

УДК 621.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_2_53

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОЙ
РАЗГРУЗКИ ЦИФОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6-10(20)/0,4 кВ****А.С. Панкова**

ПАО «ТНС Энерго НН»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0002-4624-3855 demidova.anya@mail.ru

О.А. Пронина

АО «Атомэнергoproject»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0001-8572-8356 olgapronina11@gmail.com

К.Е. Чумарин

ООО «Газпром проектирование»

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0002-9680-1990 ingenum16@gmail.com

Д.С. Огнев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0003-2608-6407 dima.ognef@yandex.ru

Описаны подходы к построению цифровых интеллектуальных сетей. Рассмотрена проблема недогруженности силовых трансформаторов, функционирующих в системе электроснабжения городов. Приведена структура цифровой подстанции, как одно из направлений развития цифровизации. Представлен алгоритм системы длительной автоматической разгрузки по току, реализующий свою работу в цифровых энергосистемах. Алгоритм позволяет определять по заданным условиям максимальные и аварийные допустимые значения переменного тока в распределительной сети, а также прогнозировать пропускную способность сечений в линиях электропередач.

Ключевые слова: алгоритм, токовая разгрузка, интеллектуальные энергосистемы, цифровая подстанция, цифровизация.

Для цитирования: Панкова А.С., Пронина О.А., Чумарин К.Е., Огнев Д.С. Алгоритмизация процесса автоматической разгрузки цифровых подстанций 6-10(20)/0,4 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 53-65.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_53

ALGORITHMIZATION OF PROCESS OF LONG-TERM AUTOMATIC UNLOADING OF 6-10(20)/0,4 kV DIGITAL SUBSTATIONS

A.S. Pankova

PJSC «TNS energo NN»

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-4624-3855 demidova.anya@mail.ru

O.A. Pronina

JSC «Atomenergoproekt»

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0001-8572-8356 olgapronina11@gmail.com

K.E. Chumarin

JSC «Cazprom proektirovanie»

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-9680-1990 ingenum16@gmail.com

D.S. Ognev

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0003-2608-6407 dima.ognef@yandex.ru

Abstract. The article describes approaches to building digital smart grids. The problem of underloading of power transformers operating in the power supply system of cities is considered. The structure of a digital substation is given as one of the directions for the development of digitalization. An algorithm of the system of long-term automatic unloading by current is presented, which realizes its work in digital power systems. The algorithm makes it possible to determine, according to the given conditions, the maximum and emergency permissible values of alternating current in the distribution network, as well as to predict the throughput of cross-sections in power lines.

Keywords: algorithm, current unloading, smart grids, digital substation, digitalization.

For citation: A.S. Pankova, O.A. Pronina, K.E. Chumarin and D.S. Ognev, “Algorithmization of process of long-term automatic unloading of 6-10(20)/0.4 kV digital substations”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 53-65, 2021.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_53

1. Введение

Темпы развития городов растут с каждым годом. Основные отрасли промышленности, определяющие прогресс производства, постоянно модифицируются. Основой этих процессов является энергетика. Независимо от того, что создаются запасы мощностей на источниках генерации и трансформаторных подстанциях (ТП) высокого напряжения (ВН), имеют место трудности для подключения потребителей из-за отсутствия резерва мощности ТП, что является отражением дисбалансов в вопросах развития сетей разных классов напряжения. Во многом подобная схема планирования развития электроэнергетики связана с ориентиром на улучшение и модернизацию сетей ВН.

При этом расчетные электрические нагрузки, используемые для проектирования систем электроснабжения низкого и среднего напряжения (НН и СН), в настоящий момент завышены в 1,5-2,5 раза относительно фактических [1]. Это стало результатом прогнозирования, который предполагал рост расхода потребления электроэнергии населением за счет увеличения количества бытовых электрических приборов, улучшающих качество жизни людей.

Построенные кабельные сети и ТП 0,4/10 кВ по факту оказываются недогруженными. Достаточно большое количество ТП работают в режиме максимальной загрузки в течение года менее 30 %, а из них порядка 40-50 % ТП работают с максимальной загрузкой в течение года менее 15 % [1]. В крупных городах загрузка ТП выше, 66 % и 83 % ТП загружены до 50 % (рис. 1). Это свидетельствует о повышенных потерях в силовых трансформаторах относительно силовых трансформаторов, работающих с загрузкой в 70 %; о неэффективном использовании инвестиций; завышенной стоимости коммерческих и жилых помещений; завышенной стоимости технологического присоединения к электрическим сетям; увеличенных сроков строительства распределительных сетей.

Возникают проблемы электроснабжения в данных городах, связанных с постоянным увеличением нагрузок. В существующих электрических сетях образуется дефицит сетевых мощностей. При этом плотность застройки городов очень велика, что приводит к невозможности строительства новых ТП. Таким образом складывается парадоксальная ситуация: большая часть силовых трансформаторов недогружена, поскольку ТП по документам загружены полностью, что приводит к появлению «запертой электрической мощности». В итоге возведение новых ТП крайне затруднительно, а потребность в новых мощностях растет.

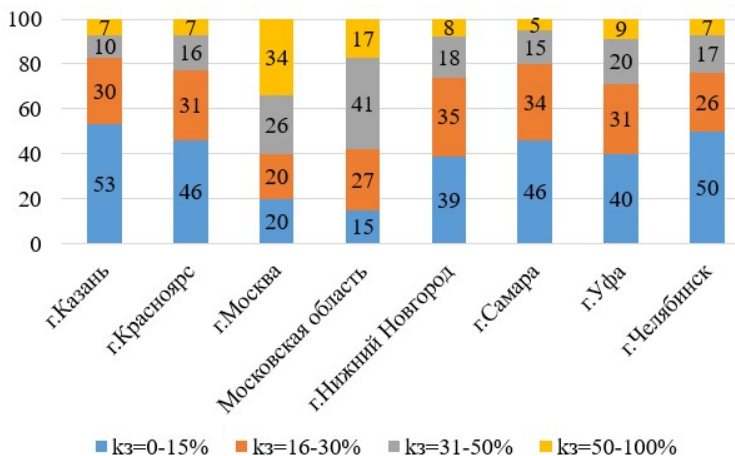


Рис. 1. Загрузка трансформаторных подстанций 0,4/10 кВ
Fig. 1. Loading transformer substations 0,4/10 kV

Появляется необходимость в усовершенствовании элементов городской электрической сети и создании алгоритмов управления распределительными сетями.

II. Цифровая трансформация энергии

Цифровая подстанция является элементом цифровизации электроэнергетического комплекса. Она отвечает требованиям стандарта МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях». Это международный стандарт, регулирующий системы связи, диспетчерское управление и сбор данных (*SCADA* системы) и системы автоматизации на подстанциях [2].

Цифровая подстанция реализована с использованием элементов и компонентов (рис. 2). Хотя данная схема не является единственным способом реализации цифровой подстанции, она представляет собой один из наиболее распространенных подходов [3].

Применяя различные элементы, необходимые для подстанции (автоматические выключатели, реле защиты, *CTS* и *VTs* и т.д.), и соединяя их с помощью оптического волокна, физическая реализация подстанции становится проще, в то же время повышается ее надежность и ясность. По сравнению с традиционной подстанцией, где все соединено сотнями отдельных медных кабелей, преимущества становятся очевидными.

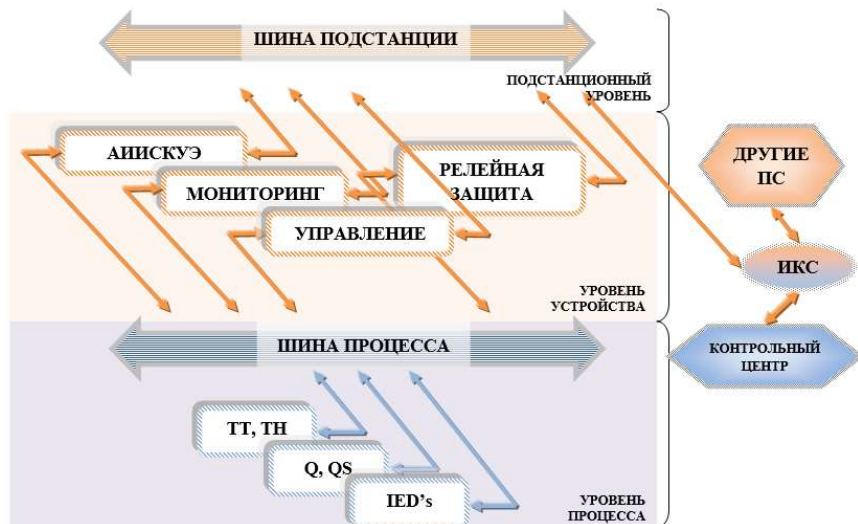


Рис. 2. Принцип построения ЦПС
 Fig. 2. The principle of building a digital substation

Цифровые подстанции состоят из нескольких ключевых компонентов и элементов.

Первичные устройства подстанции (реле защиты, трансформаторы тока и др.) реализуются в виде интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ). Эти устройства могут взаимодействовать друг с другом (и управлять подстанцией более высокого уровня) через оптическую сеть.

Сеть цифровой подстанции работает по протоколу *Ethernet*. В рамках этой структуры традиционные цифровые сигналы передаются с использованием *GOOSE*-сообщений (*Generic Object-Oriented Substation Event*). Протокол *GOOSE* – это специфическое форматирование данных, которое позволяет передавать сигналы состояния защиты в течение периода времени менее 4 мс. Это необходимо для обеспечения надежной и своевременной работы взаимосвязанных ИЭУ.

Коммуникационные шины (станционная и шина процесса) позволяют обмениваться сигналами между ИЭУ уровня присоединений и уровнем управления станций (станционная шина) и ИЭУ уровня процесса – системным оборудованием, устройствами и преобразователями (шина процесса).

Системы станционных и шин процесса обычно реализуются с использованием коммутаторов *Ethernet* (внешних или встроенных в ИЭУ), объединенных вместе кольцевой конфигурацией.

Измерительные блоки собирают сигналы для различных элементов оборудования и преобразователей. Эти сигналы затем передаются по шине процесса на другие устройства. Измерительный блок — это интерфейс между традиционными аналоговыми сигналами и контроллерами уровня присоединений и защитными реле.

Развитие систем передачи и распределения электрической энергии, внедрение возобновляемых источников в существующие сети, создание нового оборудования привели к существенному изменению характеристик и усложнению алгоритмов управления системами электроснабжения [4].

Необходимым условием для реализации работы цифровых подстанций является создание архитектуры управления цифровыми подстанциями и разработка адаптивных алгоритмов управления режимом распределительной сети и на базе стандарта серии МЭК 61850.

III. Способы разгрузки существующей распределительной сети

Рассмотрим участок городской распределительной сети (рис. 3), которая имеет два центра питания, секционный выключатель, измерительные органы и нагрузку. Данный участок сети условно можно разделить на три части – три ТП. Если на одном из участков сети происходит перегрузка, а другой участок сети недогружен, то необходимо произвести перераспределение мощности. В целом существуют приоритеты в рамках, которых возможно производить переключения в схеме.

Первый способ – включение секционного выключателя $QF3$. Нагрузка разделена между двумя секциями шин для обеспечения резерва. Секционный выключатель в нормальном состоянии разомкнут. Работают оба фидера. В случае перегрузки работы одного из питающих фидеров (нарушение электроснабжения) осуществляется переключение питания на секционный выключатель (резервную секцию). Автоматический выключатель, выполнявший ранее роль питающего фидера, размыкается, и замыкается секционный выключатель. После этого обе секции питаются от одного фидера.

Второй способ – включение выключателя $QF4$, соединяющего ТП-3 с соседней ТП-1. Данное переключение возможно, когда $U_1' > U_1$, что говорит о том, что ТП-1 является недогруженной и существует возможность разгрузить ТП-3.

Третий способ – включение выключателя $QF15$, соединяющего ТП-3 с соседней ТП-2. Данное переключение возможно, когда $U_2' > U_2$, что говорит о том, что ТП-2 является недогруженной и существует возможность разгрузить ТП-3.

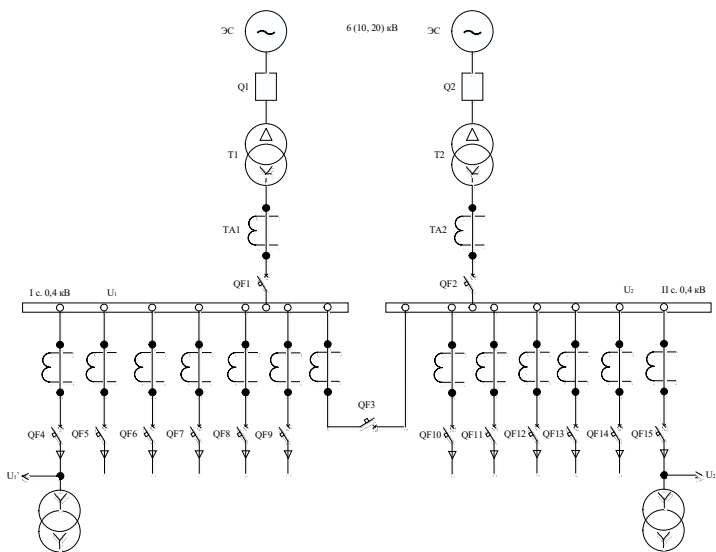


Рис. 3. Схема распределительной сети 6-10(20)/0,4 кВ

Fig. 3. Distribution network scheme 6-10(20)/0,4 kV

Четвертый способ – разгрузка шин подстанции с помощью алгоритма управления. Алгоритм прописывается в программном обеспечении устройства, который в режиме реального времени собирает информацию о состоянии сети. В момент возможного нарушения работы системы происходит разгрузка сети и необходимое переключение.

IV. Адаптивный алгоритм работы системы длительной автоматической разгрузки по току

Для решения режимных задач в энергосистемах необходимо определить пропускную способность электрических сетей. Допустимые перетоки мощности определяются по наиболее неблагоприятным режимам, рассчитанным ранее традиционными методами. Использование данной схемы расчетов приводит к ограничению потоков мощности и является узким местом для роста экономических показателей работы энергосетевого комплекса.

Большое количество возможных схемно-режимных ситуаций и неопределенностей разного характера (например, человеческий фактор) не позволяет заранее предусмотреть в алгоритме управления все возможные сценарии развития аварийных ситуаций, поэтому возникает необходимость создания адаптивных алгоритмов управления режимом распределительной сети, в основе которого расчет условий происходит в режиме реального времени.

Создание активно-адаптивного алгоритма позволит определять из исходных условий состояния сети в настоящий момент времени максимальные и аварийные допустимые токовые нагрузки в опасных сечениях, прогнозировать и определять «узкие места» сети [5]. Прогнозирование возможных аварийных ситуаций сети достигается за счет измерения токов в узлах и расчета производной от этих значений в реальном времени. Используя получаемые данные и «пропуская» их через математический аппарат алгоритма, можно построить актуальные графиков нагрузки, а также предвидеть изменения и предпринять меры по устранению аварии.

Алгоритм (рис. 4) осуществляет свое действие, исходя из измеренных значений тока на стороне 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ. Сравнивающий элемент выбирает большее из действующих значений тока и посылает на пусковой орган. Пусковой орган сравнивает полученное значение с предельно допустимым, и, если данное значение превышает предельно допустимое, на выходе пускового органа появляется логическая единица (1). Далее сигнал подается на устройство выдержки времени t_1 (5 с – моделируется выдержка 5 мин). Таким образом, осуществляется также отстройка от сквозных токов – длительность любого короткого замыкания (КЗ) значительно меньше длительности выдержки. Если измеряемый ток не снижается за время выдержки t_1 пусковой орган остается в работе и после времени выдержки t_1 подается сигнал на отключение выключателя потребителя III категории надежности электроснабжения на РУ 0,4 кВ ТП 6/0,4 кВ.

Далее алгоритм повторяется с увеличением выдержки времени на 0,5 с (аналог 30 с) до тех пор, пока ток на стороне 0,4 кВ трансформатора Т1 не снизится до допустимого значения. В данном случае отключения остальных потребителей не происходит, система остается в устойчивом состоянии до прибытия ремонтной бригады.

V. Моделирование системы управление сети на основе токовой разгрузки

Алгоритмизация процесса токовой разгрузки была апробирована на имитационной модели распределительной сети 6/0,4 кВ (рис. 3) в ПО PSCAD. С помощью логических элементов была построена схема управления различными выключателями потребителей 0,4 кВ (рис. 5).

В 0,0 с начинается работа схемы. Все элементы работают в номинальном режиме, все присоединения 0,4 кВ подключены к секциям, секционный выключатель находится в отключенном состоянии, выключатель переключки 6 кВ также отключен.

В момент 2,9 с с начала моделирования (аналог 2,9 мин) происходит КЗ на стороне ВН силового трансформатора Т2 длительностью 1,0 с. Через 0,1 с срабатывает система защиты, и трансформатор отключается с двух сторон.

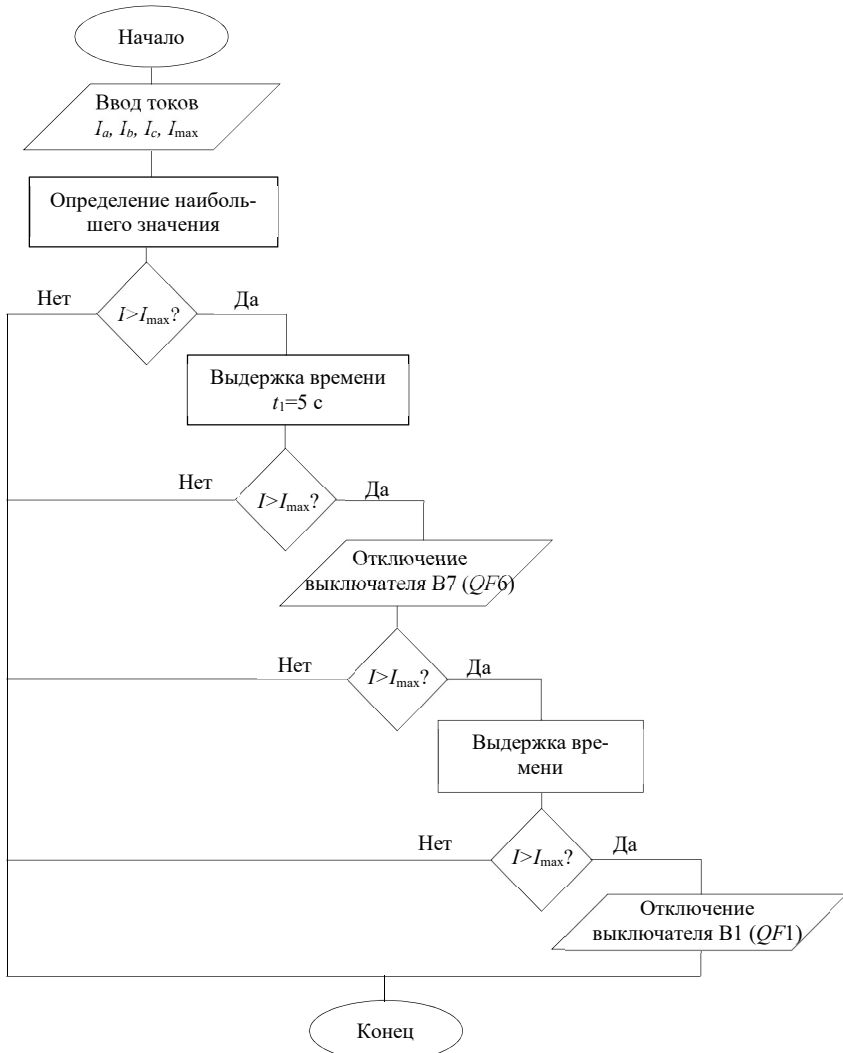


Рис. 4. Блок-схема алгоритма длительной автоматической разгрузки по току
Fig. 4. Block diagram of the long-term automatic current unloading algorithm

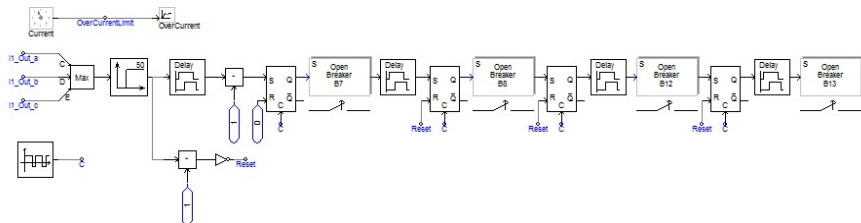


Рис. 5. Общий вид логической части разрабатываемой модели

Fig. 5. General view of the logical part of the developed model

В момент 3,1 с происходит включение секционного выключателя на стороне 0,4 кВ в результате срабатывания автоматики АВР. Система находится в аварийном состоянии: трансформатор Т1 перегружен и нуждается в разгрузке. В работу вступает алгоритм длительной автоматической разгрузки.

Осциллограммы токов на сторонах НН трансформаторов Т1 и Т2 в промежутке времени [0-5] с (во вторичных значениях) приведены на рис. 6 и 7. Они показывают, что алгоритм прекратил отключение потребителей после снижения тока. Ответственные потребители остаются в работе до прибытия ремонтной бригады и устранения последствий аварии.



Рис. 6. Действующие значения токов на стороне НН трансформатора Т1 на интервале времени 0...5 с

Fig. 6. The effective values of the currents on the LV side of the transformer T1 in the time interval 0...5 s

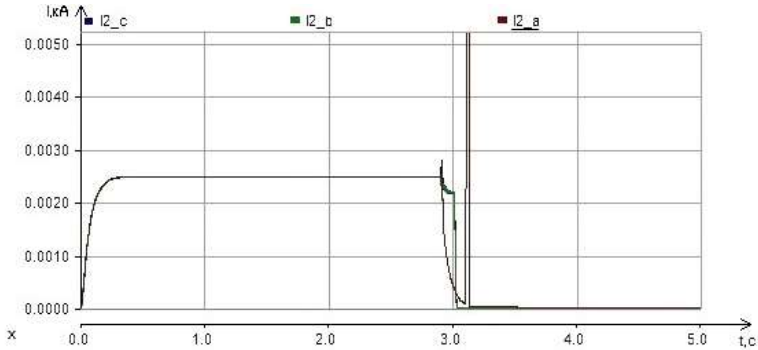


Рис. 7. Действующие значения токов на стороне НН трансформатора Т2 на интервале времени 0...5 с

Fig. 7. The effective values of the currents on the LV side of the transformer T2 in the time interval 0...5 s

VI. Заключение

Рассмотрена проблема появления «запертой электрической мощности» вследствие недогруженности существующих силовых трансформаторов (70-80 %) из-за устаревших требований к проектированию электрических сетей. Как направление развития цифровизации рассмотрена архитектура цифровой подстанции, в последующем используемая как объект алгоритмизации.

В ходе работы предложен алгоритм системы длительной автоматической разгрузки по току, приводящий к усовершенствованию электрической сети. Разработанный алгоритм может быть осуществим с помощью цифровых устройств в составе цифровой трансформаторной подстанции, что повысит надежность энергоснабжения потребителей, повысит экономичность за счет применения трансформаторов с большими коэффициентами загрузки.

© А.С. Панкова, 2021

© О.А. Пронина, 2021

© К.Е. Чумарин, 2021

© Д.С. Огнев, 2021

Поступила в редакцию 19.03.2021

Received 19.03.2021

Библиографический список

- [1] Soluyanov Yu., Fedotov A., Bakhteev K. Electrical loads of human settlement and the choice of power facilities for their power supply // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 18-22, 2020, Sochi, Russia, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111894.
- [2] Кузьмин В.В. Цифровизация и развитие конкуренции на электроэнергетическом рынке // Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития, Июнь 26, 2019, Санкт-Петербург, Россия. М.: Изд-во МЭИ, 2019. С. 170-186.
- [3] Лоскутов А.Б., Панкова А.С., Пронина О.А., Чумарин К.Е. Разработка алгоритма системы управления и релейной защиты в замкнутых распределительных сетях // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4 (127). С. 91-103.
- [4] Лоскутов А.Б., Демидова А.С., Пронина О.А., Чумарин К.Е. Разработка алгоритма управления замкнутыми сетями с устройствами регулирования потоков мощности // V Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. «Актуальные проблемы энергетики», Декабрь 17, 2019, Н. Новгород, Россия. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 229-234.
- [5] Опадчий Ф.Ю. Цифровизация энергетики: принципы реализации, пилотные проекты // Цифровая энергетика: новая парадигма функционирования и развития, Июнь 26, 2019, Санкт-Петербург, Россия. М.: Изд-во МЭИ, 2019. С. 28-39.

References

- [1] Yu. Soluyanov, A. Fedotov and K. Bakhteev, "Electrical loads of human settlement and the choice of power facilities for their power supply", in proc. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 18-22, 2020, Sochi, Russia, pp. 1-6.
- [2] V.V. Kuzmin, "Tsifrovizatsiya i razvitiye konkurentsii na elektroenergeticheskom rynke [Digitalization and development of competition in the electric power market]", in proc. *Tsifrovaya energetika: novaya paradigma funktsionirovaniya i razvitiya [Digital energy: a new paradigm of functioning and development]*, June 26, 2019, Saint-Petersburg, Russia. Moscow: MPEI, 2019, pp. 170-186 (in Russian).
- [3] A.B. Loskutov, A.S. Pankova, O.A. Pronina and K.E. Chumarin, "Development of control system and relay protection algorithm in closed distribution networks", *Transactions of NSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (127), pp. 91-103, 2019.
- [4] A.B. Loskutov, A.S. Demidova, O.A. Pronina and K.E. Chumarin, "Razrabotka algoritma upravleniya zamknutyimi setyami s ustroystvami regulirovaniya potokov moshchnosti [Development of a control algorithm for closed networks with power flow control de-vices]", in proc. *V All-Russian Conf. Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]*, Dec. 17, 2019, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 229-234 (in Russian).
- [5] F.Yu. Opadchiiy, "Tsifrovizatsiya energetiki: printsipy realizatsii, pilotnyye projekty [Energy digitalization: implementation principles, pilot projects]", in proc. *Tsifrovaya energetika: novaya paradigma funktsionirovaniya i razvitiya [Digital energy: a new paradigm of functioning and development]*, June 26, 2019, Saint-Petersburg, Russia. Moscow: MPEI, 2019, pp. 28-39 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Панкова Анна Сергеевна, начальник отдела балансов департамента реализации электроэнергии ПАО «ТНС Энерго НН», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Anna S. Pankova, head of the balance division of the electricity sales department of the PJSC «TNS energo NN», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Пронина Ольга Александровна, инженер 3 категории АО «Атомэнергопроект», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Olga A. Pronina, engineer of the JSC «Atomenergoproekt», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Чумарин Кирилл Евгеньевич, инженер ООО «Газпром проектирование», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Kirill E. Chumarin, engineer of the JSC «Cazprom proektirovanie», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Огнев Дмитрий Сергеевич, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitry S. Ognev, undergraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.