е. равна $1/\sum y$.

Не трудно показать, что с помощью формулы (3) сравнительно просто определяются эквивалентные сопротивления электрических схем и их отдельных участков, что необходимо при упрощении электрических схем, связанных с расчетом как установившихся, так и переходных процессов в электрических системах.

Алгоритм расчета собственных и взаимных сопротивлений составляет также основу алгоритма расчета токораспределения. Расчету токов в схеме предшествует этап расчета по формулам (2-4) собственных и взаимных сопротивлений, что в последующем позволяет определить составляющие токов, суммирование которых дает численные значения токов в любой ветви системы. Количество таких составляющих равно количеству источников энергии (т.е. генераторов).

Далее с помощью найденных значений токов и известных сопротивлений рассчитываются напряжения во всех узлах схемы, а также определяется потокораспределение мощностей и при необходимости рассчитываются потери мощности и электрической энергии в системе электроснабжения.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод характеризуется тем, что расчеты режимов проводятся по конечным формулам, то есть это прямой (в отличие от итерационного) метод расчета, не связанный с проблемой сходимости.

Для получения окончательного решения он требует повторения цикла расчета с целью учета нелинейности генераторных и нагрузочных ветвей. Это достигается корректировкой их параметров в зависимости от величины узловых напряжений, которые становятся точнее в каждом последующем цикле расчета.

Повторение циклов заканчивается, когда поправки напряжений станут меньше наперед заданной величины ε , т.е. при

$$\Delta U_i^{(\tau)} \leq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где: n – количество узлов в схеме; τ – номер цикла расчета.

Обычно количество повторений цикла не превышает 2-5.

Излагаемый метод и реализующие его алгоритмы сравнительно легко программируются, обеспечивают необходимую быстроту и точность вычислений и при соответствующем комбинировании могут быть применены для решения ряда практических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией сложносвязанных систем электроснабжения, повышением их экономичности и надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубицин, М. А. К вопросу расчета установившихся режимов электроэнергетических систем / М. А. Трубицин, Е. Ю. Микаэльян // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 9(69). – С. 49-55. – EDN GYHRIY.
2. Бадалян, Н. П. Модель расчета допустимого установившегося режима электроэнергетической системы / Н. П. Бадалян // Наука сегодня: вызовы и решения : Материалы международной научно-практической конференции, Вологда, 29 января 2020 года. – Вологда: Общество с ограниченной ответственностью "Маркер", 2020. – С. 7-11. – EDN BSJOUJ.
3. Вычислительные модели потокораспределения в электрических системах / Б. И. Аюев [и др.] ; под ред. П. И. Бартоломья. - Москва : Флинта : Наука, 2008. - 254, [1] с. : ил., табл.; 22 см.; ISBN 978-5-9765-0697-8 (Флинта)
4. Шаповалов, Д. И. Применение матричного исчисления и теории графов для расчета сложной электрической схемы в

установившемся режиме / Д. И. Шаповалов, С. В. Попова // Инновационные векторы устойчивого и цифрового развития производственных и информационных систем : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Ставрополь, 18–20 мая 2022 года / Российский технологический университет, Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Кубанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Северо-Кавказский федеральный университет, Южный федеральный университет, Ставропольский государственный педагогический институт, Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь: Издательство "АГРУС", 2022. – С. 554-560. – EDN WRCIWA.

5. Исследование установившихся режимов работы распределительной электрической сети с тиристорным регулятором напряжения / Е. Н. Соснина, А. А. Кралин, А. А. Асабин, Е. В. Крюков // Промышленная энергетика. – 2021. – № 12. – С. 2-15. – DOI 10.34831/EP.2021.27.66.001. – EDN OZIYRP

6. Арестова А.Ю. Электрические системы и сети. Установившиеся режимы электрических сетей / А. Ю. Арестова, А. В. Лыкин, Ю. М. Сидоркин, Я. А. Фролова. // Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. – 98 с. – ISBN 978-5-7782-4204-3. – EDN UALPVQ.

7. Кольниченко Г.И. Основы электротехники и электроснабжения предприятий лесного комплекса. Основы электроснабжения: учебник для вузов / Г. И. Кольниченко, Я. В. Тарлаков, А. В. Сиротов, М. С. Усачев ; под редакцией Г. И. Кольниченко. // Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 252 с. – ISBN 978-5-8114-8466-9

8. Вайнштейн Р.А. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов: учебное по-

собие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.

9. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоиздат, 1988. – 288 с.: ил.

10. Гурьев В.В. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы / В. В. Гурьев, В. В. Кувшинов, Б. А. Якимович [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25. – № 1. – С. 108-117. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-1-108-117. – EDN SELULQ

11. Бадалян, Н. П. Метод простой итерации для решения уравнений установившихся режимов при Z-форме их представления / Н. П. Бадалян // Вестник научных конференций. – 2020. – № 1-3(53). – С. 16-20. – EDN NCGUKP.

12. Семенюк, Н. В. Влияние неоднородности электрической сети на оптимальность параметров электроэнергетического режима / Н. В. Семенюк // Энергетические установки и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 61-66. – EDN LPCUIY.

13. Варганова, А. В. Оценка надежности внешнего электроснабжения сетей 6-10 кВ с источниками распределенной генерации / А. В. Варганова, А. С. Ирихов // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3(52). – С. 22-28. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-22-28. – EDN SFDZXB.

14. Кольниченко Г.И., Михайлова В.И. Применение цифровых вычислительных машин для расчета собственных и взаимных сопротивлений в сложных электрических системах. // Тр. ЛПИ, № 291. Энергия, 1968

15. Идельчик В.И. Пример анализа существования и единственности уравнений установившегося режима // Электричество. 1983. №6. С.56-59.

REFERENCES

1. Trubicin, M. A. On the issue of calculating the steady-state modes of electric power systems / M. A. Trubicin, E. Yu. Mikaelian // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2020. – № 9(69). – Pp. 49-55. – EDN GYHRIY.
2. Badalyan, N. P. Model for calculating the permissible steady-state regime of the electric power system / N. P. Badalyan // *Science today: Challenges and solutions: Materials of the International Scientific and practical Conference, Vologda, January 29, 2020*. – Vologda: Limited Liability Company "Marker", 2020. – pp. 7-11. – EDN BSJOUJ.
3. Computational models of flow distribution in electrical systems / B. I. Ayuev [et al.]; edited by P. I. Bartolomey. - Moscow : Flint : Nauka, 2008. - 254, [1] p.: ill., table; 22 cm.; ISBN 978-5-9765-0697-8 (Flint)
4. Shapovalov, D. I. Application of mathematical calculus and graph theory for calculating a complex electrical circuit in steady-state mode / D. I. Shapovalov, S. V. Popova // *Innovative vectors of Sustainable and Digital Development of Industrial and Information systems : collection of Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Stavropol, May 18-20, 2022 / Russian Technological University, St. Petersburg State Economic University, Kuban State University, Don State Technical University, Severo-Caucasian Federal University, Southern Federal University, Stavro-Polish State Pedagogical Institute, Stavropol State Agrarian University*. – Stavropol: Publishing house "AGRUS", 2022. – pp. 554-560. – EDN WRCIWA.
5. Investigation of steady-state operating modes of a distribution electrical network with a thyristor voltage regulator / E. N. Sosnina, A. A. Kralin, A. A. Asabin, E. V. Kryukov // *Industrial power engineering*. – 2021. – No. 12. – Pp. 2-15. – DOI 10.34831/EP.2021.27.66.001. – EDN OZIYRP
6. Arestova A.Yu. Electrical systems and networks. Established modes of electrical networks / A. Yu. Arestova, A.V. Lykin, Yu. M. Sidorkin, Ya. A. Frolova. // *Novosibirsk : Novosibirsk State Technical University, 2020*. – 98 p. – ISBN 978-5-7782-4204-3. – EDN UALPVQ.
7. Kolnichenko G.I. Fundamentals of electrical engineering and power supply of enterprises of the forest complex. Fundamentals of power supply: textbook for universities / G. I. Kolnichenko, Ya. V. Tarlakov, A.V. Sirotov, M. S. Usachev; edited by G. I. Kolnichenko. // *Saint Petersburg : Lan, 2022*. – 252 p. – ISBN 978-5-8114-8466-9
8. Weinstein R.A. Mathematical models of elements of electric power systems in calculations of steady-state regimes and transients: textbook / R.A. Weinstein, N.V. Kolomiets, V.V. Shestakova. // *Tomsk: Publishing House of Tomsk Poly-Technical University, 2010*. – 115 p.
9. Idelchik V.I. Calculations and optimization of modes of electric networks and systems. – M.: Energoizdat, 1988. – 288 p.: ill.
10. Guryev V.V. Investigation of the established modes of a solar power station operating in the distribution network of an electric power system / V. V. Guryev, V. V. Kuvshinov, B. A. Yakimovich [et al.] // *Bulletin of M.T. Kalashnikov IzhSTU*. – 2022. – Vol. 25. – No. 1. – pp. 108-117. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-1-108-117. – EDN SELULQ
11. Badalyan, N. P. A simple iteration method for solving equations of established modes with the Z-form of their representation / N. P. Badalyan // *Bulletin of Scientific Conferences*. – 2020. – № 1-3(53). – Pp. 16-20. – EDN NCGUKP.
12. Semenyuk, N. V. The influence of the heterogeneity of the electric network on the optimal parameters of the electric power regime / N. V. Semenyuk // *Power plants and technologies*. – 2020. – Vol. 6. – No. 4. – Pp. 61-66. – EDN LPCUIY.
13. Varganova, A.V. Assessment of the reliability of external power supply of 6-10 kV networks with distributed generation sources / A.V. Varganova, A. S. Irikhov //

- Electro-technical systems and complexes. – 2021. – № 3(52). – Pp. 22-28. – DOI 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-22-28. – EDN SFDZXB.
14. Kolnichenko G.I., Mikhailova V.I. Application of digital computers for calculating intrinsic and mutual resistances in complex electrical systems. // Tr. LPI, No. 291. Energy, 1968
15. Idelchik V.I. Example of the analysis of the existence and uniqueness of steady-state equations // Electricity. 1983. No. 6. pp.56-59.

УДК 004.02

DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_33

**АЛГОРИТМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ОПЕРАТИВНОГО
ВЫЯВЛЕНИЯ БЕЗУЧЕТНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ**

**THE ALGORITHM FOR INTELLECTUAL SUPPORT FOR
MANAGEMENT DECISION-MAKING IN THE PROCESS OF
OPERATIONAL DETECTION OF NON-TECHNICAL ELECTRICITY
LOSSES IN ELECTRIC NETWORKS**

©2022

Моргоев Ирбек Джабраилович, аспирант**Morgoev Irbek Dzhabrailovich, postgraduate student**

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ (Россия)

The North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz (Russia)

E-mail: m.irbek@yandex.ru**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4390-5662>**

Аннотация: В статье представлен алгоритм поддержки принятия решений, позволяющий оперативно выявлять безучетное потребление электроэнергии у бытовых потребителей. Рассматриваемый подход позволяет отслеживать аномальные значения потребления и принимать своевременные адресные и эффективные управленческие решения. Разработанный алгоритм был экспериментально апробирован в секторе бытовых потребителей на основе имеющихся данных с использованием методов машинного обучения и имитационного моделирования. Результаты эксперимента показали перспективность применения электросетевой компанией предложенного подхода к решению проблемы выявления безучетного потребления электроэнергии. Предлагаемый алгоритм позволил из множества потребителей электроэнергии выявлять подмножество с аномальным электропотреблением, тем самым сузив поле поиска потребителей с безучетным потреблением более чем в 12 раз.

Ключевые слова: безучетное потребление, машинное обучение, имитационное моделирование, эксперимент, математическая статистика, эконометрика, коммерческие потери электроэнергии.

Для цитирования: Моргоев И.Д. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в процессе оперативного выявления безучетного потребления электроэнергии в электросетях // Вести высших учебных заведений Черноморья. – 2022. – Т. 18, № 4 (70). – С. 33–45. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_33.

Abstract: The article presents a decision support algorithm that allows to quickly identify non-technical electricity losses by household consumers. The approach under consideration makes it possible to track abnormal consumption values and make timely targeted and effective management decisions. The developed algorithm was experimentally tested in the residential consumer sector based on available data using machine learning and simulation methods. The results of the experiment showed the prospects of using the proposed approach by the electric grid company to solve the

problem of identifying non-technical electricity losses. The proposed algorithm made it possible to identify a subset with abnormal power consumption from a set of electricity consumers, thereby narrowing the search field for consumers with non-technical electricity losses by more than 12 times.

Keywords: non-technical losses, machine learning, simulation modeling, experiment, mathematical statistics, econometrics, commercial power losses.

For citation: Morgoev I.D. The algorithm for intellectual support for management decision-making in the process of operational detection of non-technical electricity losses in electric networks // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2022. – Vol. 18, № 3 (69). – P. 33–45. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_33.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из существенных проблем современной энергетики являются потери при транспортировке энергии конечному потребителю. В электроэнергетике подобные потери имеют природу технического и коммерческого характера. Безучетное потребление, в свою очередь, является одной из основных составляющих коммерческих потерь энергии.

Безучетное потребление – потребление электрической энергии при наличии заключенного в установленном порядке договора энергоснабжения (купли-продажи электрической энергии), но с нарушением со стороны потребителя, на которого возложена обязанность по обеспечению целостности и сохранности расчетного средства измерения, условий указанного договора о порядке осуществления измерений электроэнергии. Нарушением условий о порядке осуществления измерений электроэнергии является в том числе вмешательство в работу средства измерения или нарушение установленных договором сроков для извещения об отсутствии (неисправности) средства измерения, а также иные действия, приведшие к искажению данных о фактическом объеме потребленной электрической энергии [1].

Цифровизация электроэнергетической отрасли Российской Федерации [2] и продолжающийся процесс реализации концепции Smart Grid по внедрению цифровых приборов учета электроэнергии [3] позволяют динамично развивать подходы к выявлению безучетного потребления электроэнергии и совершенствовать всю систему электроснабжения в целом.

Проблема безучетного потребления электрической энергии стоит достаточно остро во многих странах, и ей посвящены исследования ученых. Наиболее часто используемым подходом, решающим проблему безучетного потребления электроэнергии, является применение алгоритмов машинного обучения для задачи бинарной классификации (наличия / отсутствия безучетного потребления у потребителя) [4–25].

Классификация в машинном обучении – это процесс группирования объектов по категориям на основе предварительно классифицированного тренировочного набора данных [4–25]. В контексте решаемой исследователями проблемы задачей классификации является определение по независимым переменным наличия или отсутствия безучетного потребления у потребителя.

Единого мнения о лучшем алгоритме, классифицирующем потребителей электроэнергии (безучетное потребление / не безучетное – 1/0), не существует, разные исследователи добились решения поставленной задачи, используя различные алгоритмы. Так, были применены следующие методы машинного обучения: статистические методы [9, 10, 15], деревья решений и случайные леса [8, 10, 14, 15, 17, 20, 21, 23, 24], k-ближайших соседей [14, 15, 20, 21], логистическая регрессия [10, 14], нейронные сети [4, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 25], метод опорных векторов [10, 13, 14, 15, 17, 20, 21], ансамблевые методы [12, 16, 17]. Каждый из перечисленных методов позволил эффективно решить стоящую перед исследователями проблему, выбор наилучшего из них затруднителен и опре-

деляется региональными особенностями электросетей и потребителей, так как обучение каждого из них осуществлялось на разных данных потребления. Кроме того, немаловажным фактом является то, что в исследованиях [4–25] в качестве целевой переменной использованы размеченные данные о поведении потребителя – наличии/отсутствии безучетного потребления. Проблемой таких данных является то, что не у всех энергосбытовых компаний подобный учет ведется, и, соответственно, не всегда подобную информацию есть возможность получить. Поэтому, несмотря на эффективность алгоритмов классификации в задаче определения безучетного потребления, а также принимая во внимание указанные проблемы такого подхода, имеет смысл вести поиск иных методов решения проблемы безучетного потребления.

Одним из таких подходов является кластеризация. Кластеризация относится к классу задач обучения без учителя («*rainforcement learning*»), что предполагает возможность работы алгоритма на размеченной выборке. Кластеризация (или кластерный анализ) – это задача разбиения множества объектов на группы, называемые кластерами. Внутри каждой группы должны оказаться «похожие» объекты, а объекты разных групп должны быть как можно более отличны. Главное отличие кластеризации от классификации состоит в том, что перечень групп четко не задан и определяется в процессе работы алгоритма [26]. В статье [4] был применен метод *k*-средних и использованы следующие факторы: среднее потребление энергии за 13 месяцев, стандартное отклонение, соответствующее ежемесячным данным об энергии, коэффициент вариации (выражает стандартное отклонение в процентах от среднего), минимальное значение потребления из 13 значений, максимальное значение потребления из 13 значений, разница между максимальным и минимальным значением. В статье [10] был использован алгоритм кластеризации «Основанная на плотности пространственная кластеризация для приложений с шумами» (DBSCAN), в

котором использовались исторические данные. И хотя у алгоритмов кластеризации результаты получились несколько хуже, чем у моделей контролируемого машинного обучения, тем не менее, как альтернативный метод выявления безучетного потребления, он показал свою эффективность.

Помимо способов контролируемого и неконтролируемого машинного обучения, для задачи выявления безучетного потребления электроэнергии применяются гибридные способы. Так, в [4] был применен способ, сочетающий в себе элементы из обоих перечисленных подходов. Подобное сочетание методов кластеризации *k*-средних и прогнозирования нейронными сетями позволило достичь наименьшей ошибки при решении задачи выявления безучетного потребления.

Следует подчеркнуть, что ключевым условием, позволяющим эффективно выявлять безучетное потребление электроэнергии, является наличие цифровых приборов учета потребления и автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ), поскольку именно эти системы осуществляют автоматизированный сбор и хранение данных потребления энергии в режиме реального времени. Накопление подобной информации позволяет в дальнейшем проводить анализ, выявление закономерностей и поиск решений проблем электроэнергетики.

В случаях отсутствия интеллектуальных приборов учета и низкой автоматизации, следствием чего становится отсутствие строго размеченной по времени выборки потребления электроэнергии с фиксированным периодом сохранения показаний, обычно энергосбытовыми компаниями применяются традиционные подходы по снижению безучетного потребления, такие как выборочный обход потребителей, проверка соблюдения требований договора поставки электроэнергии и выявление фактов незаконного потребления электроэнергии. В подобной ситуации эффективным решением может стать подход статьи [27], в которой выявлены социально-экономические факторы, влияющие на безучетное потреб-

ление, главные из которых: бедность, безработица, неграмотность и нищета населения. Изучив региональные особенности и перечисленные показатели, можно выявить районы с высокими рисками безучетного потребления, сосредоточить усилия на них и добиться более быстрого снижения величины коммерческих потерь в энергосистеме. Однако даже при подобном анализе, выполнение этих мероприятий вместе с низкой автоматизацией является трудоемкой, финансово затратной и технически сложной задачей.

Подводя итог краткому литературному обзору проблемы выявления безучетного потребления, следует отметить, что единой, общепризнанной методологии, решающей рассматриваемую проблему, в настоящее время не существует. Поэтому минимизация величины коммерческих потерь является актуальной задачей для электросетевых компаний.

Одним из способов выявления безучетного потребления, получившим динамичное развитие, является интеллектуальный анализ данных о потреблении электроэнергии. Возможность применения интеллектуальных подходов появилась в результате цифровой трансформации электроэнергетики, в частности, благодаря внедрению цифровых приборов учета и АСКУЭ.

В данной работе предлагается алгоритм, заключающийся в моделировании потребления электроэнергии частными домовладениями и выявлении потребителей с аномально низким (подозрительным) электропотреблением.

Целями данного исследования являются разработка алгоритма оперативного выявления безучетного потребления электроэнергии и последующее проведение имитационного моделирования для подтверждения его эффективности.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ

Внедрение цифровых приборов учета электропотребления само по себе позволило исключить возможность использования многих старых способов безучетного по-

требления, описанных в [28], однако появляются и новые, более совершенные, трудно выявляемые методы. Для понимания того, как электропотребление изменяется при использовании этих методов, следует выявить и проанализировать их.

Таковыми способами безучетного частичного потребления электрической энергии являются:

1. Включение в сеть специальных устройств, потребляющих электроэнергию кратковременными импульсами, на которые электросчетчик почти не реагирует.

2. Перепрошивка программных алгоритмов в электросчетчиках последнего поколения с целью хищения части потребленной электроэнергии.

И хотя перечисленные способы являются наиболее трудно отслеживаемыми, однако при наличии цифровых приборов учета безучетные потребители оставляют характерные аномальные значения своего электропотребления.

Концептуально разработанная нами методология представлена на блок-схеме, изображенной на рис. 1.

Первым этапом является сбор данных. На этом этапе данные извлекаются из базы данных автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии, архива погодных данных, календаря. Происходит их предварительная обработка и агрегирование.

Вторым этапом является построение моделей с использованием алгоритмов машинного обучения, наиболее точно аппроксимирующих исследуемый набор данных.

Третьим этапом является прогнозирование, которое является способом реализации одной из функций «цикла управления» социально-экономическими системами, позволяющими принимать управленческие решения [29]. На этом этапе для тестового набора данных происходит построение достоверного прогноза, на основании которого на этапе фильтрации принимаются управленческие решения.

Четвертым этапом является фильтрация полученных результатов. На этом этапе сравниваются показания фактического по-

требления и прогнозируемого. Если образовался небаланс электроэнергии в некоторой электрической сети и в течение 7 последних наблюдений у некоторого домохозяйства из этой сети фактическое потребление было ниже прогнозируемого, то оно попадает в список аномально низкого потребления. Подобный список, основанный на разности между фактическими и прогнозными данными, позволяет из общего множества по-

требителей получить гораздо меньшее подмножество «подозрительных» потребителей.

Последним этапом является получение итогового массива данных с аномально низким потреблением для применения к ним необходимых мероприятий по поиску источников коммерческих потерь в электросети.

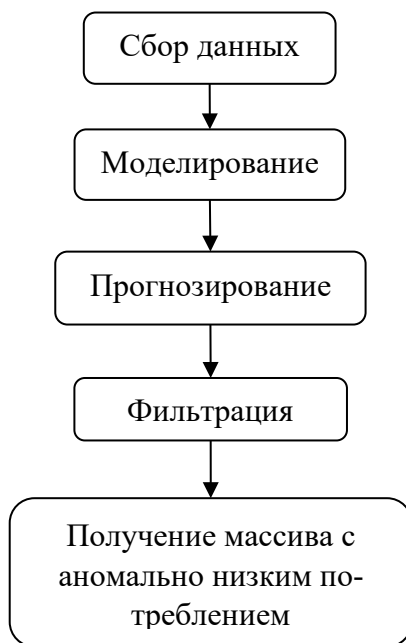


Рис. 1. Схема методологии
Fig. 1. Methodology scheme

Таким образом, в качестве поддержки принятия управленческого решения по поиску коммерческих потерь будет создан перечень потребителей, которых можно подозревать в безучетном потреблении, и с которых следует начать поиск небаланса электроэнергии в сети.

Рассмотрим практическую реализацию каждого из этапов предлагаемой методологии подробнее.

СБОР ДАННЫХ И ОТБОР НЕОБХОДИМЫХ ФАКТОРОВ

Для проведения моделирования был взят набор данных [30], представляющий из себя ежедневные показания электропотребления для 5 567 домохозяйств, располагающихся в

Лондоне. Период этих показаний – с ноября 2011 года по февраль 2014 года. Общий объем выборки составил более 3,5 млн. экземпляров.

Исследование осуществлялось с использованием интерпретируемого высокоуровневого языка программирования Python версии 3.10.4, а также его библиотек: Numpy и Pandalas – для обработки и манипуляций с данными; Matplotlib – для визуализации данных; CatBoost, Sklearn, XGBoost – для загрузки моделей машинного обучения (machine learning); Sklearn – для разделения данных и подбора гиперпараметров. Средой разработки был выбран Google Colab, так как этот инструмент позволяет эффективно осуществлять разработку и представление её результатов в интерактивном виде, не ис-

пользуя аппаратные ресурсы персонального компьютера.

В качестве независимых переменных, способных описать целевую переменную – электропотребление некоторого домовладения в некоторый момент времени, были рас-

смотрены факторы погодного, социально-экономического характера, а также ретроспективные данные. Был произведен отбор признаков, в результате которого были выявлены следующие факторы, в табл. 1.

Таблица 1

Факторы, отобранные для моделирования

Table 1

Alphabets of aircraft units

Атрибуты	Информация	Единицы измерения
X0	Уникальный номер	
X1	Средняя видимость	м.
X2	Средняя температура точки росы	°С
X3	Средняя скорость ветра	м/с
X4	Относительная влажность	%
X5	Фаза луны	°
X6	Длина светового дня	с.
X7	Выходной, праздничный/ рабочий день	Бинарный признак
X8	День недели	Номер дня недели
X9	Среднее значение потребления за день неделю назад	кВт*ч

Была построена матрица корреляций для факторов, отобранных для моделирования, которая изображена на рис. 2 и рассчитана по формуле парного коэффициента корреляции Пирсона (1), где $X_{1,i}$ – значения первого признака, $X_{2,i}$ – значения второго признака, \bar{X}_1 , \bar{X}_2 – средние значения обоих

признаков, n – количество строк матриц [29].

$$r_{X_1, X_2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{1,i} - \bar{X}_1)(X_{2,i} - \bar{X}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{1,i} - \bar{X}_1)^2 \sum_{i=1}^n (X_{2,i} - \bar{X}_2)^2}} \quad (1)$$

	y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
y	1.000000	-0.059108	-0.150036	0.035908	0.083821	-0.011433	-0.156224	0.024482	0.016360	0.909201
X1	-0.059108	1.000000	0.053521	0.228666	-0.617340	0.076754	0.267032	0.096489	0.073881	-0.056033
X2	-0.150036	0.053521	1.000000	-0.136545	0.030012	0.007800	0.516867	-0.044355	-0.032392	-0.148892
X3	0.035908	0.228666	-0.136545	1.000000	-0.048445	-0.021397	-0.125738	0.027994	0.022270	0.033950
X4	0.083821	-0.617340	0.030012	-0.048445	1.000000	-0.027827	-0.539734	-0.025261	-0.022015	0.079137
X5	-0.011433	0.076754	0.007800	-0.021397	-0.027827	1.000000	0.007632	-0.001282	-0.013239	-0.007817
X6	-0.156224	0.267032	0.516867	-0.125738	-0.539734	0.007632	1.000000	-0.008536	0.000178	-0.155308
X7	0.024482	0.096489	-0.044355	0.027994	-0.025261	-0.001282	-0.008536	1.000000	0.742364	-0.000347
X8	0.016360	0.073881	-0.032392	0.022270	-0.022015	-0.013239	0.000178	0.742364	1.000000	-0.013314
X9	0.909201	-0.056033	-0.148892	0.033950	0.079137	-0.007817	-0.155308	-0.000347	-0.013314	1.000000

Рис. 2. Матрица корреляции признаков
Fig. 2. The matrix of feature correlation

Между отобранными факторами линейной зависимости не наблюдается. У целевой переменной есть сильная взаимосвязь с фактором X9 (среднее значение потребления за день неделю назад), так как он является ретроспективным признаком. Таким образом, было решено включить все рассматриваемые факторы для дальнейшего моделирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Исходные наборы данных были разделены утилитой `sklearn.model_selection.train_test_split` на обучающую и экспериментальную выборки. В обучающую выборку вошли данные с 23 ноября 2011 года по 19 февраля 2014 года, в экспериментальную – с 20 февраля 2014 года по 27 февраля 2014 года.

Метриками оценки качества моделирования были выбраны:

1. Средняя абсолютная ошибка (MAE) – определяется по (2), где \hat{y}_i – прогнозируе-

мое значение i -го наблюдения; y_i – истинное значение i -го наблюдения.

$$MAE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n_{\text{samples}}} \cdot \sum_{i=0}^{n_{\text{samples}}-1} |y_i - \hat{y}_i|, \quad (2)$$

2. Коэффициент детерминации (r^2) – определяется по (3), где \tilde{y}_i – среднее арифметическое зависимой переменной [31].

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=0}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}, \quad (3)$$

В качестве методов были применены следующие алгоритмы машинного обучения: Linear Regression, Lasso, Ridge, KNeighborsRegressor, DecisionTreeRegressor, RandomForestRegressor, SGDRegressor, LinearSVR, MLPRegressor, XGBRegressor, CatBostRegressor. Применение этих методов обусловлено их подходящей спецификой и результативностью для задач оперативного моделирования [31]. Результаты оценки качества прогнозных моделей на тестовой выборке приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка прогнозных моделей

Table 2

Evaluation of predictive models

Метод	MAE	R ²
Linear Regression	2.95	0.76
Lasso	3.08	0.75
Ridge	2.95	0.76
KNeighborsRegressor	6.54	0.12
DecisionTreeRegressor	4.49	0.45
RandomForestRegressor	2.55	0.79
SGDRegressor	2.34	-5.07
LinearSVR	4.25	0.49
MLPRegressor	2.35	0.82
XGBRegressor	2.33	0.83
CatBostRegressor	2.29	0.84

Наиболее точные результаты получены методом Catboost. Подбор наилучших параметров для этой модели был выполнен с использованием инструментов GridSearchCV библиотеки sklearn. Лучшим сочетанием параметров является глубина

дерева (depth) = 10, коэффициент L2 регуляризации (l2_leaf_reg) = 9, скорость обучения (learning_rate) = 0.5, количество итераций (iterations) = 3000, функция потерь – «rmse», вычисляемая по (4) [5].

$$RMSE(y, \hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (4)$$

Исходя из полученных результатов, подходящим методом для дальнейшего использования при экспериментировании является метод Catboost.

ФИЛЬТРАЦИЯ

Пусть прогноз, сделанный алгоритмом машинного обучения CatBoost, является достоверным. Тогда с целью проверки гипотезы о том, что достоверный прогноз потребления электроэнергии каждого потребителя является существенным фактором оперативного выявления безучетного потребления электроэнергии, возможно провести эксперимент. Предполагается, что наличие достоверного прогноза потребления электроэнергии позволит оперативно выявлять из множества потребителей электроэнергии подмножество потребителей, у которых замечено аномально низкое электропотребление (относительно их же ретроспективных данных об электропотреблении).

Так как решается задача выявления коммерческих потерь без наличия размеченных

данных о безучетном потреблении, то для тестирования предлагаемого подхода необходимо провести имитационное моделирование. Имитация представляет собой искусственно созданный «умысел» – преднамеренное занижение фактических показателей электропотребления на определенном временном периоде для некоторого количества (было взято 20) случайных домохозяйств с использованием библиотеки Random на тестовой выборке данных случайным образом с диапазонами значений: от 0% до 20%, от 20% до 40%, от 40% до 60%.

Таким образом, для подтверждения гипотезы необходимо значительно сократить количество подозреваемых потребителей от изначального (более 5.5 тысяч домовладений) и выявить этих «пониженных» потребителей с умышленно заниженным электропотреблением в итоговой матрице аномально низкого потребления. Графическая реализация эксперимента изображена на рис. 3 для домохозяйства со значением уникального номера «MAC004555», потребление было занижено случайным образом для каждого дня от 40% до 60%.

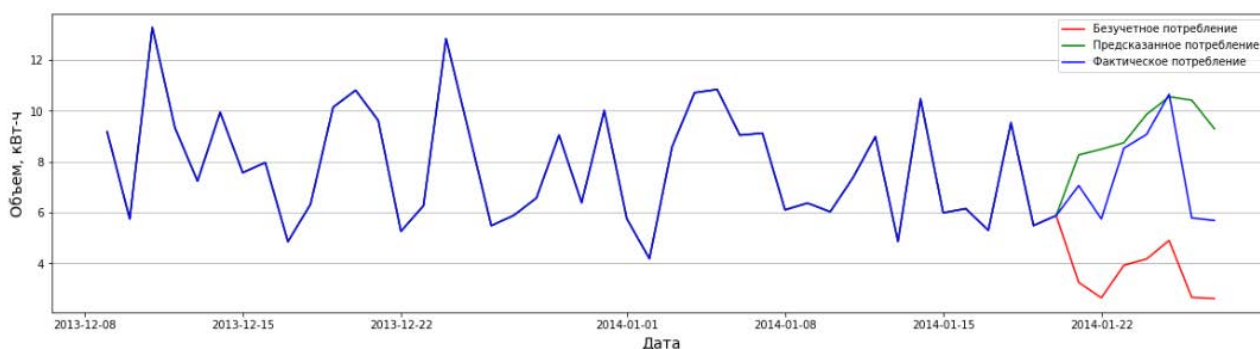


Рис. 3. График безучетного, предсказанного и фактического потреблений электроэнергии
Fig. 3. Graph of non-technical losses, predicted and actual electricity consumption

Следующими этапами эксперимента является вычисление разности «delta» фактического и предсказанных значений, а также два условия: отрицательность этой разности и количество попаданий уникального номера домовладения равное 7 (так как

временное окно прогнозирования потребления 7 дней).

Для доказательства работоспособности методики и разработанной регрессионной модели этот эксперимент был проведен по 3 раза для каждого из диапазонов занижения, чтобы реализовать его как имитацион-

ную модель, которой присущи целенаправленные многовариантные исследования, выполняемые на компьютере с применением математических моделей [32], результаты которых помещены в табл. 3.

Проанализировав полученные результаты, следует отметить, что гипотеза о том, что достоверный прогноз потребления электроэнергии каждого потребителя является существенным фактором оператив-

ного выявления коммерческих потерь электроэнергии, подтверждена. Так, были получены превосходные результаты для случаев с частичным безучетным потреблением от 40 % до 60 % энергии. Хорошие результаты получены и при выявлении безучетного потребления от 20 % до 40 % энергии, поскольку большая часть таких потребителей с «умыслом» выявлена.

Таблица 3

Результаты имитационного моделирования

Table 3

Results of simulation

Номер имитации	Количество аномальных потребителей	Количество найденных «заниженных» показателей	Занижение в %-тах
1	325	6	[0; 20]
2	328	8	[0; 20]
3	324	5	[0; 20]
4	332	12	[20;40]
5	335	14	[20;40]
6	337	16	[20;40]
7	336	18	[40;60]
8	338	20	[40;60]
9	339	20	[40;60]

Для низкого уровня безучетного потребления от 0 % до 20 % результат в целом удовлетворителен, поскольку следует уточнить, что, во-первых, так как значение безучетного потребления низкое, то само по себе оно сильно сказываться на энергосистеме не будет, во-вторых, даже при непопадании в массив аномального потребления домохозяйств при плановых мероприятиях электросетевых компаний и применении традиционного способа – обхода потребителей – возможно их выявление.

ВЫВОДЫ

Подводя итоги всего исследования, можно сделать вывод, что достоверный прогноз потребления электроэнергии каждого потребителя является существенным фактором оперативного выявления безучетного потребления электроэнергии.

На основании именно этого фактора можно делать выводы: осуществлять предварительный поиск потребителей с аномальными показателями потребления электроэнергии и принимать более обоснованные адресные решения в борьбе с безучетным электропотреблением. Количество потребителей с аномальным потреблением более чем в 12 раз меньше общего числа потребителей и искусственно занижаемые показатели почти всегда находились в их числе. Таким образом, цели исследования достигнута.

Перспективой дальнейших исследований является поиск более совершенных математических моделей, а также выявление менее существенных, нежели достоверный прогноз, но влияющих факторов, позволяющих повысить точность нахождения безучетного потребления электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воротницкий В.Э. Потери электроэнергии в электрических сетях: анализ и опыт снижения. // М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006. 104 с.
2. Концепция цифровая трансформация 2030. // М.: ПАО Россети, 2018. 31 с.
3. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID. // М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
4. Toledo-Orozco M., Arias-Marin C.; Álvarez-Bel C., Morales-Jadan D., Rodríguez-García J., Bravo-Padilla E. Innovative Methodology to Identify Errors in Electric Energy Measurement Systems in Power Utilities // *Energies* 2021. Vol. 14(4). P. 958.
5. Leite, D.; Pessanha J., Simões P., Calili R., Souza R. A. Stochastic Frontier Model for Definition of Non-Technical Loss Targets // *Energies* 2020. Vol. 13. P. 3227.
6. Messinis G., Hatziargyriou N. Review of non-technical loss detection methods // *Electr. Power Syst. Res.* 2018. Vol. 158, P. 250 – 266.
7. Ahmad T., Chen H., Wang J., Guo, Y. Review of various modeling techniques for the detection of electricity theft in smart grid environment // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. Vol. 82. P. 2916 – 2933.
8. Wang D.-G., Dong J.-C., Huang L., Gong Y. Anomaly behavior detection based on ensemble decision tree in power distribution network. // In Proceedings of the 2018 4th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC), Wuhan. China. 2018. P. 312–316.
9. Guerrero J., León C., Monedero I., Biscarri F., Biscarri J. Improving Knowledge-Based Systems with statistical techniques, text mining, and neural networks for non-technical loss detection // *Knowl. Based Syst.* 2014. Vol. 71. P. 376–388.
10. Micheli G., Soda E., Vespucci M., Gobbi M., Bertani A. Big data analytics: An aid to detection of non-technical losses in power utilities // *Comput. Manag. Sci.* 2018. Vol. 16. P. 1–15.
11. Barros R., Costa E., Araujo J. Use of ANN for identification of consumers with irregular electrical installations. In Proceedings of the 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE) // Niteroi. Brazil. 2018. P. 1–6.
12. Jindal A., Dua A., Kaur K., Singh M., Kumar N., Mishra S. Decision Tree and SVM-Based Data Analytics for Theft Detection in Smart Grid // *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2016. Vol. 12. P. 1005–1016.
13. Pulz J., Muller R.B., Romero F., Meffe A., Neto A.F.G., Jesus A.S. Fraud detection in low-voltage electricity consumers using socio-economic indicators and billing profile in smart grids // *CIREN Open Access Proc. J.* 2017. P. 2300–2303.
14. Glauner P., Meira J.A., Dolberg L., State R., Bettinger F., Rangoni Y. Neighborhood features help detecting non-technical losses in big data sets // In Proceedings of the 2016 IEEE/ACM 3rd International Conference on Big Data Computing Applications and Technologies (BDCAT), Shanghai. China. 2016. P. 253–261.
15. Saeed M.S., Mustafa M.W., Hamadneh N.N., Alshammari N.A., Sheikh U.U., Jumani T.A., Khalid S.B.A., Khan I. Detection of Non-Technical Losses in Power Utilities – A Comprehensive Systematic Review // *Energies* 2020. Vol. 13. P. 4727.
16. Adil M., Javaid N., Qasim U., Ullah I., Shafiq M., Choi J.-G. LSTM and Bat-Based RUSBoost Approach for Electricity Theft Detection // *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. P. 4378.
17. Salman Saeed M., Mustafa, M.W.; Sheikh U.U., Jumani T.A., Khan I., Atawneh S., Hamadneh N.N. An Efficient Boosted C5.0 Decision-Tree-Based Classification Approach for Detecting Non-Technical Losses in Power Utilities // *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 3242.
18. Blazakis K.V., Kapetanakis T.N., Stavrakakis G.S. Effective Electricity Theft Detection in Power Distribution Grids Using an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System // *Energies* 2020. Vol. 13. P. 3110.

19. Vahabzadeh A., Kasaeian A., Monsef H., Aslani A. A Fuzzy-SOM Method for Fraud Detection in Power Distribution Networks with High Penetration of Roof-Top Grid-Connected PV // *Energies* 2020. Vol. 13. P. 1287.
20. Li J., Wang F. Non-Technical Loss Detection in Power Grids with Statistical Profile Images Based on Semi-Supervised Learning // *Sensors* 2020. Vol. 20. P. 236.
21. Lu X., Zhou Y., Wang Z., Yi Y., Feng L., Wang F. Knowledge Embedded Semi-Supervised Deep Learning for Detecting Non-Technical Losses in the Smart Grid // *Energies* 2019. Vol. 12. P. 3452.
22. Hasan M.N., Toma R.N., Nahid A.-A., Islam M.M.M., Kim J.-M. Electricity Theft Detection in Smart Grid Systems: A CNN-LSTM Based Approach // *Energies* 2019. Vol. 12. P. 3310.
23. Saeed M.S., Mustafa M.W., Sheikh U.U., Jumani T.A., Mirjat N.H. Ensemble Bagged Tree Based Classification for Reducing Non-Technical Losses in Multan Electric Power Company of Pakistan // *Electronics* 2019. Vol. 8. P. 860.
24. Cody C., Ford V., Siraj A. Decision tree learning for fraud detection in consumer energy consumption // In Proceedings of the IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA, Miami, FL, USA 2015. P. 1175–1179.
25. Costa B.C., Alberto B.L., Portela A.M., Maduro W., Eler E.O. Horizonte. Fraud Detection in Electric Power Distribution Networks Using an ANN-Based Knowledge-Discovery Process // *Int. J. Artif. Intell. Appl. IJAIA* 2013. Vol. 4. P. 17–23.
26. Ершов К.С., Романова Т.Н. Анализ и классификация алгоритмов кластеризации // *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2016. № 19. С. 274-279.
27. Yakubu O., Babu C.N., Adjei O. Electricity theft: Analysis of the underlying contributory factors in Ghana // *Energy Policy* 2018. Vol. 123, P. 611–618.
28. Красник В.В. 102 способа хищения электроэнергии // «ЭНАС», 2008. 180 с.
29. Доугерти К. Введение в эконометрику // Пер. с англ. М.: ИНФРА-М, 1999. 402 с.
30. Smart meters in London [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.kaggle.com/jeanmidev/smart-meters-in-london?select=informations_households.csv (Дата обращения: 10.12.2022).
31. Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Martyushev N.V., Efremenkov E.A., Mengxu Q. Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review // *Energies* 2022. Vol. 15, P. 8919.
32. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учеб. пособие для вузов под ред. Волковой В.Н., Козлова В.Н. // М.: Высш. шк., 2004. 616 с.

REFERENCES

1. Vorotnickij V.E. Electricity losses in electric networks: analysis and experience of reduction // М.: NTF «Energoprogress», 2006. 104 p.
2. The concept of digital transformation 2030 // М.: PAO Rosseti, 2018. 31 p.
3. Kobec B.B., Volkova I.O. Innovative development of the electric power industry based on the SMART GRID concept // М.: IAC Energiya, 2010. 208 p.
4. Toledo-Orozco M., Arias-Marin C.; Álvarez-Bel C., Morales-Jadan D., Rodríguez-García J., Bravo-Padilla E. Innovative Methodology to Identify Errors in Electric Energy Measurement Systems in Power Utilities // *Energies* 2021. Vol. 14(4). P. 958.
5. Leite, D.; Pessanha J., Simões P., Calili R., Souza R. A. Stochastic Frontier Model for Definition of Non-Technical Loss Targets // *Energies* 2020. Vol. 13. P. 3227.
6. Messinis G., Hatziargyriou N. Review of non-technical loss detection methods // *Electr. Power Syst. Res.* 2018. Vol. 158, P. 250 – 266.
7. Ahmad T., Chen H., Wang J., Guo, Y. Review of various modeling techniques for the detection of electricity theft in smart grid environment // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. Vol. 82. P. 2916–2933.

8. Wang D.-G., Dong J.-C., Huang L., Gong Y. Anomaly behavior detection based on ensemble decision tree in power distribution network. // In Proceedings of the 2018 4th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC), Wuhan, China. 2018. P. 312–316.
9. Guerrero J., León C., Monedero I., Biscarri F., Biscarri J. Improving Knowledge-Based Systems with statistical techniques, text mining, and neural networks for non-technical loss detection // *Knowl. Based Syst.* 2014. Vol. 71. P. 376–388.
10. Micheli G., Soda E., Vespucci M., Gobbi M., Bertani A. Big data analytics: An aid to detection of non-technical losses in power utilities // *Comput. Manag. Sci.* 2018. Vol. 16. P. 1–15.
11. Barros R., Costa E., Araujo J. Use of ANN for identification of consumers with irregular electrical installations. In Proceedings of the 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE) // Niteroi. Brazil. 2018. P. 1–6.
12. Jindal A., Dua A., Kaur K., Singh M., Kumar N., Mishra S. Decision Tree and SVM-Based Data Analytics for Theft Detection in Smart Grid // *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2016. Vol 12, P. 1005–1016.
13. Pulz J., Muller R.B., Romero F., Meffe A., Neto A.F.G., Jesus A.S. Fraud detection in low-voltage electricity consumers using socio-economic indicators and billing profile in smart grids // *CIRED Open Access Proc. J.* 2017, P. 2300–2303.
14. Glauner P., Meira J.A., Dolberg L., State R., Bettinger F., Rangoni Y. Neighborhood features help detecting non-technical losses in big data sets // In Proceedings of the 2016 IEEE/ACM 3rd International Conference on Big Data Computing Applications and Technologies (BDCAT), Shanghai, China. 2016. P. 253–261.
15. Saeed M.S., Mustafa M.W., Hamadneh N.N., Alshammari N.A., Sheikh U.U., Jumani T.A., Khalid S.B.A., Khan I. Detection of Non-Technical Losses in Power Utilities – A Comprehensive Systematic Review // *Energies* 2020, Vol. 13, P. 4727.
16. Adil M., Javaid N., Qasim U., Ullah I., Shafiq M., Choi J.-G. LSTM and Bat-Based RUSBoost Approach for Electricity Theft Detection // *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10, P. 4378.
17. Salman Saeed M., Mustafa, M.W.; Sheikh U.U., Jumani T.A., Khan I., Atawneh S., Hamadneh N.N. An Efficient Boosted C5.0 Decision-Tree-Based Classification Approach for Detecting Non-Technical Losses in Power Utilities // *Energies.* 2020. Vol. 13. P. 3242.
18. Blazakis K.V., Kapetanakis T.N., Stavrakakis G.S. Effective Electricity Theft Detection in Power Distribution Grids Using an Adaptive Neuro Fuzzy Inference System // *Energies* 2020. Vol. 13, P. 3110.
19. Vahabzadeh A., Kasaeian A., Monsef H., Aslani A. A Fuzzy-SOM Method for Fraud Detection in Power Distribution Networks with High Penetration of Roof-Top Grid-Connected PV // *Energies* 2020. Vol. 13. P. 1287.
20. Li J., Wang F. Non-Technical Loss Detection in Power Grids with Statistical Profile Images Based on Semi-Supervised Learning // *Sensors* 2020. Vol. 20. P. 236.
21. Lu X., Zhou Y., Wang Z., Yi Y., Feng L., Wang F. Knowledge Embedded Semi-Supervised Deep Learning for Detecting Non-Technical Losses in the Smart Grid // *Energies* 2019. Vol. 12. P. 3452.
22. Hasan M.N., Toma R.N., Nahid A.-A., Islam M.M.M., Kim J.-M. Electricity Theft Detection in Smart Grid Systems: A CNN-LSTM Based Approach // *Energies* 2019. Vol. 12. P. 3310.
23. Saeed M.S., Mustafa M.W., Sheikh U.U., Jumani T.A., Mirjat N.H. Ensemble Bagged Tree Based Classification for Reducing Non-Technical Losses in Multan Electric Power Company of Pakistan // *Electronics* 2019. Vol. 8. P. 860.
24. Cody C., Ford V., Siraj A. Decision tree learning for fraud detection in consumer energy consumption // In Proceedings of the IEEE International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA, Miami, FL, USA 2015. P. 1175–1179.
25. Costa B.C., Alberto B.L., Portela A.M., Maduro W., Eler E.O. Horizonte. Fraud Detection in Electric Power Distribution Networks Using an ANN-Based Knowledge-

Discovery Process // Int. J. Artif. Intell. Appl. IJAI 2013. Vol. 4. P. 17–23.

26. Ershov K.S., Romanova T.N. Analysis and classification of clustering algorithms // New information technologies in automated systems 2016. Vol. 19. P. 274–279.

27. Yakubu O., Babu C.N., Adjei O. Electricity theft: Analysis of the underlying contributory factors in Ghana // Energy Policy 2018. Vol. 123, P. 611–618.

28. Krasnik V.V. 102 ways of electricity thefting // «ENAS», 2008. 180 p.

29. Dougerti K. Introduction to Econometrics // Tran. from English. M.: INFRA-M, 1999. 402 p.

30. Smart meters in London [Electronic resource]. Access mode: https://www.kaggle.com/jeanmidev/smart-meters-in-london?select=informations_households.csv (Date of application 10.12.2022)

31. Klyuev R.V., Morgoev I.D., Morgoeva A.D., Gavrina O.A., Martyushev N.V., Efremkov E.A., Mengxu Q. Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review // Energies 2022. Vol. 15. P. 8919.

32. System analysis and decision-making: Dictionary-reference: Textbook for universities, edited by Volkova V.N., Kozlov V.N. // M.: Vyssh. shk., 2004. 616 p.

УДК 621.311

DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_46

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГАЗОДУВКИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

ANALYSIS OF THE STABILITY OF THE ASYNCHRONOUS GAS BLOWER MOTOR AT NON-FERROUS METALLURGY ENTERPRISES

©2022

Гаврина Оксана Александровна¹, кандидат технических наук, доцент
кафедры электроснабжения промышленных предприятий

Маскуров Игорь Вадимович, аспирант кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Джидзалова Элина Сергеевна, аспирант кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Тилов Алан Исмаилович, аспирант кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Gavrina Oksana Aleksandrovna¹, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises

Maskurov Igor Vadimovich, postgraduate student of the Department of Power
Supply of Industrial Enterprises

Dzhidzalova Elina Sergeevna, postgraduate student of the Department of Power
Supply of Industrial Enterprises

Tilov Alan Ismailovich, postgraduate student of the Department of Power Supply of
Industrial Enterprises

*Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический
университет), Владикавказ (Россия)*

*The North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University),
Vladikavkaz (Russia)*

E-mail: Gavrina-Oksana@yandex.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9712-9075>

Аннотация: Важной и актуальной задачей является обеспечение надежного электроснабжения ответственных потребителей на предприятиях цветной металлургии. В работе по результатам проведения комплексного энергоаудита на предприятии по производству свинца и цинка исследованы режимы работы асинхронного двигателя (АД) газодувки, от надежной работы которой зависит функционирование всей схемы электроснабжения предприятия. Представлены графики изменения коэффициента мощности в отдельных фазах газодувки. Установлено, что в период пуска коэффициент мощности снижается до значения 0,2, при этом в начальный момент пуска имело место отклонение частоты от номинального значения на 0,3 Гц. Определены значения токов трехфазного и двухфазного короткого замыкания по двум схемам, имеющих разные типы и мощности силовых трансформаторов (32 МВА и 40 МВА соответственно), а также типы реакторов. Выполнен расчет устойчивости асинхронно-

го двигателя газодувки, заключающийся в построении механической характеристики АД и оценке режимов пуска АД по значениям динамических моментов. Установлено, что при изменении скольжения от $0 \div 1$ момент двигателя изменяется в диапазоне: $0 \div 3,1$, наибольшее значение момент приобретает при скольжении равном $0,2$. При повышении скольжения от 0 до 1 значение момент сопротивления снижается от значения $1,0$ до $0,15$. Произведено построение механической характеристики асинхронного двигателя газодувки при реакторном пуске и кратности пускового тока в зависимости от скольжения. Установлено, что наибольший момент двигателя ($1,074$) наблюдается при значении скольжения равном $0,18$. Полученные в работе результаты могут быть использованы в ходе реализации мероприятий по повышению эффективности использования электроэнергии в системе электроснабжения предприятий цветной металлургии по производству свинцово-цинковой продукции.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, токи короткого замыкания, устойчивость работы, механическая характеристика, газодувка, система электроснабжения.

Для цитирования: Гаврина О.А., Маскуров И.В., Джидзалова Э.С., Тилов А.И. Анализ устойчивости асинхронного двигателя газодувки на предприятиях цветной металлургии // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2022. – Т. 18, № 3 (69). – С. 46–59. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_46.

Abstract: An important and urgent task is to ensure reliable power supply to responsible consumers at non-ferrous metallurgy enterprises. Based on the results of a comprehensive energy audit at an enterprise for the production of lead and zinc, the work examines the operating modes of an asynchronous blower motor (ABM), the reliable operation of which depends on the operation of the entire power supply scheme of the enterprise. Graphs of the change in the power factor in the individual phases of the gas blower are presented. It has been established that during the start-up period, the power factor decreases to a value of 0.2 , while at the initial start-up moment there was a frequency deviation from the nominal value by 0.3 Hz. The values of three-phase and two-phase short-circuit currents are determined according to two circuits with different types and capacities of power transformers (32 MVA and 40 MVA, respectively), as well as types of reactors. Calculation of the stability of an asynchronous blower motor was performed, which consists in constructing the mechanical characteristic of the ABM and estimating the modes of starting the ABM according to the values of dynamic moments. It is established that when the slip changes from $0 \div 1$, the engine torque changes in the range: $0 \div 3.1$, the moment acquires the greatest value when the slip is equal to 0.2 . With an increase in slip from 0 to 1 , the value of the moment of resistance decreases from a value of 1.0 to 0.15 . The construction of the mechanical characteristics of the asynchronous gas blower motor during the reactor start and the multiplicity of the starting current depending on the slip was carried out. It has been established that the highest engine torque (1.074) is observed at a slip value of 0.18 . The results obtained in the work can be used in the course of implementing measures to improve the efficiency of using electricity in the power supply system of non-ferrous metallurgy enterprises for the production of lead-zinc products.

Keywords: asynchronous motor, short circuit currents, operation stability, mechanical characteristic, blower, power supply system.

For citation: Gavrina O.A., Maskurov I.V., Dzhidzalova E.S., Tilov A.I. Analysis of the stability of the asynchronous gas blower motor at non-ferrous metallurgy enterprises // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2022. – Vol. 18, № 3 (69). – P. 46–59. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_46.

ВВЕДЕНИЕ

На промышленных предприятиях цветной металлургии одной из основных проблем является обеспечение надлежащего качества электроэнергии (КЭ) в системе

электроснабжения (СЭС) [1, 2]. В первую очередь КЭ связано с влиянием высших гармонических составляющих, генерируемых в электрическую сеть вентиляционными преобразователями, индукционными печами и другим оборудованием [3-5]. В работе, в

ходе проведения комплексного энергетического обследования (энергоаудита) крупного предприятия цветной металлургии по производству свинца и цинка, определены энергетические показатели основного оборудования и разработаны мероприятия по

повышению эффективности использования электроэнергии на различных технологических переделах производства [6-10]. Однолинейная схема электроснабжения для питания производства серы представлена на рис. 1.

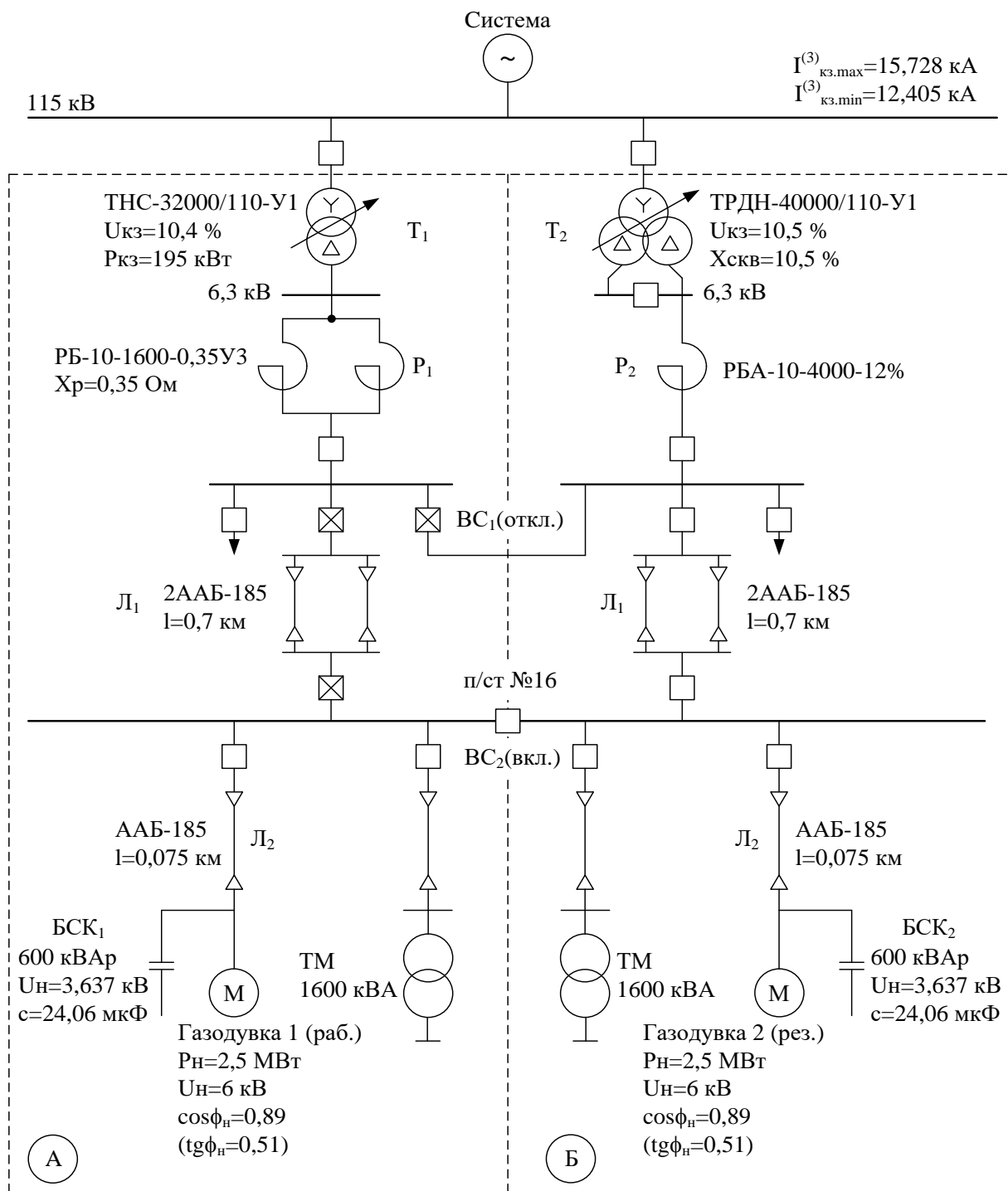


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения
Fig. 1. Single line power supply diagram

Из рис. 1 видно, что основным оборудованием является газодувка, от ее нормальной работы зависит надежное функционирование всей схемы электроснабжения. Электроприводом газодувки служит асинхронный двигатель мощностью 2,5 МВт, для компенсации реактивной мощности установлена батарея статических конденсаторов (БСК) мощностью 600 кВАр. В ходе проведения измерения с помощью прибора комплексного контроля ПКК-57 получен банк данных по току, напряжению, мощно-

сти и коэффициентам несинусоидальности на линиях, питающих газодувки и электрофильтры [11-14].

В частности, на рис. 2 представлены графики изменения коэффициента мощности в 1-й и 2-й фазах.

Из рис. 2 видно, что в период пуска коэффициент мощности снижается до значения 0,2. В начальный момент пуска имело место отклонение частоты от номинального значения на 0,3 Гц.

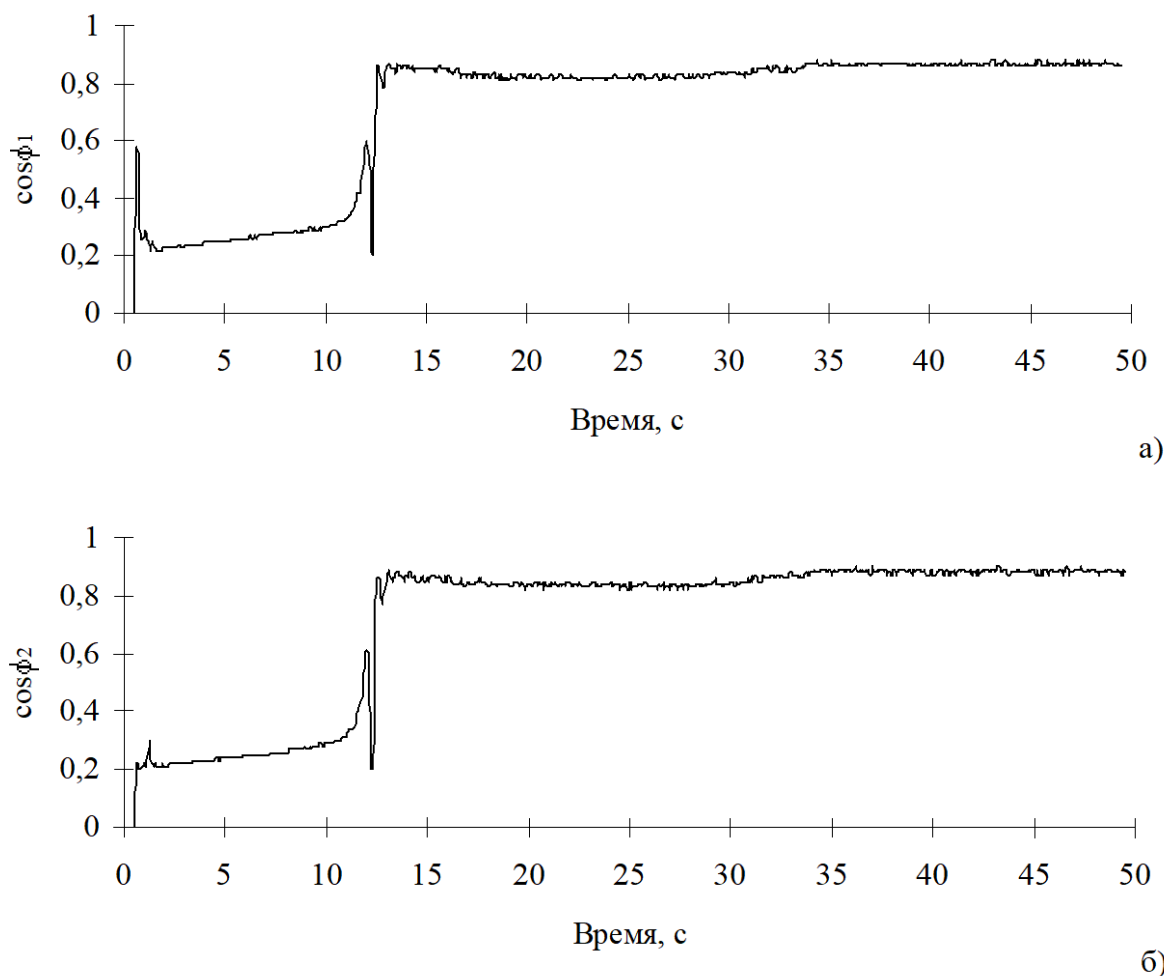


Рис. 2. Графики изменения коэффициента мощности
Fig. 2. Power factor curves

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ГАЗОДУВКИ

- базисная мощность $S_6=100$ МВА;
 - базисное напряжение $U_6=6$ кВ.
- Базисный ток:

Производим расчет сопротивлений отдельных элементов схемы замещения в относительных базисных единицах. Принимаем следующие базисные величины:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6} = 9,63 \text{ кА.}$$

Базисное сопротивление:

$$Z_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} \cdot I_6} = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 9,63} = 0,36 \text{ Ом.}$$

Сопротивление элементов СЭС:

- системы: $U_6=115 \text{ кВ}$, $I_{к.з.макс}^{(3)}=15,728 \text{ кА}$,
 $I_{к.з.мин}^{(3)}=12,405 \text{ кА}$:

$$X_{c \max(6)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{к.з.мин}^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_6}{U_c} \right)^2 = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 12,405} \cdot \left(\frac{6}{115} \right)^2 = 0,0146 \text{ Ом;}$$

$$X_{c \min(6)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{к.з.макс}^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_6}{U_c} \right)^2 = \frac{115}{\sqrt{3} \cdot 15,728} \cdot \left(\frac{6}{115} \right)^2 = 0,0115 \text{ Ом;}$$

$$X_{c*max} = \frac{X_{cmax(6)}}{Z_6} = \frac{0,0146}{0,36} = 0,0406 \text{ Ом;}$$

$$X_{c*min} = \frac{X_{cmin(6)}}{Z_6} = \frac{0,0115}{0,36} = 0,0319 \text{ Ом.}$$

- ВЛЭП ВЛ1, ВЛ2, АС-185 мм², $\ell=206 \text{ м}$,
 $r_0=0,179 \text{ Ом/км}$, $x_0=0,25 \text{ Ом/км}$:

$$X_{ВЛ1*}=X_{ВЛ2*}=x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,25 \cdot 0,206 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,00043;$$

$$R_{ВЛ1*}=R_{ВЛ2*}=r_0 \cdot \ell \cdot \frac{S}{U_{cp}^2} = 0,179 \cdot 0,206 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,0003;$$

$$X_{ВЛ1(6)}=X_{ВЛ2(6)}=X_{ВЛ1*} \cdot Z_6 = 0,00043 \cdot 0,36 = 0,00015 \text{ Ом;}$$

$$R_{ВЛ1(6)}=R_{ВЛ2(6)}=R_{ВЛ1*} \cdot Z_6 = 0,0003 \cdot 0,36 = 0,00011 \text{ Ом.}$$

- трансформатора Т1, $S_H=32 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_K=10,5\%$:

$$X_{Т1*} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{H,Т1}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{32} = 0,328;$$

$$X_{Т1(6)} = X_{Т1*} \cdot Z_6 = 0,328 \cdot 0,36 = 0,118 \text{ Ом.}$$

- трансформатора Т2, $S_H=40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_K=10,5\%$:

$$X_{Т2*} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{H,Т2}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,263;$$

$$X_{Т2(6)} = X_{Т2*} \cdot Z_6 = 0,263 \cdot 0,36 = 0,0947 \text{ Ом.}$$

- реактора Р1: РБ-10-1600-0,35У3, $x_r=0,35 \text{ Ом}$:

$$X_{P1*} = \frac{x_r}{2} \cdot \frac{S_6}{U_H^2} = \frac{0,35}{2} \cdot \frac{100}{10^2} = 0,175;$$

$$X_{P1(6)} = X_{P1*} \cdot Z_6 = 0,175 \cdot 0,36 = 0,063 \text{ Ом.}$$

- реактора Р2: РБДГ-10-4000-0,18У3,
 $x_r=0,18 \text{ Ом}$:

$$X_{P2} = X_r \cdot \frac{S_6}{U_H^2} = 0,18 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,18 \text{ Ом;}$$

$$X_{P2(6)} = X_{P2*} \cdot Z_6 = 0,18 \cdot 0,36 = 0,0648.$$

- линии Л1, ААБ2-(3×185), $\ell=700 \text{ м}$,
 $r_0=0,179 \text{ Ом/км}$, $x_0=0,07 \text{ Ом/км}$:

$$X_{Л1*} = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,07 \cdot 0,7 \cdot \frac{100}{6^2} = 0,136;$$

$$R_{Л1} = r_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,179 \cdot 0,7 \cdot \frac{100}{6^2} = 0,348;$$

$$X_{Л1(6)} = X_{Л1*} \cdot Z_6 = 0,136 \cdot 0,36 = 0,049 \text{ Ом;}$$

$$R_{Л1(6)} = R_{Л1*} \cdot Z_6 = 0,348 \cdot 0,36 = 0,125 \text{ Ом.}$$

- линии Л2, ААБ2-(3×185), $\ell=0,075 \text{ км}$,
 $r_0=0,22 \text{ Ом/км}$, $x_0=0,179 \text{ Ом/км}$:

$$X_{Л2*} = x_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,07 \cdot 0,075 \cdot \frac{100}{6^2} = 0,0146;$$

$$R_{Л2*} = r_0 \cdot \ell \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,179 \cdot 0,075 \cdot \frac{100}{6^2} = 0,0373;$$

$$X_{Л2(6)} = X_{Л2*} \cdot Z_6 = 0,0146 \cdot 0,36 = 0,0053 \text{ Ом;}$$

$$R_{л2(6)} = R_{л2*} \cdot Z_6 = 0,0373 \cdot 0,36 = 0,0134 \text{ Ом.}$$

- двигателя газодувки: $P_H = 2,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $m_i = 6,4$, $\cos \phi = 0,89$:

$$S_{н.дв} = \frac{P_H}{\cos \phi_H} = \frac{2,5}{0,89} = 2,81 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$X_{Ад*} = X_{d*}'' = \frac{1}{m_i} \cdot \frac{S_6}{S_{н.дв}} = \frac{1}{6,4} \cdot \frac{100}{2,81} = 5,56;$$

$$X_{Ад(6)} = X_{d(6)}'' = X_{Ад*} \cdot Z_6 = 5,56 \cdot 0,36 \approx 2 \text{ Ом.}$$

- батареи конденсаторов БСК: $Q = 6 \cdot 100 = 600 \text{ кВАр}$, $U_{нф} = 3,637 \text{ кВ}$; $C = 24,06 \text{ мкФ}$ на одну банку $Q_1 = 100 \text{ кВАр}$.

Сопротивление БСК находим из формулы:

$$Q = \frac{U_{нф}^2}{X_{БСК(6)}};$$

$$X_{БСК(6)} = \frac{U_{нф}^2}{Q_{БСК(6)}} = \frac{3,637 \cdot 10^3}{600} = 22 \text{ Ом};$$

$$X_{БСК*} = \frac{X_{БСК(6)}}{Z_6} = \frac{22}{0,36} = 61,11.$$

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Произведём расчет токов трёхфазного и двухфазного КЗ по схеме рис. 1 А.

Точка КЗ (K_1) на шинах ГПП:

$$I_{K1*}^{(3)} = \frac{U_c}{X_{c*max} + X_{Г1*} + X_{P1*}} = \frac{1,05}{0,0406 + 0,328 + 0,175} = 1,932;$$

$$I_{K1*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K1*}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,932 = 1,673.$$

В именованных единицах:

$$I_{K1(6)}^{(3)} = I_{K1*}^{(3)} \cdot I_6 = 1,932 \cdot 9,63 = 18,61 \text{ кА};$$

$$I_{K1(6)}^{(2)} = I_{K1*}^{(2)} \cdot I_6 = 1,673 \cdot 9,63 = 16,11 \text{ кА}.$$

Точка КЗ (K_2) на шинах подстанции, питающей газодувки:

$$I_{K2*}^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{(X_{c*max} + X_{Г1*} + X_{P1*} + X_{Л1*})^2 + (R_{Л1*})^2}} = \frac{1,05}{\sqrt{(0,0406 + 0,328 + 0,175 + 0,136)^2 + 0,348^2}} = 1,375;$$

$$I_{K1*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K2*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,375 = 1,191;$$

$$I_{K2(6)}^{(3)} = I_{K2*}^{(3)} \cdot I_6 = 1,375 \cdot 9,63 = 13,24 \text{ кА};$$

$$I_{K2(6)}^{(2)} = I_{K2*}^{(2)} \cdot I_6 = 1,191 \cdot 9,63 = 11,47 \text{ кА}.$$

Точка КЗ (K_3) на выводах электродвигателя газодувки:

$$I_{K3*}^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{(X_{c*max} + X_{Г1*} + X_{P1*} + X_{Л1*} + X_{Л2*})^2 + (R_{Л1*} + R_{Л2*})^2}} = \frac{1,05}{\sqrt{(0,0406 + 0,328 + 0,175 + 0,136 + 0,0146)^2 + (0,348 + 0,0373)^2}} = 1,322;$$

$$I_{K3*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K3*}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,322 = 1,145;$$

$$I_{K3(6)}^{(3)} = I_{K3*}^{(3)} \cdot I_6 = 1,322 \cdot 9,63 = 12,73 \text{ кА};$$

$$I_{K3(6)}^{(2)} = I_{K3*}^{(2)} \cdot I_6 = 1,145 \cdot 9,63 = 11,03 \text{ кА}.$$

Произведем расчет токов трехфазного и двухфазного КЗ по схеме рис. 1 Б.

Точка КЗ (K_4) на шинах ГПП:

$$I_{K4*}^{(3)} = \frac{U_c}{X_{c*max} + X_{Г2*} + X_{P2*}} = \frac{1,05}{0,0406 + 0,263 + 0,18} = 2,171;$$

$$I_{K4*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K4*}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,171 = 1,88;$$

$$I_{K4(6)}^{(3)} = I_{K4*}^{(3)} \cdot I_6 = 2,171 \cdot 9,63 = 20,91 \text{ кА};$$

$$I_{K4(6)}^{(2)} = I_{K4*}^{(2)} \cdot I_6 = 1,88 \cdot 9,63 = 18,1 \text{ кА.}$$

Точка КЗ (K₅) на шинах подстанции, питающей газодувки:

$$\begin{aligned} I_{K5*}^{(3)} &= \frac{U_c}{\sqrt{(X_{c*max} + X_{T2*} + X_{P2*} + X_{Л1*})^2 + (R_{Л1*})^2}} = \\ &= \frac{1,05}{\sqrt{(0,0406 + 0,263 + 0,18 + 0,136)^2 + 0,348^2}} = \\ &= 1,478; \end{aligned}$$

$$I_{K5*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K5*}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,478 = 1,28;$$

$$I_{K5(6)}^{(3)} = I_{K5*}^{(3)} \cdot I_6 = 1,478 \cdot 9,63 = 14,23 \text{ кА;}$$

$$I_{K5(6)}^{(2)} = I_{K5*}^{(2)} \cdot I_6 = 1,28 \cdot 9,63 = 12,33 \text{ кА.}$$

Точка КЗ (K₆) на выводах электродвигателя газодувки:

$$\begin{aligned} I_{K6*}^{(3)} &= \frac{U_c}{\sqrt{(X_{c*max} + X_{T2*} + X_{P2*} + X_{Л1*} + X_{Л2*})^2 + (R_{Л1*} + R_{Л2*})^2}} = \\ &= \frac{1,05}{\sqrt{(0,0406 + 0,263 + 0,18 + 0,136 + 0,0146)^2 + (0,348 + 0,0373)^2}} = \\ &= 1,415; \end{aligned}$$

$$I_{K6*}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{K6*}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 1,415 = 1,225;$$

$$I_{K6(6)}^{(3)} = I_{K6*}^{(3)} \cdot I_6 = 1,415 \cdot 9,63 = 13,63 \text{ кА;}$$

$$I_{K6(6)}^{(2)} = I_{K6*}^{(2)} \cdot I_6 = 1,225 \cdot 9,63 = 11,8 \text{ кА.}$$

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГАЗОДУВКИ

Данный расчет заключается в построении механической характеристики АД $m_f=f(s)$ и оценке режимов пуска АД по значениям динамических моментов.

Принимается базисная величина номинального напряжения: $U_{н.АД} = 6 \text{ кВ.}$

$$I_{н.дв} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos \phi_n} = \frac{2500}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,96 \cdot 0,89} = 282 \text{ А;}$$

Критическое скольжение:

$$S_{кр} = \frac{\sqrt{\frac{m_n}{m_{0,05}} - 0,05}}{\sqrt{20 - \frac{m_n}{m_{0,05}}}} = \frac{\sqrt{\frac{1,15}{1,5} - 0,05}}{\sqrt{20 - \frac{1,15}{1,5}}} = 0,193;$$

Максимальный момент:

$$m_m = \frac{m_n}{2} \cdot \left(\frac{1}{S_{кр}} + S_{кр} \right) = \frac{1,15}{2} \cdot \left(\frac{1}{0,193} + 0,193 \right) = 3,1;$$

Механическая характеристика $m_a=f(s)$ по формуле Клосса:

$$m_a(s) = \left(m_m \cdot \frac{2}{\frac{s}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{s}} \right) = 3,1 \cdot \frac{2}{\frac{0,05}{0,193} + \frac{0,193}{0,05}} = 1,51;$$

Момент сопротивления механизма газодувки:

$$\begin{aligned} m_c(s) &\approx 0,15 + 0,85 \cdot (1-s)^2 = \\ &= 0,15 + 0,85 \cdot (1-0,05) = 0,92. \end{aligned}$$

Задаваясь дискретными значениями скольжения s от 1 до 0, составляем табл. 1.

По дискретным значениям табл. 1 строим график $m_a(s)$, представленный на рис. 3.

РЕАКТОРНЫЙ ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГАЗОДУВКИ

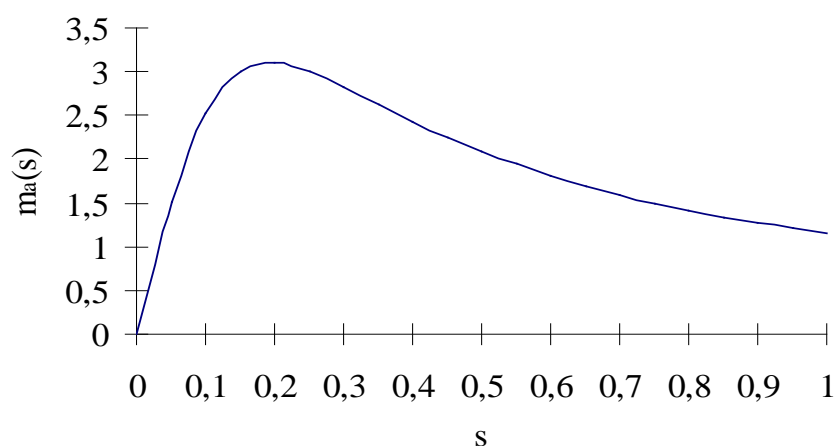
Построение механической характеристики $m_{a(p)}=f(s)$ при реакторном пуске. Оценка режима пуска АД производится по значению динамического момента $m_{д(1)}$. При этом: $U^*=1$; $m_{i \min}=6,0$; $m_{in}=6,4$;

$$S_{дв.н} = \frac{P_n}{\cos \phi_n} = \frac{2,5}{0,89} = 2,81 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Значения моментов двигателя и сопротивления в зависимости от изменения скольжения

Values of motor torques and resistances depending on slip change

Скольжение s	Момент двигателя $m_a(s)$	Момент сопротивления механизма $m_c(s)$
0	0	1,0
0,05	1,51	0,92
0,1	2,53	0,84
0,15	3,0	-
0,2	3,1	0,69
0,25	3,0	-
0,3	2,82	0,57
0,35	2,62	-
0,4	2,43	0,46
0,45	2,25	-
0,5	2,08	0,36
0,55	1,94	-
0,6	1,81	0,29
0,65	1,69	-
0,7	1,59	0,23
0,75	1,5	-
0,8	1,41	0,18
0,85	1,34	-
0,9	1,27	0,16
0,95	1,21	-
1,0	1,15	0,15

Рис. 3. Механическая характеристика асинхронного двигателя газодувки $m_a=f(s)$ Fig. 3. Mechanical characteristics of asynchronous blower motor $m_a=f(s)$

Сопротивление двигателя при пуске (s=1)

$$X_d'' = \frac{1}{m_{in}} = \frac{1}{6,4} = 0,156.$$

Сопротивление реактора определяем по выражению:

$$X_p = U_* \left(\frac{1}{m_{i,min}} - \frac{1}{m_{in}} \right) = 1 \cdot \left(\frac{1}{6,0} - \frac{1}{6,4} \right) = 0,0104;$$

$$X_{p1} = X_p \cdot \frac{U_{нн}^2}{S_6} = 0,0104 \cdot \frac{6^2}{2,81} = 0,133 \text{ Ом.}$$

Расчетный номинальный ток реактора:

$$I_{p,расч.} = 0,2 \cdot I_{н.дв.} = 0,2 \cdot 0,282 = 0,056 \text{ кА.}$$

По каталогу выбираем ближайший по расчетным данным реактор: РБ-10-1000-0,14УЗ (реактор бетонный, $U_n=10$ кВ, $I_n=1000$ А, $X_p' = 0,14$ Ом)

С учетом каталожного значения X_p' пересчитываем значение X_p :

$$X_p = X_p' \cdot \frac{S_6}{U_{н.дв.}^2} = 0,14 \cdot \frac{2,81}{6^2} = 0,011 \text{ Ом.}$$

Максимальный момент при реакторном пуске (s=1):

$$m' = m_m \cdot \frac{X_d''}{X_d'' + X_p} = 1,15 \cdot \frac{0,156}{0,156 + 0,011} = 1,074.$$

Критическое скольжение при реакторном пуске:

$$s'_{кр} = s_{кр} \cdot \frac{X_d''}{X_d'' + X_p} = 0,193 \cdot \frac{0,156}{0,156 + 0,011} = 0,18.$$

Механическая характеристика $m_{a(p)}=f(s)$ по формуле Клосса:

$$m_{a(p)} = m'_m \cdot \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} = 1,07 \cdot \frac{2}{\frac{0,05}{0,18} + \frac{0,18}{0,05}} = 0,55.$$

Задаваясь дискретными значениями скольжения s от 1 до 0, составляем табл. 2.

Таблица 2

Значения моментов двигателя и сопротивления в зависимости от изменения скольжения

Table 2

Values of motor torques and resistances depending on slip change

Скольжение s	Момент двигателя $m_{a(p)}(s)$	Момент сопротивления механизма $m_c(s)$
0	0	1
0,05	0,55	0,92
0,1	0,91	0,84
0,18	1,074	0,72
0,2	1,06	0,69
0,3	0,94	0,57
0,4	0,8	0,46
0,5	0,68	0,36
0,6	0,59	0,29
0,7	0,52	0,23
0,8	0,46	0,18
0,9	0,41	0,16
1,0	0,37	0,15

По дискретным значениям табл. 2 строим характеристики $m_{a(p)} = f(s)$ и $m_c = f(s)$, ($m_c \approx 0,15 + 0,85(1-s)^2$), представленные на рис. 4, 5. На основании рис. 4 значение динамического момента равно: $m_{д(1)} = m_{a(1)} - m_{c(1)} = 0,37 - 0,15 = 0,22 > 0,1$ – пуск обеспечивается.

Напряжение на зажимах двигателя при реакторном пуске:

$$U_{дв} = U_* \cdot \frac{X_d''}{X_d'' + X_p} = 1 \cdot \frac{0,156}{0,156 + 0,011} = 0,93.$$

Установившееся значение скольжения:

$$s_{уст} = \frac{0,05 \cdot m_{c(0,05)}}{U^2 \cdot m_{a(p)(0,05)}} = \frac{0,05 \cdot 0,92}{0,93^2 \cdot 0,55} = 0,097.$$

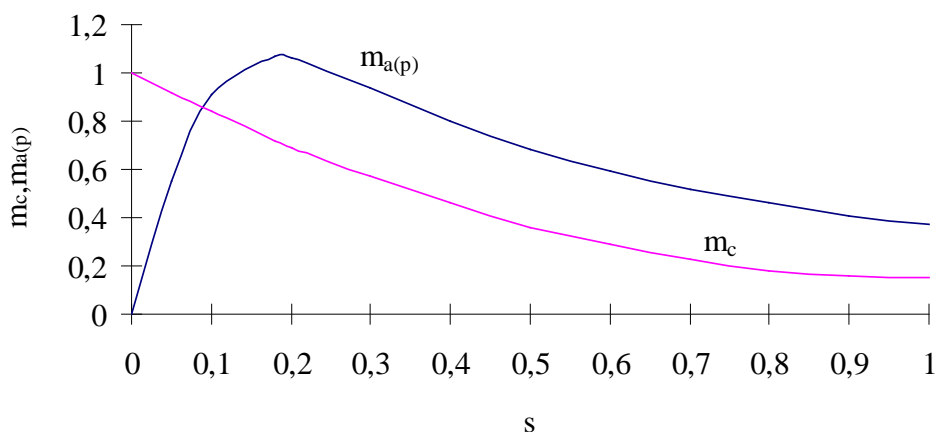


Рис. 4. Механическая характеристика асинхронного двигателя газодувки при реакторном пуске $m_{a(p)}=f(s)$

Fig. 4. Mechanical characteristic of asynchronous blower motor during reactor start $m_{a(r)}=f(s)$

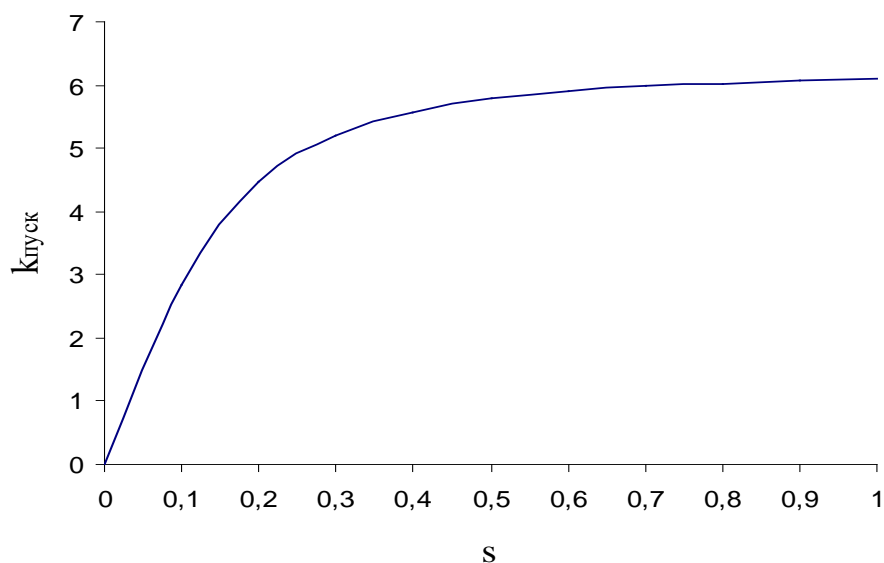


Рис. 5. Характеристика кратности пускового тока $k_{пуск}=f(s)$

Fig. 5. Characteristic of the multiplicity of starting current $k_{starting}=f(s)$

ВЫВОДЫ

1. В работе произведено исследование режимов работы асинхронного двигателя газодувки, являющейся важнейшим потребителем, от надежной работы которого зависит нормальное функционирование системы электроснабжения подстанции, от которой получает питание технологические переделы при производстве серы на предприятии цветной металлургии [15-18].

2. Представлены графики изменения коэффициента мощности в отдельных фазах газодувки. Установлено, что в период пуска коэффициент мощности снижается до значения 0,2, при этом в начальный момент пуска имело место отклонение частоты от номинального значения на 0,3 Гц.

3. Произведен расчет токов короткого замыкания по однолинейной схеме электроснабжения. Выполнено определение сопротивлений отдельных элементов в относительных базисных единицах: системы, воздушных линий, трансформаторов, реактора, двигателя газодувки, батарей статических конденсаторов. Определены значения токов трехфазного и двухфазного короткого замыкания по двум схемам, имеющих разные типы и мощности силовых трансформаторов (32 МВА и 40 МВА соответственно), а также типы реакторов. Установлено, что наибольшие токи короткого замыкания наблюдаются на шинах главной понижающей подстанции (ГПП), а на шинах подстанции, питающей газодувки, и на выводах электродвигателя газодувки значения токов примерно одинаковые. Определенные значения токов короткого замыкания используются при выборе селективной релейной защиты на подстанции, питающей технологический передел производства серы.

4. Выполнен расчет устойчивости асинхронного двигателя газодувки, заключающийся в построении механической характеристики АД $m_T=f(s)$ и оценке режимов пуска АД по значениям динамических моментов. Установлено, что при изменении скольжения от $0 \div 1$ момент двигателя изменяется в диапазоне: $0 \div 3,1$, наибольшее значение момента приобретает при скольжении равном 0,2. При повышении скольжения от 0 до 1

значение момент сопротивления снижается от значения 1,0 до 0,15.

5. Произведено построение механической характеристики асинхронного двигателя газодувки при реакторном пуске и кратности пускового тока в зависимости от скольжения. Установлено, что наибольший момент двигателя (1,074) наблюдается при значении скольжения равном 0,18.

Полученные в работе результаты могут быть использованы в ходе реализации мероприятий по повышению эффективности использования электроэнергии в системе электроснабжения предприятий цветной металлургии по производству свинцово-цинковой продукции [19, 20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klyuev, R.V. Rank analysis of higher harmonics voltage spectrum of metallurgy enterprises [Текст] / R. V. Klyuev, I. I. Bosikov, O. A. Gavrina, V. Ch. Revazov, M. Z. Madaeva // AtlantisPress. – 2018. – P. 169-174. DOI: 10.2991/ciggg-18.2019.32.

2. Klyuev, R.V. Experimental and analytical study of highest harmonic components of voltage of industrial enterprises / R. V. Klyuev, I. I. Bosikov, A. A. Sokolov, M. Z. Madaeva, A. A. Khadzhiev // AtlantisPress. – 2018. – P. 135-140. DOI: 0.2991/ciggg-18.2019.33.

3. Широков, О.Г. Влияние электротермического оборудования на качество электроэнергии в системе электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / О. Г. Широков, Т. В. Алфёрова, Ю. А. Рудченко, О. С. Шведова // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2021. – № 4 (87). – С. 90-99.

4. Пидгурская, Е.С. Влияние работы полупроводниковых выпрямителей на качество электрической энергии [Текст] / Е. С. Пидгурская, А. А. Воршевский // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. – 2019. – Т. 1. – № 1. С. 138.

5. Buryanina, N. Four samples method for the selection of sinusoidal components parameters of power system emergency mode

- [Текст] / N. Buryanina, Yu. Korolyuk, M. Koryakina, K. Suslov, E. Lesnykh // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 1–4 October 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934775.
6. Zatsepina, V. I. Reliability of power supply systems under the influence of negative factors [Текст] / V. I. Zatsepina, E. P. Zatsepin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings. electronic edition. – 2017. – С. 8076218.
7. Zatsepina, V. I. Analysis of load indicators power grid complex when feeding differentiated consumer [Текст] / V. I. Zatsepina, E. P. Zatsepin, O. Ya. Shachnev // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. – 2019. – С. 8742998.
8. Ключев, Р.В. Прогнозирование удельного потребления электроэнергии обогатительной фабрики [Текст] / Р. В. Ключев, О. А. Гаврина, В.Н. Хетагуров, С. Г. Засеев, Б. З. Умиров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 135–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-135-145.
9. Bornschlegl, M. Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies [Текст] / M. Bornschlegl, M. Bregulla, J. Franke // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 1351. – P. 644–656.
10. Biel, K. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning [Текст] / K. Biel, C. Glock // Computers & Industrial Engineering. – 2016. – Vol. 101. – P. 243–259.
11. Kaboli, S. Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm [Текст] / S. Kaboli, J. Selvaraj, N. Rahim // Energy. – 2016. – Vol. 115. – P. 857–871.
12. Zhukovskiy, Y. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform [Текст] / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, A. Buldysko, M. Shabalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.
13. Meira, de Oliveira E. Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods [Текст] / de Oliveira E. Meira, F. Oliveira, F. Cyrino // Energy. – 2018. – Vol. 1441. – P. 776–788.
14. Соколов, А.А. Разработка метода решения задач системного анализа в природно-промышленной системе [Текст] / А. А. Соколов, А. Ю. Аликов, И. И. Босиков, Ю. С. Петров // Перспективы науки. – 2010. – № 4 (6). – С. 83-85.
15. Golik, V. Metal deposits combined development experience [Текст] / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Т. 7. – № 6. – P. 591–594.
16. Wei, N. Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review [Текст] / N. Wei, Ch. Li, X. Peng, F. Zeng, X. Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 181. – № 106187.
17. He, Y. Forecasting energy consumption in Anhui province of China through two Box-Cox transformation quantile regression probability density methods [Текст] / Y. He, Y. Zheng, Q. Xu // Measurement. – 2019. – Vol. 136. – P. 579–593.
18. Xiao, J. A hybrid model based on selective ensemble for energy consumption forecasting in China [Текст] / J. Xiao, Y. Li, L. Xie, D. Liu, J. Huang // Energy. – 2018. – Vol. 15915. – P. 534–546.
19. Моргоева, А. Д. Прогнозирование нагрузки на электросеть как способ эффективного управления потреблением электрической энергии [Текст] / И. Д. Моргоева, Р. В. Ключев, В. И. Ляшенко // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2021. – №4(66). – С. 39-51. – DOI: 10.53015/18159958_2021_4_39.
20. Carvalho, J. Long term load forecasting accuracy in electric utility integrated resource planning [Текст] / J. Carvalho, P. Larsen, A. Sanstad, Ch. Goldman // Energy Policy. – 2018. – Vol. 119. – P. 410–422.

REFERENCES

1. Klyuev, R.V. Rank analysis of higher harmonics voltage spectrum of metallurgy

enterprises [Text] / R. V. Klyuev, I. I. Bosikov, O. A. Gavrina, V. Ch. Revazov, M. Z. Madaeva // AtlantisPress. – 2018. – P. 169-174. DOI: 10.2991/ciggg-18.2019.32.

2. Klyuev, R.V. Experimental and analytical study of highest harmonic components of voltage of industrial enterprises / R. V. Klyuev, I. I. Bosikov, A. A. Sokolov, M. Z. Madaeva, A. A. Khadzhiev // AtlantisPress. – 2018. – P. 135-140. DOI: 0.2991/ciggg-18.2019.33.

3. Shirokov, O.G. Effects of electrothermal equipment for electric power quality in power supply system of industrial enterprises [Text] / / O. G. Shirokov, T. V. Alferova, Y. A. Rudchenko, O. S. Shvedova // Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo – 2021. – № 4 (87). – P. 90-99.

4. Pidgurskaya, E.S. The effect of semiconductor rectifiers on the quality of electrical energy [Text] / E. S. Pidgurskaya, A. A. Worshevsky // Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta – 2019. – T. 1. – № 1. P. 138.

5. Buryanina, N. Four samples method for the selection of sinusoidal components parameters of power system emergency mode [Text] / N. Buryanina, Yu. Korolyuk, M. Koryakina, K. Suslov, E. Lesnykh // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, Russia, 1–4 October 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934775.

6. Zatsepina, V. I. Reliability of power supply systems under the influence of negative factors [Text] / V. I. Zatsepina, E. P. Zatsepin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings. electronic edition. – 2017. – C. 8076218.

7. Zatsepina, V. I. Analysis of load indicators power grid complex when feeding differentiated consumer [Text] / V. I. Zatsepina, E. P. Zatsepin, O. Ya. Shachnev // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. – 2019. – C. 8742998.

8. Klyuev, R.V. Prediction of specific electric energy consumption at processing plant

[Text] / R. V. Klyuev, O. A. Gavrina, V. N. Khetagurov, S. G. Zaseev, B. Z. Umirov // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. – 2020. – № 11-1. – P. 135–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-135-145.

9. Bornschlegl, M. Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies [Text] / M. Bornschlegl, M. Bregulla, J. Franke // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 1351. – P. 644–656.

10. Biel, K. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning [Text] / K. Biel, C. Glock // Computers & Industrial Engineering. – 2016. – Vol. 101. – P. 243–259.

11. Kaboli, S. Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm [Text] / S. Kaboli, J. Selvaraj, N. Rahim // Energy. – 2016. – Vol. 115. – P. 857–871.

12. Zhukovskiy, Y. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform [Text] / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, A. Buldysko, M. Shabalov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1333 (6). DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

13. Meira, de Oliveira E. Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods [Text] / de Oliveira E. Meira, F. Oliveira, F. Cyrino // Energy. – 2018. – Vol. 1441. – P. 776–788.

14. Sokolov, A. A. Development of the technique for system analysis problem-solving in physical industrial system [Text] / A. A. Sokolov, A. Yu. Alikov, I. I. Bosikov, Yu. S. Petrov // Science prospects. – 2010. – № 4 (6). – P. 83-85.

15. Golik, V. Metal deposits combined development experience [Text] / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – T. 7. – № 6. – P. 591–594.

16. Wei, N. Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review [Text] / N. Wei, Ch. Li, X. Peng, F. Zeng, X. Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 181. – № 106187.

17. He, Y. Forecasting energy consumption in Anhui province of China through two Box-

Cox transformation quantile regression probability density methods [Text] / Y. He, Y. Zheng, Q. Xu // Measurement. – 2019. – Vol. 136. – P. 579–593.

18. Xiao, J. A hybrid model based on selective ensemble for energy consumption forecasting in China [Text] / J. Xiao, Y. Li, L. Xie, D. Liu, J. Huang // Energy. – 2018. – Vol. 15915. – P. 534–546.

19. Morgoeva, A. D. Forecasting the load on the power grid as a way to effectively

manage the consumption of electrical energy [Text] / A. D. Morgoeva, I. D. Morgoev, R. V. Klyuev, V. I. Lyashenko // News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region. – 2021. – №4(66). – P. 39-51. – DOI: 10.53015/18159958_2021_4_39.

20. Carvallo, J. Long term load forecasting accuracy in electric utility integrated resource planning [Text] / J. Carvallo, P. Larsen, A. Sanstad, Ch. Goldman // Energy Policy. – 2018. – Vol. 119. – P. 410–422.

УДК 519.6, 004.42

DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_60

РЕАЛИЗАЦИЯ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА И НЬЮТОНА НА PYTHON

IMPLEMENTATION AND COMPARISON OF GRADIENT DESCENT AND NEWTON METHODS ON PYTHON

©2022

Седых Ирина Александровна^{1,2}, доктор технических наук, профессор
кафедры высшей математики

Камкин Илья Дмитриевич¹, студент кафедры автоматизированных систем
управления

Sedykh Irina Alexandrovna^{1,2}, Doctor of Technical Sciences, Professor of the
Department of Higher Mathematics

Kamkin Ilya Dmitrievich¹, Student of the Department of Automated Control
Systems

¹*Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)*

¹*Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)*

E-mail: ilya.kamckine@yandex.ru

E-mail: sedykh-irina@yandex.ru

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0012-8103>

Аннотация: В работе рассмотрены численные методы многомерной оптимизации: градиентный спуск на основе импульса и метод Ньютона. Описаны достоинства, недостатки, а также особенности данных методов и сферы их применения. Приведены алгоритмы методов градиентного спуска и Ньютона, описаны ограничения на условия их применимости. Выполнена программная реализация методов отображения графика функции и движения точки промежуточного минимума по данному графику. Произведено сравнение рассматриваемых методов на примере нахождения минимума непрерывной функции нескольких переменных, а также в задаче минимизации среднеквадратической ошибки в контролируемой классификации.

Ключевые слова: многомерная оптимизация, метод градиентного спуска на основе импульса, метод Ньютона, минимизация, среднеквадратическая ошибка, Python.

Для цитирования: Седых И.А., Камкин И.Д. Реализация и сравнение методов градиентного спуска и Ньютона на python // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2022. – Т. 18, № 3 (69). – С. 60–75. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_60.

Abstract: The paper considers numerical methods of multidimensional optimization: gradient descent based on momentum and Newton's method. The advantages, disadvantages, as well as features of these methods and their scope of application are described. Algorithms of gradient descent and Newton methods are given, restrictions on the conditions of their applicability are described. The software implementation of methods for displaying the graph of the function and the movement of the intermediate minimum point according to this graph has been performed. The comparison of the methods under consideration is made on the example of finding the minimum of a continuous

function of several variables, as well as in the problem of minimizing the root-mean-square error in a controlled classification.

Keywords: multidimensional optimization, momentum-based gradient descent method, Newton's method, minimization, root-mean-square error, Python.

For citation: Sedykh I.A., Kamkin I.D. Implementation and comparison of gradient descent and Newton methods in python // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2022. – Vol. 18, № 3 (69). – P. 60–75. DOI: 10.53015/18159958_2022_18_3_60.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из самых распространённых методов многомерной оптимизации являются метод градиентного спуска и метод Ньютона [1]. Оба этих метода являются итерационными, то есть значение на следующем шаге рассчитывается исходя из значения на предыдущем. Главными рассмотренными характеристиками обоих методов являются количество сделанных шагов, а также различие между найденным локальным и глобальным минимумами. Существует множество модификаций градиентного спуска, в данной статье будет рассмотрен градиентный спуск на основе импульса, поскольку он является простой модификацией исходного алгоритма, лишённой главных недостатков, а именно попадания в ловушку локального минимума и осцилляции. Градиентный спуск на основе импульса относится к методам первого порядка, в то время как метод Ньютона – к методам второго порядка.

Данные методы применяются для поиска экстремумов функции нескольких переменных, в частности для минимизации ошибки в процессе обучения нейронных сетей [2]. На данный момент нейросети активно используются как в анализе данных, так и в прикладных задачах [3]. В работе рассмотрено сравнение методов градиентного спуска и Ньютона при изменении их параметров на примере нахождения минимума непрерывной функции и минимизации среднеквадратической ошибки в контролируемой классификации.

МЕТОДЫ БЕЗУСЛОВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Градиентный спуск [4] – простой метод оптимизации, позволяющий найти мини-

мум целевой функции. Это жадный алгоритм, который делает шаг в сторону максимальной скорости убывания функции. Рассмотрим функцию нескольких переменных $f(w)$, где $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$. Чтобы найти w^* , при котором функция достигает своего локального минимума, градиентный спуск делает следующие шаги:

1. Выбирается случайное значение w^0 .
2. $i = 0$.
3. Выбирается максимальное количество итераций T .
4. Выбирается значение скорости обучения (шаг сходимости) $\eta \in [a, b]$.
5. Повторять шаги а, б, с пока $|f(w^i) - f(w^{i-1})| > \epsilon$ или число итераций не превысит T .

$$\begin{aligned} \text{a. } \Delta w^i &= -\eta \cdot f'(w^i). \\ \text{b. } w^{i+1} &= w^i + \Delta w^i. \\ \text{c. } i &= i + 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Градиент:

$$f'(w^i) = \nabla f(w^i) = \left[\frac{\partial f(w^i)}{\partial w_1}, \frac{\partial f(w^i)}{\partial w_2}, \dots, \frac{\partial f(w^i)}{\partial w_n} \right]$$

Градиент можно рассматривать как вектор, указывающий направление, в котором функция возрастает быстрее всего. Следование отрицательному направлению градиента приведёт к точкам, в которых значение функции уменьшается с максимальной скоростью. Скорость обучения, также называемая размером шага, определяет скорость движения в направлении от градиента.

При использовании градиентного спуска возникают следующие проблемы:

1. Попадание в ловушку локального минимума, что является прямым следствием жадности этого алгоритма.

2. Отсутствие глобального оптимума – это прямой результат слишком быстрого движения по направлению градиента.

3. Осцилляция [5] – это явление, которое возникает, когда значение функции не изменяется существенно независимо от направления, в котором оно движется (так называемое плато).

Чтобы решить эти проблемы, к выражению (1) добавляется импульс α . Данный метод называется градиентным спуском на основе импульса:

$$\Delta w^i = -\eta \cdot f'(w^i) + \alpha w^{i-1}. \quad (2)$$

МЕТОД НЬЮТОНА

Метод Ньютона – итерационный алгоритм, который в одномерном случае выглядит следующим образом:

$$w^{i+1} = w^i - \frac{f(w^i)}{f'(w^i)}. \quad (3)$$

В многомерном случае в формуле (3) первая производная заменяется на градиент, а вторая – на матрицу Гессе:

$$\begin{aligned} f'(w^i) &= \nabla f(w^i) = g^i, \\ \nabla^2 f(w^i) &= H^i, \\ w^{i+1} &= w^i - H_i^{-1} g^i. \end{aligned}$$

```
class Graph:
    def __init__(self, board: tuple[np.ndarray, np.ndarray], params=None):
        self.board = board
        self.params = params if params is not None else tuple()
        self.random_seed = np.random.RandomState(19)
```

Далее реализуем получение случайных стартовых значений координат, с учётом `random_seed`, метод `get_random_cords` при-

```
def get_random_cords(self, left, right, quantity) -> np.ndarray:
    return self.random_seed.uniform(left, right, quantity)
```

После, в методе `draw_board` реализуем визуализацию графика `board`. Отображается график в цветовой схеме «RdBu_r», а после

Достаточным условием сходимости в методе Ньютона является положительная определённость матрицы Гессе [6].

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Далее рассмотрена программная реализация инструментов для анализа работы рассмотренных выше методов оптимизации на языке программирования Python.

МЕТОДЫ ГРАФИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

Для работы с матрицами используется библиотека `numpy` [7], для графического представления – библиотека `matplotlib` [8].

Перед тем как реализовывать методы оптимизации, создадим базовый класс `Graph` с основными методами. Необходимо хранить несколько переменных:

- Поле `board` – значения исследуемой функции на фиксированном промежутке аргументов.
- Параметры `params` – дополнительные значения, которые понадобятся позже.
- Случайный сид `random_seed` – число, необходимое для получения псевдослучайных чисел, которые будут всегда одинаковы, при одинаковом значении `random_seed`.

Ниже представлена реализация:

нимает левую и правую границы `left`, `right` выдаваемых значений, а также количество этих значений `quantity`:

рисует стрелку с подписью, указывающая на глобальный минимум:

```
def draw_board(self) -> None:
    pts, f_vals = self.board
    f_plot = plt.scatter(
        pts[:, 0], pts[:, 1],
        c=f_vals, vmin=min(f_vals), vmax=max(f_vals),
        cmap='RdBu_r')
    plt.colorbar(f_plot)
    self.draw_arrow(
        min(zip(*self.board), key=lambda x: x[1])[0],
        'yellow', (-5, -10), 'глобальный минимум'
    )
```

В методе визуализации поля использовался метод `draw_arrow` – этот метод отобра-

жает стрелку заданного цвета с надписью, указывающую на некоторую координату:

```
def draw_arrow(self, cord_point, color, cord_text, text):
    plt.plot(xy=cord_point, marker='P', markersize=10, c=color)
    plt.annotate(text, xy=cord_point, xytext=cord_text,
        arrowprops={
            "arrowstyle": "->",
            "color": color,
            "connectionstyle": 'arc3'
        })
```

Далее реализуем отображение движения точки промежуточного минимума по по-

верхности во время работы метода оптимизации:

```
def draw_graph_on_board(self, points) -> None:
    self.draw_board()
    plt.plot(points[:, 0], points[:, 1], marker='o', c='magenta')
    self.draw_arrow(points[-1], 'green', (-1, 7), 'минимум')
    for i, w in enumerate(points[:-1]):
        plt.annotate("", xy=w, xycoords='data', xytext=points[i+1, :],
            textcoords='data', arrowprops={
                "arrowstyle": "<-'",
                "connectionstyle": 'angle3'
            })
```

Чтобы отображать только изменение значения на каждом шаге, реализуем метод `draw_graph_on_ax`:

```
def draw_graph_on_ax(self, ax, points, color, label) -> None:
    _, y = points
    ax.plot(np.arange(y.size), y, color=color, label=label)
```

Далее для универсальности класса нужно задать несколько методов, которые будут «пустыми» в данном классе, однако далее они переопределяются для каждой исследуемой функции:

- вычисление значения функции,
- вычисление первой производной,
- вычисление матрицы Гессе.

Ниже представлена программная реализация:

```

def function(self, cords: np.ndarray):
    raise NotImplementedError("Обязательно к переопределению.")

def function_derivative(self, cords: np.ndarray):
    raise NotImplementedError("Обязательно к переопределению.")

def function_hesse(self, cords: np.ndarray):
    raise NotImplementedError("Обязательно к переопределению.")

```

Последнее, что необходимо реализовать – это метод вычисления Δw^i :

```

@staticmethod
def calculate_diff(pred, pred_pred):
    return np.absolute(pred - pred_pred)

```

РЕАЛИЗАЦИЯ ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА

Используя приведённые ранее инструменты, опишем реализацию метода градиентного спуска на основе импульса. Метод должен возвращать все координаты точек w^i и значения функции в данных точках, обозначим их соответственно $w_history$ и $f_history$. На вход метода `gradient_descent` подаются следующие значения:

- `learning_rate`: float – скорость обучения

(шаг сходимости),

- `momentum`: float – импульс,
- `max_iterations`: int – максимальное количество итераций,
- `threshold`: float – величина значения `calculate_diff`, при котором произойдёт остановка,
- `cords_copy` – координата, с которой начинается алгоритм оптимизации.

Ниже представлена реализация метода градиентного спуска на основе импульса:

```

def gradient_descent(self,
                    learning_rate: float,
                    momentum: float,
                    max_iterations: int,
                    threshold: float,
                    cords_copy: np.ndarray)
    -> tuple[np.ndarray, np.ndarray]:
    w_history = cords_copy.copy()
    f_history = self.function(cords_copy.copy())
    delta_w = np.zeros(cords_copy.shape)
    i, diff = 0, 1e10
    while i < max_iterations and diff > threshold:
        delta_w = -learning_rate * self.function_derivative(
            cords_copy
        ) + momentum * delta_w
        cords_copy += delta_w

    w_history = np.vstack((w_history, cords_copy))
    f_history = np.vstack((f_history, self.function(cords_copy)))
    i += 1
    diff = self.calculate_diff(f_history[-1], f_history[-2])
    return w_history, f_history

```

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА НЬЮТОНА

Далее опишем реализацию метода Ньютона. Для сходимости алгоритма необхо-

дима положительная определённость матрицы Гессе, для этого напишем функцию проверки `is_pos_def`:

```
def is_pos_def(self, matrix_hesse):
    return np.all(np.linalg.eigvals(matrix_hesse) > 0)
```

Именно для метода Ньютона необходим метод `function_hesse`, приведённый ранее. Далее реализуем сам метод Ньютона, входные и вы-

ходные параметры такие же, как и у метода градиентного спуска, исключая импульс из входных параметров.

```
def newton(self,
            learning_rate: float,
            max_iterations: int,
            threshold: float,
            cords_copy: np.ndarray
            ) -> tuple[np.ndarray, np.ndarray]:
    w_history = cords_copy.copy()
    f_history = self.function(cords_copy)
    i, diff = 0, 1e10
    while i < max_iterations and diff > threshold:
        hesse = self.function_hesse(cords_copy)
        grad = self.function_derivative(cords_copy)
        if self.is_pos_def(hesse) and np.linalg.det(hesse) != 0:
            hesse_inverse = np.linalg.inv(hesse)
            cords_copy -= learning_rate * np.dot(hesse_inverse, grad)
        else:
            cords_copy -= learning_rate * grad
        w_history = np.vstack((w_history, cords_copy))
        f_history = np.vstack((f_history, self.function(cords_copy)))
        i += 1
        diff = self.calculate_diff(f_history[-1], f_history[-2])
    return w_history, f_history
```

СРАВНЕНИЕ НА ПРИМЕРЕ ФУНКЦИИ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Рассмотрим пример с непрерывной функцией двух переменных вида:

$$f(w_1, w_2) = w_1^2 + w_2^2. \quad (4)$$

Для градиентного спуска на каждой итерации w_1, w_2 обновляются по формуле (2), а для метода Ньютона по формуле (3). Чтобы сравнить два рассматриваемых метода оптимизации на примере функции (4), необходимо реализовать функцию создания поля `board`. Рассмотрим область от -10 до 10.

```
def init_graph():
    x = np.linspace(-10.0, 10.0, 100)
    y = np.linspace(-10.0, 10.0, 100)
    w1, w2 = np.meshgrid(x, y)
    pts = np.vstack((w1.flatten(), w2.flatten()))
    pts = pts.transpose()
    f_vals = np.sum(pts * pts, axis=1)
    return pts, f_vals
```

Необходимо объявить класс `Paraboloid`, наследуемый от класса `Graph`, для расчёта

значений функции (4), градиента и матрицы Гессе.

```

class Paraboloid(Graph):
    def __init__(self, board: tuple[np.ndarray, np.ndarray], params=None):
        super().__init__(board, params)

    def function(self, cords: np.ndarray):
        return np.sum(cords * cords)

    def function_derivative(self, cords: np.ndarray):
        return 2 * cords

    def function_hesse(self, cords: np.ndarray):
        return np.array(((2, 0), (0, 2)))

```

Далее реализуем класс ViewParaboloid для отображения поля и пути перемещения точки при различных параметрах.

Импульс для градиентного спуска выберем 0.5, скорость обучения будет меняться: 0.05, 0.3, 0.7 и 0.9.

```

class ViewParaboloid:
    def __init__(self):
        self.graph = Paraboloid(init_graph())

    def show(self):
        cords = self.graph.get_random_cords(-10, 10, 2)
        fig, _ = plt.subplots(nrows=4, ncols=4, figsize=(54, 54))
        learning_rates = [.05, .3, .7, .9]
        ind = 1
        for rate in learning_rates:
            plt.subplot(2, 4, ind)
            self.graph.draw_graph_on_board(self.graph.gradient_descent(
                learning_rate=rate,
                momentum=.5,
                max_iterations=100,
                threshold=1e-2,
                cords_copy=cords.copy())[0])
            plt.subplot(2, 4, ind+1)
            self.graph.draw_graph_on_board(self.graph.newton(
                learning_rate=rate,
                max_iterations=10,
                threshold=1e-2,
                cords_copy=cords.copy())[0])
            ind += 2
            plt.text(-39, 12, f'Градиент', fontsize=13)
            plt.text(-3, 12, f'Ньютон', fontsize=13)
            plt.text(-25, 15, f'Скорость = {rate}', fontsize=13)
        fig.subplots_adjust(hspace=.5, wspace=.3)
        plt.show()

```

На рис. 1 и 2 показано движение точки промежуточного минимума в процессе выполнения методов градиентного спуска и Ньютона на примере функции (4) с различными значениями скоростей. На рис. 1 видно, что при небольшом значении скорости обучения 0.05 ни один из методов не достиг глобального минимума, однако

градиентный спуск на основе импульса оказался ближе к оптимуму. Это связано с тем, что помимо скорости обучения он имеет импульс, который смещает точку к искомому значению. Начиная со значения скорости обучения в 0.3, градиентный спуск начинает «перепрыгивать» через

минимум, а метод Ньютона движется исключительно к искомому значению.

На рис. 2 видно, что метод Ньютона работает тем лучше, чем больше значение скорости обучения. Градиентный спуск на основе импульса при больших значениях

скорости обучения начинает часто пере-скакивать через искомую точку.

Рассмотрим, как импульс и скорость обучения влияют на найденное значение минимума. Используем те же значения скорости, что и выше, а также несколько значений импульсов: 0, 0.2 и 0.7. (см. рис. 3)

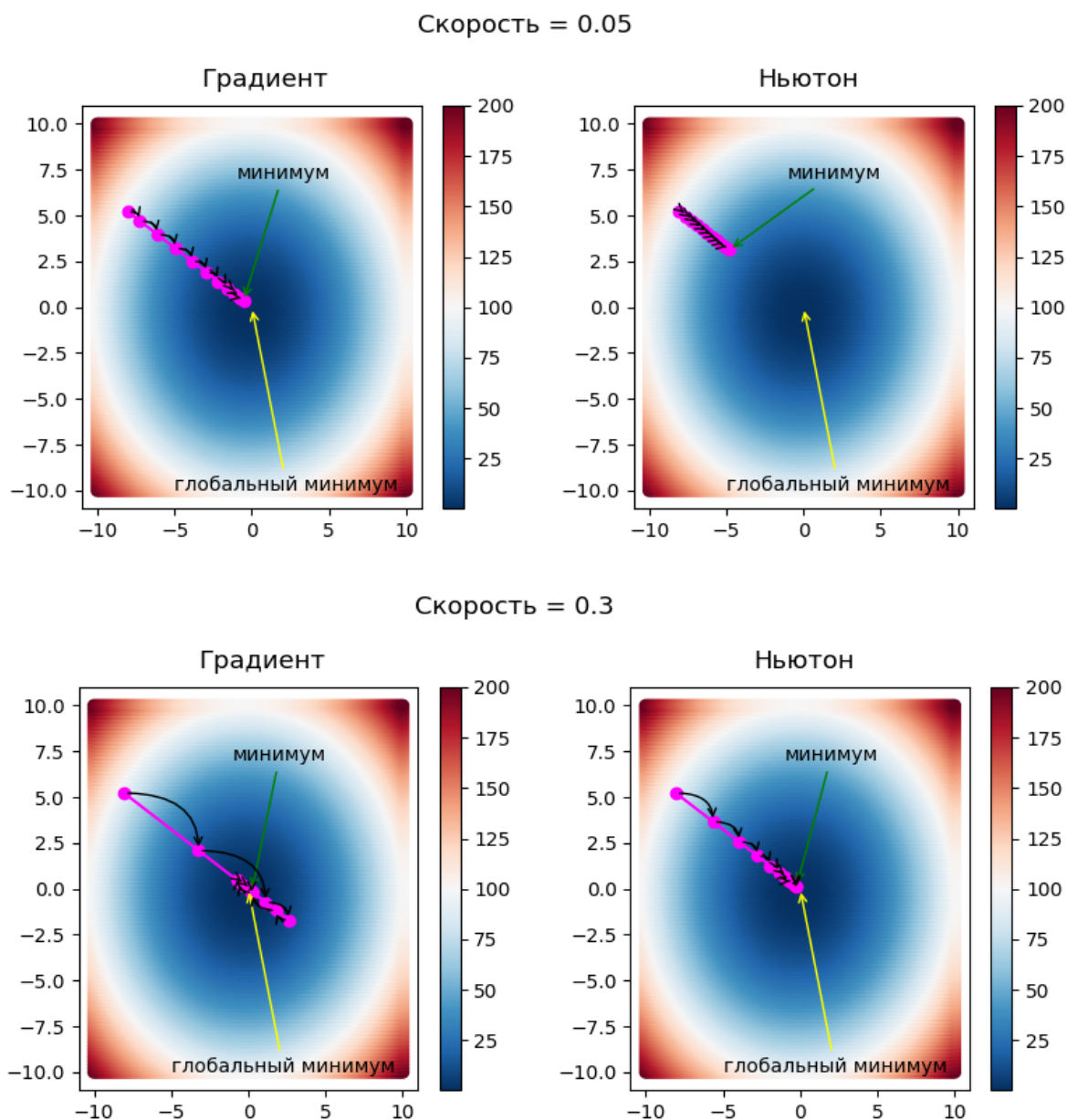


Рис. 1. Сравнение методов на примере функции (4) при скоростях 0.05 и 0.3
 Fig. 1. Comparison of methods using the example of function (4) at speeds 0.05 and 0.3

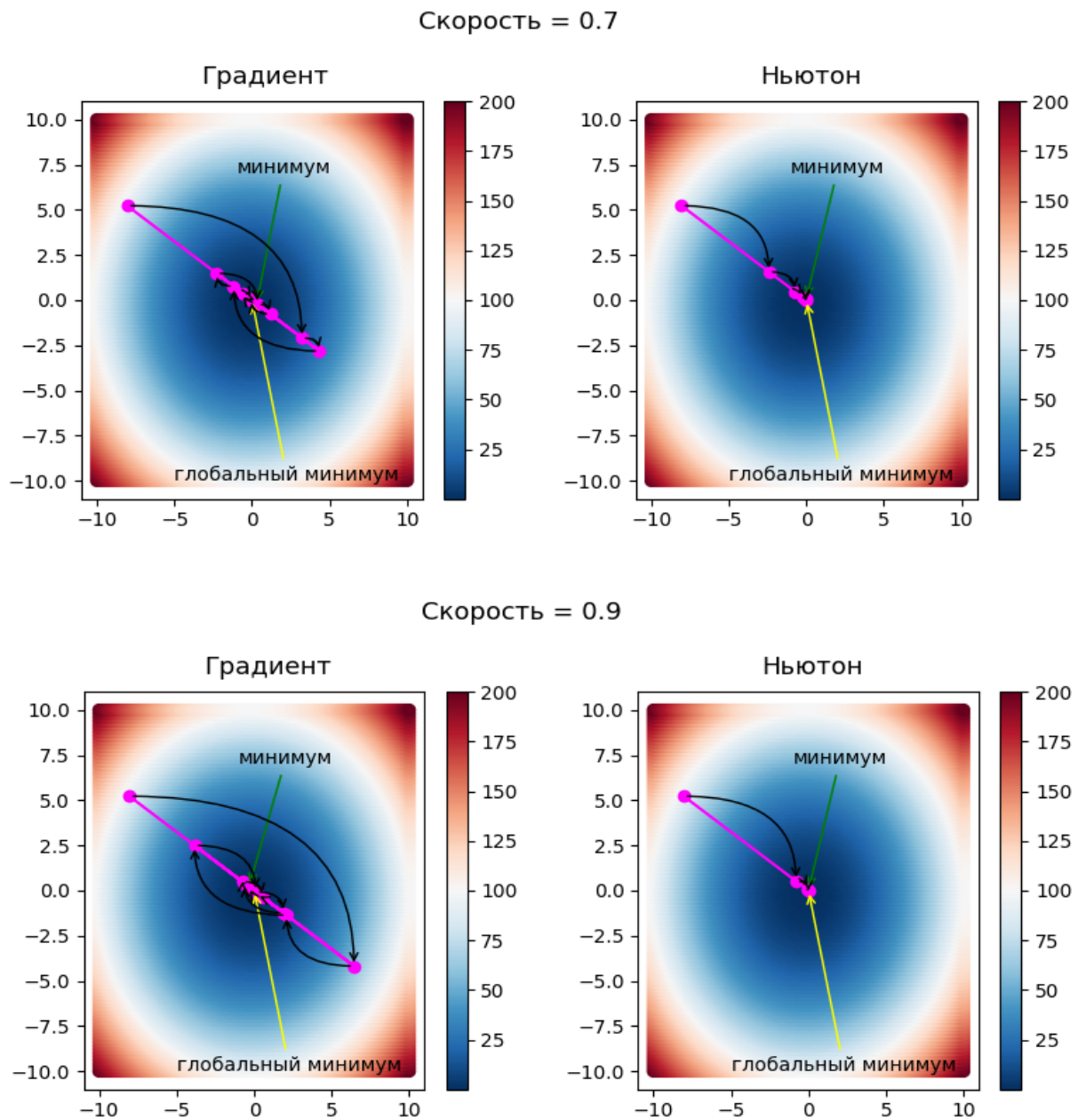


Рис. 2. Сравнение методов на примере функции (4) при скоростях 0.7 и 0.9
 Fig. 2. Comparison of methods using the example of function (4) at speeds 0.7 and 0.9

На рис. 3 рассмотрим график с импульсом 0 и скоростью обучения 0.05. Видно, что алгоритм не достиг глобального минимума за установленное количество шагов, однако при увеличении импульса найденный минимум находится ближе к глобальному. Также рассмотрим график с

импульсом 0.7 и скоростью обучения 0.9. Видно, что алгоритм совершает колебания, что не является оптимальным вариантом. Для рассмотренного примера оптимально использовать небольшое значение скорости обучения и среднее значение импульса.

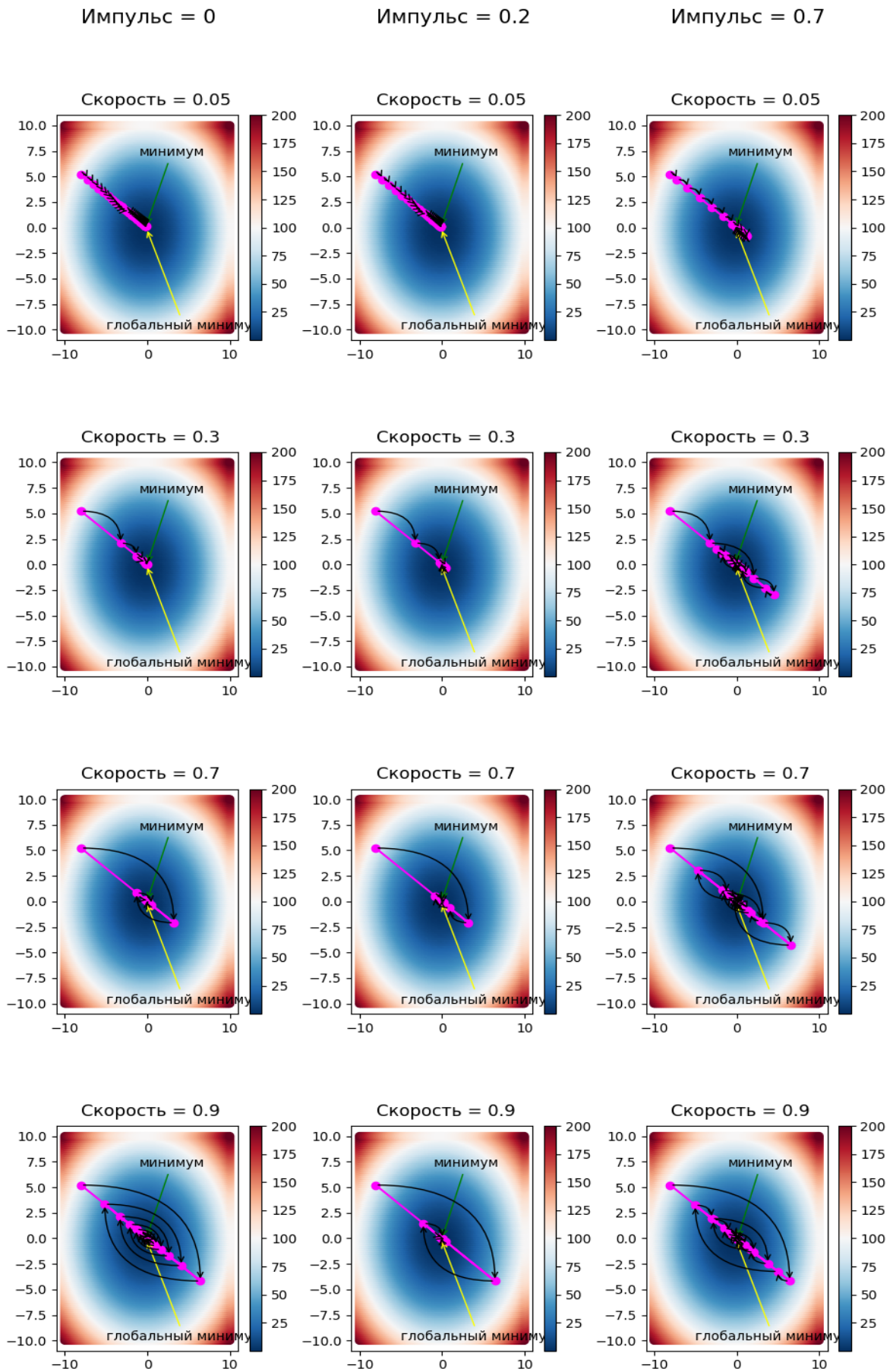


Рис. 3. Визуализация градиентного спуска с различными параметрами
 Fig. 3. Visualization of gradient descent with various parameters

СРАВНЕНИЕ НА ПРИМЕРЕ КОНТРОЛИРУЕМОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

Рассмотренные ранее методы часто применяют для минимизации среднеквадратической ошибки [9], например, в контролируемой классификации, в задаче регрессии, в окрестностном моделировании [10] и в других задачах.

Предположим, что дано m обучающих примеров, где каждый пример имеет n признаков, то есть задана выборка $[x_{ij}]$, где $i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$.

Если соответствующие целевое и выходное значения для каждого примера равны t_i и o_i соответственно, то функция среднеквадратической ошибки E определяется как:

$$E = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (t_i - o_i)^2. \quad (5)$$

В формуле (5) выход o_i определяется взвешенной линейной комбинацией входов, определяемой как:

$$o_i = w_1 x_{i1} + w_2 x_{i2} + \dots + w_n x_{in}.$$

Неизвестным параметром в приведенном выше уравнении является весовой вектор $w = [w_1, \dots, w_n]^T$.

Целевая функция в этом случае представляет собой среднеквадратическую ошибку с градиентом, координаты которого определяются выражением:

$$E'_{w_j}(w) = -\frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (t_i - o_i) x_{ij}.$$

Создадим класс MSE, унаследованный от Graph. Далее необходимо изменить метод `calculate_diff`, поскольку значение функции (5) является значением ошибки. Также необходимо написать методы вычисления значений функции (5), градиента и матрицы Гессе.

```
class MSE(Graph):
    def __init__(self, board: tuple[np.ndarray, np.ndarray], params=None):
        super().__init__(board, params)

    @staticmethod
    def calculate_diff(pred, pred_pred):
        return pred

    def function(self, cords: np.ndarray, temp_params = None):
        params = self.params if temp_params is None else temp_params
        o = np.sum(params[0] * cords, axis=1)
        mse = np.sum((params[1] - o) ** 2)
        return mse / params[1].size

    def function_derivative(self, cords: np.ndarray):
        rows, cols = self.params[0].shape
        zn = self.params[1] - np.sum(self.params[0] * cords, axis=1)
        diff = np.tile(zn.reshape((rows, 1)), (1, cols))
        grad = -2 * np.sum(diff * self.params[0], axis=0)
        return grad / self.params[1].size

    def function_hesse(self, cords: np.ndarray):
        hesse = 2 * np.sum(
            [np.outer(i, i) for i in self.params[0]], axis=0)
        return hesse / self.params[1].size
```

В качестве данных для визуализации и анализа воспользуемся набором рукописных цифр, включённых в открытую базу

данных `sklearn.datasets` [11]. База данных состоит из 360 примеров цифр 0 и 1, которые были разделены на 288 обучающих и

72 тестовых. Входные данные представлены в виде одномерных векторов из 64 значений яркости пикселя величиной от 0 до 16. Выходное значение – цифра нуль или единица. После предварительного анализа данных выяснилось, что на всех изображе-

ниях первый и последний столбцы имеют только нулевые элементы, которые не влияют на результат, следовательно можно их исключить. Для этого напишем функцию `alignment` и обработаем входные данные, получив 48 параметров, вместо 64.

```
@dataclass
class Data:
    x: np.ndarray
    y: np.ndarray

    def get(self):
        return self.x, self.y

class ViewMSE:
    def __init__(self):
        self.graph = MSE(tuple())
        digits, target = dt.load_digits(n_class=2, return_X_y=True)

        x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(
            digits, target, test_size=0.2, random_state=10
        )
        x_train = self.alignment(x_train)
        x_test = self.alignment(x_test)
        self.train = Data(x_train, y_train)
        self.test = Data(x_test, y_test)

    @staticmethod
    def alignment(data: np.ndarray):
        del_index = list(range(0, 64, 8)) + list(range(7, 64, 8))
        data = np.array([np.delete(i, del_index) for i in data])
        return data
```

Отообразим первые 10 примеров обучающей выборки (см. рис. 4). Массив из 48 значений яркости пикселей является изображением размера 8 на 6, которое выглядит как рукописная цифра. Ниже пред-

ставлен метод отображения 10-и первых примеров.

Вызовем данный метод для обучающих элементов, результатом будет последовательность рукописных цифр (см. рис. 4).

```
def show_numbers(self, data):
    _, ax = plt.subplots(
        nrows=1, ncols=10, figsize=(12, 4),
        subplot_kw={"xticks": [], "yticks": []}
    )
    for i in np.arange(10):
        ax[i].imshow(data[i].reshape(8, 6))
```

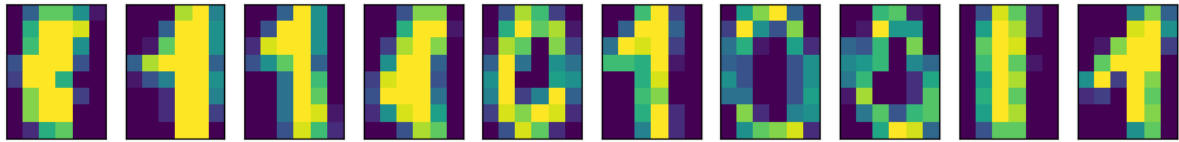


Рис. 4. Рукописные цифры
Fig. 4. Handwritten numbers

Далее рассмотрим работу метода градиентного спуска и метода Ньютона для функции (5). Максимальное количество итераций равно 100, критерием останковки является значение ошибки 0.01, что составляет 1%. Стартовые значения параметров w

для обоих методов одинаковы. Для градиентного спуска скорость изменяется от 10^{-8} до 10^{-5} включительно, для метода Ньютона – от 10^{-4} до 10^{-1} включительно. Ниже представлен метод отрисовки `show` в классе `ViewMSE`:

```
def show(self):
    cords_copy = self.graph.get_random_cords(
        -1, 1, self.train.x.shape[1]
    ) * 1e-6
    _, ax = plt.subplot_mosaic([
        [0, 1, 2, 3], [4, 5, 6, 7], [8, 9, 10, 11], [12, 13, 14, 15]
    ])
    self.graph.params = self.train.get()
    for ind_grad, rate_grad in enumerate(range(-8, -4)):
        for ind_newton, rate_newton in enumerate(range(-5, -1)):
            ax[ind_grad * 4 + ind_newton].clear()
            cords_grad, f_grad = self.graph.gradient_descent(
                learning_rate=10 ** rate_grad,
                momentum=0.7,
                max_iterations=100,
                threshold=0.01,
                cords_copy=cords_copy.copy()
            )
            self.graph.draw_graph_on_ax(
                ax[ind_grad * 4 + ind_newton],
                (cords_grad, f_grad),
                'green',
                'Градиент'
            )
            cords_newton, f_newton = self.graph.newton(
                learning_rate=10 ** rate_newton,
                max_iterations=100,
                threshold=0.01,
                cords_copy=cords_copy.copy()
            )
            self.graph.draw_graph_on_ax(
                ax[ind_grad * 4 + ind_newton],
                (cords_newton, f_newton),
                'red',
                'Ньютон'
            )
            ax[ind_grad * 4 + ind_newton].set_title(
                f'Град = {rate_grad} Ньют = {rate_newton}')
            ax[ind_grad * 4 + ind_newton].legend()
            ax[ind_grad * 4 + ind_newton].set_xticklabels([])
    plt.show()
```

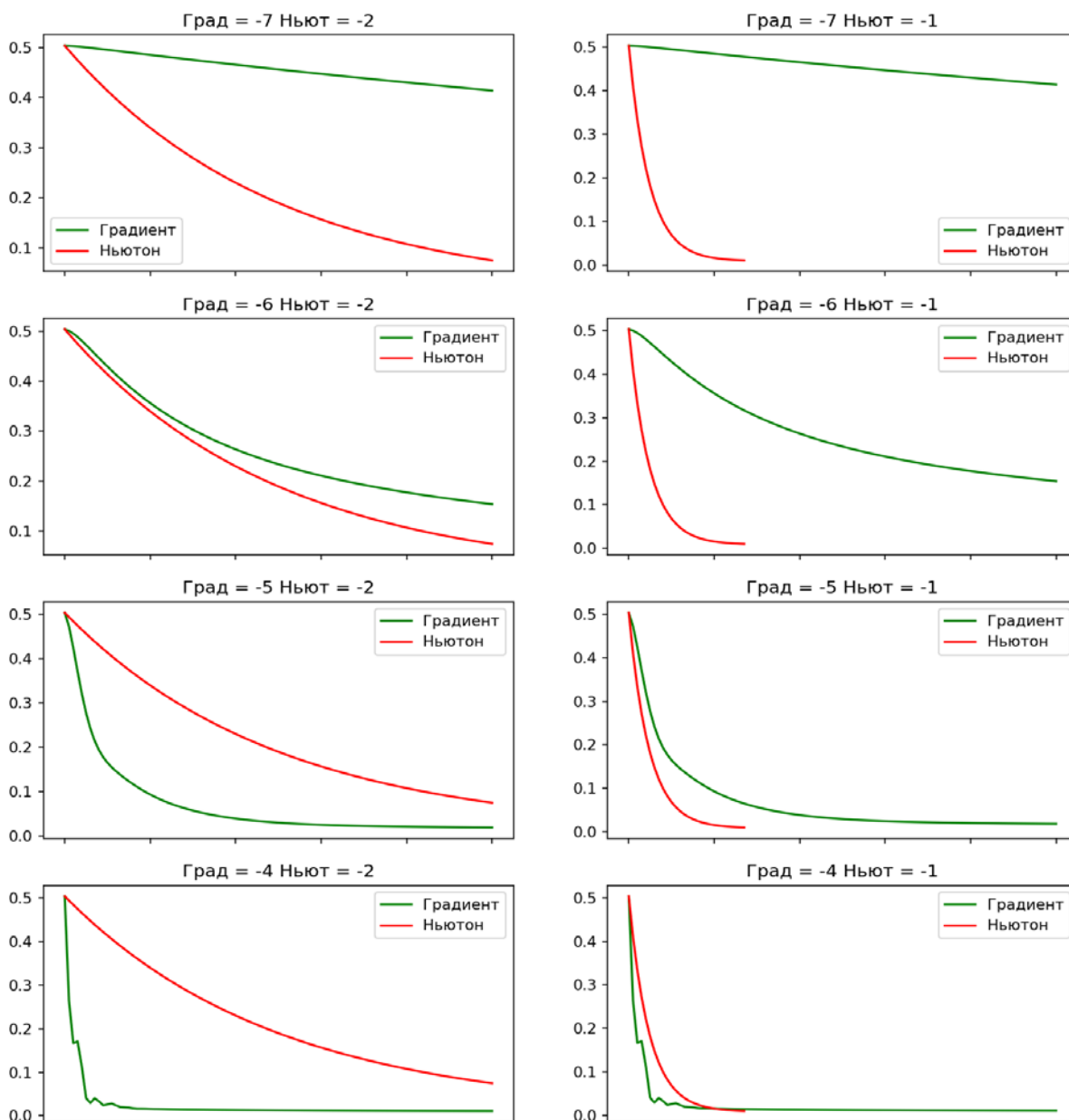


Рис. 5. Сравнение методов на примере контролируемой классификации
 Fig. 5. Comparison of methods on the example of controlled classification

Рассмотрим графики изменения значения ошибки в процессе работы алгоритмов оптимизации (см. рис. 5). На рис. 5 введены следующие обозначения: Град = a соответствует скорости обучения 10^a .

В приведенном примере оптимальное значение скорости обучения для градиентного спуска является 10^{-4} , для метода Ньютона – 10^{-1} . При уменьшении скорости для метода Ньютона до 10^{-3} ошибка увеличивается, при увеличении скорости для гради-

ентного спуска до 10^{-3} ошибка также увеличивается.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе были рассмотрены методы градиентного спуска на основе импульса и Ньютона в задачах нахождения минимума непрерывной функции и минимизации среднеквадратической ошибки в контролируемой классификации. Данные методы реализованы с использованием язы-

ка программирования Python. В работе было проведено сравнение этих алгоритмов, а также проанализирована зависимость результатов от параметров методов оптимизации. Анализируемыми параметрами являются скорость обучения и импульс. В ходе анализа выяснилось, что незначительное изменение параметров метода оптимизации значительно влияет на результат. Оптимальные значения скорости обучения и импульса зависят от вида минимизируемой функции. Для метода градиентного спуска небольшое значение скорости обучения и среднее значение импульса даёт лучший результат. Для метода Ньютона скорость обучения значительно выше, чем для градиентного спуска, что и было подтверждено в ходе анализа функции (4), а также в минимизации среднеквадратической ошибки (5) в задаче классификации. Результаты работы можно использовать при решении задач регрессионного анализа, в окрестностном моделировании, при обучении нейронных сетей. Разработанная программа позволяет с помощью варьирования параметров выбрать наиболее эффективный метод оптимизации в каждой конкретной задаче. С программной реализацией можно ознакомиться по ссылке [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калиткин Н.Н., Альшина Е.А. Численные методы: численный анализ. – Москва: Академия. – 2013. – С. 304.
2. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – Москва: ДМК Пресс, – 2018. – С. 652.
3. Седых И. А. Модели окрестностей холодной прокатки с нечеткой иерархической структурой // Журнал химической технологии и металлургии. – 2020. – Vol. 55. No 3. – P. 676-680.
4. Гасников А. В. Современные численные методы оптимизации: метод универсального градиентного спуска. Москва: МФТИ, – 2018. – С. 286.
5. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс] / Главный редактор: Кравец С. Л. Москва : БРЭ 2005–2022. URL:

<https://bigenc.ru/physics/text/2696871>. (дата обращения: 10.07.22)

6. Захарченков К. В., Мрочек Т. В. Методы оптимизации: учебно-методическое издание. Могилев: Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет», – 2018. – С. 44.
7. Уэс Маккинни Python для анализа данных. Северное шоссе Гравенштейн, Севастополь: O'Reilly Media, – 2013. – С. 470.
8. Абдрахманов М.И. Devpractice Team. Библиотека Matplotlib. devpractice.ru, – 2019. – С. 100.
9. Кашьяп Р.Л., Пао А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. Москва: Наука, – 1983. – С. 384.
10. Седых И.А. Идентификация линейных динамических окрестностных моделей с нечеткой иерархической структурой // Вестник Воронежского государственного технического университета. Том 15, №4, – 2019. – С. 7-13.
11. Scikit-learn Машинное обучение на Python [Электронный ресурс] INRIA 2011–2022. URL: <https://scikit-learn.org/stable/>. (дата обращения: 22.05.22)
12. GitHub [Электронный ресурс] Microsoft 2008–2022. URL: https://github.com/MR-Geri/gradient_descent/. (дата обращения: 19.07.22)

REFERENCES

1. Kalitkin N.N., Alshina E.A. Numerical methods: numerical analysis. – Moscow: Academy. - 2013. – P. 304.
2. Goodfellow Ya., Benjio I., Courville A. Deep learning / trans. from ang. A. A. Slinkin. – 2nd ed., edit – Moscow: DМК Press, - 2018. – P. 652.
3. Sedykh, I. A. Cold rolling neighborhood models with a fuzzy hierarchical structure //Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. – Vol. 55. No 3. – P. 676-680.
4. Gasnikov A.V. Modern numerical optimization methods: the method of universal gra-

dient descent. Moscow: МИПТ, - 2018. – P. 286.

5. The Great Russian Encyclopedia [Electronic resource] / Editor-in-Chief: Kravets S. L. Moscow : BRE 2005-2022. URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2696871> . (accessed: 10.07.22)

6. Zakharchenkov K. V., Mrochek T. V. Optimization methods: educational and methodical edition. Mogilev: State Institution of Higher Professional Education "Belarusian-Russian University", – 2018. – P. 44.

7. Wes McKinney Python for Data Analysis. Gravenstein Highway North, Sebastopol: O'Reilly Media, - 2013. – P. 470.

8. Abdrakhmanov M.I. Devpractice Team. The Matplotlib library. devpractice.ru , – 2019. – P. 100.

9. Kashyap R.L., Rao A.R. Construction of dynamic stochastic models based on experimental data. Moscow: Nauka, - 1983. – P. 384.

10. Sedykh I.A. Identification of linear dynamic neighborhood models with fuzzy hierarchical structure // Bulletin of the Voronezh State Technical University. Volume 15, No. 4, – 2019. – P. 7-13.

11. Scikit-learn Machine Learning in Python [Electronic resource] INRIA 2011-2022. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> . (accessed: 22.05.22)

12. GitHub [Electronic resource] Microsoft 2008-2022. URL: https://github.com/MRGeri/gradient_descent/ . (accessed: 07.19.12)

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Ю.А. Секретарев, А.А. Горшунов, Д.А. Меняйкин Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности.....	3
В.И. Зацепина, А.Е. Кудрявцев Гибридная микросеть переменного и постоянного тока на основе фотоэлектрических источников питания и аккумуляторных батарей.....	15
Г.И. Кольниченко, Я.В. Тарлаков, М.С. Усачев Метод электрического расчета систем электроснабжения и алгоритмы его реализации	24
И.Д. Моргоев Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в процессе оперативного выявления безучетного потребления электроэнергии в электросетях	33
О.А. Гаврина, И.В. Маскуров, Э.С. Джидзалова, А.И. Тилов Анализ устойчивости асинхронного двигателя газодувки на предприятиях цветной металлургии	46

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИКА

И.А. Седых, И.Д. Камкин Реализация и сравнение методов градиентного спуска и Ньютона на python.....	60
---	----

CONTENTS

ELECTRIC POWER INDUSTRY

- Yu.A. Sekretarev, A.A. Gorshunov, D.A. Menyakin** Modeling of the technical condition of an equipment of power supply systems of mono consumers taking into account circuit reliability..... 3
- V.I. Zatsepina, A.E. Kudryavtsev** Hybrid AC and DC microgrid based on photovoltaic power sources and rechargeable batteries.....15
- G.I. Kol'nichenko, Ya.V. Tarlakov, M.S. Usachev** Method of electrical calculation of power supply systems and algorithms of its implementation24
- I.D. Morgoev** The algorithm for intellectual support for management decision-making in the process of operational detection of non-technical electricity losses in electric networks33
- O.A. Gavrina, I.V. Maskurov, E.S. Dzhidzalova, A.I. Tilov** Analysis of the stability of the asynchronous gas blower motor at non-ferrous metallurgy enterprises 46

AUTOMATION AND INFORMATICS

- I.A. Sedykh, I.D. Kamkin** Implementation and comparison of gradient descent and Newton methods in python.....60

Chief Editor

Shpiganovich Alexander Nikolaevich – D.Sc. (Tech.), Prof.

Deputy Chief Editor

Zatsepina Violetta Iosifovna – D.Sc. (Tech.), Prof.

Executive Secretary

Shachnev Oleg Yaroslavovich – Cand.Sc. (Tech.), Associate Prof.

Members of the Editorial Council:

- Saraev Pavel Viktorovich, D.Sc. (Tech.), Associate Prof. (Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk)
- Pogodaev Anatoly Kiryanovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk)
- Byaly Vitold, D.Sc. (Tech.), Prof. (Silesian Technical University, Poland, Gliwice)
- Voltchev Stanimir, D.Sc. (Tech.), Prof. (University of Lisbon, Portugal, Lisbon)
- Ruomei Li, D.Sc. (Tech.), Prof. (Chinese Society of Electrical Engineering, China)
- Krasnyansky Mikhail Nikolaevich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Tambov State Technical University, Russia, Tambov)
- Lucas Vilmar Adolfovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Berlin Technical University, Germany, Berlin)
- Naizabekov Abdrakhman Batyrbekovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, Rudny)
- Sukhinin Boris Vladimirovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Tula State University, Russia, Tula)
- Timoshin Sergey Ivanovich, D.Sc. (Phys.-Mat.), Prof. (Gomel State Technical University, Belarus, Gomel)
- Troyanovska Malgorzata, D.Sc. (Tech.), Prof. (Agrarian University, Poland, Krakow)
- Morkun Vladimir Stanislavovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Krivoy Rog national university, Ukraine, Krivoy Rog)
- Reza Derakhshani, D.Sc. (Philos.), (University of Utrecht, Netherlands, Utrecht)

Editorial board of the issue:

Electric power industry

- Chernyshova T.I., D.Sc. (Tech.), Prof. (Tambov State Technical University, Russia, Tambov)
- Kachanov A.N., D.Sc. (Tech.), Prof. (Orel State University, Russia, Orel)
- Shevyrev Yu.V., D.Sc. (Tech.), Prof. (National Research Technological University MISiS, Russia, Moscow)
- Gracheva E.I., D.Sc. (Tech.), Prof. (Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan)

Automation and informatics

- Klyev R.V., D.Sc. (Tech.), Prof. (North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz)
- Kalinin V.F., D.Sc. (Tech.), Prof. (Tambov State Technical University, Russia, Tambov)

СПРАВКА

(предоставляется в редакцию каждым автором/соавтором статьи)

В соответствии с Законом Российской Федерации об авторских правах сообщаю, что я, _____, автор (соавтор) статьи _____

уведомлен об ответственности за использование в статье таких материалов, защищенных авторским правом, как цитаты, воспроизведенные данные, иллюстрации и иные материалы, и о том, что ответственность за нарушение авторских прав ложится на автора статьи.

Я сообщаю, что данная статья не была опубликована и не представлена для публикации в другие периодические издания.

Число

Подпись

Корректор

И.Н. Маликова

Дата выхода в свет 23.12.2022. Подписано в печать 19.12.2022. Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 9,1. Уч.-изд. л. 9,7. Тираж 500 экз. Заказ № 753.
Свободная цена.

Выписка из реестра зарегистрированных средств массовой информации: серия ПИ № ФС77-82295 от 10 ноября 2021 г. Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции: 398055, Липецк, ул. Московская, д. 30, каб. 210.

Адрес Издательства: 398055, Липецк, ул. Московская, д. 30.

Липецкий государственный технический университет.

Телефоны: (4742) 32–80–48; 32–80–49. Факс: (4742)32–80–48. E-mail: kaf- eo@stu.lipetsk.ru

Учредитель: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Отпечатано в полиграфическом подразделении Издательства ЛГТУ.

398055, Липецк, ул. Московская, д. 30.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале "Вести высших учебных заведений Черноземья" публикуются статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим рубрикам:

- Электроэнергетика;
- Автоматизация и информатика.

Статья должна поступить на электронные адреса kaf-eo@stu.lipetsk.ru и vestiVUZOV@yandex.ru (сразу на два адреса) и сохранена в версии Microsoft Word 2003 и выше. Рукопись статьи (2 экземпляра) и сопроводительные документы должны быть высланы в редакцию. К сопроводительным документам относятся:

- рецензия, отражающая следующие пункты: актуальность представленной работы; характеристика объекта исследования; качество постановки целей работы и задач исследования; степень научной новизны исследования, практическая значимость работы; учебно-методическая ценность исследования, стиль изложения; степень разработанности темы научного исследования; структурность работы. (В случае если один из авторов является доктором наук, то рецензия должна быть подписана доктором соответствующего профиля.)

- выписка из протокола заседания кафедры, на котором было принято решение о рекомендации публикации статьи в журнал "Вести высших учебных заведений Черноземья".

- согласие на публикацию и гарантии того, что статья не будет больше нигде опубликована, подписанные автором.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

1. На первой странице должны быть указаны: УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, название учреждения, представляющего рукопись для опубликования. Статья должна быть четко структурирована: введение; теория вопроса; подробное изложение методики проведения экспериментов, описание материалов и методов исследований, желательна статистическая обработка; обсуждение результатов; заключение.

2. Текст статьи набирается в формате *.doc шрифтом TimesNewRoman размером 12 pt через одинарный интервал, без отступов, отступ красной строки 0,5 см, выравнивание по ширине, без уплотнения. Поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2 см. Не использовать табуляций, автоматических списков. Не использовать курсив, жирный текст и подчеркивания. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела.

3. Для набора формул применять редактор MathType 7. Формулы должны быть оформлены шрифтом TimesNewRoman, без курсива, размером 12 pt, одинарным интервалом; если обозначения в тексте выполнены в MathType, то они также изначально должны быть 12 pt. При верстке журнала формулы должны помещаться на половине страницы (8 см). Большие формулы необходимо разбивать на отдельные части. Фрагменты формул должны быть независимы (при использовании редактора формул каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

4. Рисунки должны быть сохранены в программе MicrosoftVisio и иметь возможность редактирования. Надписи – шрифтом TimesNewRoman, размером 12 pt, одинарным интервалом. Толщина линий: основных – 1 pt, вспомогательных – 0,5 pt. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG, GIF. Сканировать изображение следует с разрешением не менее 300 dpi. В случае если в тексте есть ссылка на рисунок, то пишется слово "рис.", переносы в названиях недопустимы.

5. Таблицы должны быть оформлены шрифтом TimesNewRoman, размером 12 pt, одинарным интервалом. В случае если в тексте есть ссылка на таблицу, то пишется слово "табл.". Подрисовочные подписи и названия таблиц должны быть на русском и английском языках.

6. Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи. Список составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Библиографический список должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008 и иметь не менее 15 источников (из них не более 20 % – на собственные работы), с обязательным включением источников позднее 2015 г. и не менее 30 % ссылок на зарубежные работы (из стран дальнего зарубежья, за пределами бывшего СССР). Ссылки на библиографический список в тексте приводятся в квадратных скобках. Название источника публикации, а также технические сокращения (выпуск, том, страница и т.п.) должны быть переведены на английский язык с использованием общепринятых обозначений. При использовании электронных ресурсов необходимо ссылаться на первоисточник и указывать дату обращения.

7. Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТ. Физические единицы и обозначения необходимо давать в Международной системе единиц СИ.

8. К статье прилагаются: аннотация; ключевые слова (не менее 7 наименований); имена и фамилии авторов, ученые степени и звания, должности и почтовые адреса, места работы, электронные адреса; отдельным файлом на английском языке название статьи, аннотация, ключевые слова, имена и фамилии авторов, ученые степени и звания, должности и почтовые адреса, места работы, электронные адреса, библиографический список. Аннотация к статье должна достаточно полно раскрывать ее содержание и иметь объем до 500 печатных знаков (аннотация выполняется согласно ГОСТ 7.9-95). Аннотация должна быть переведена на английский язык.