

**АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ФАЗАМ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПО  
КРИТЕРИЮ МИНИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА НЕРАВНОМЕРНОСТИ  
НАГРУЗКИ ФАЗ, ПРИМЕНЯЕМЫЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**Пестерев А.А., Костинский С.С.**

**Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия**

*pesterevaa@srspu.ru*

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Несимметрия нагрузок отрицательно сказывается как на работе потребителей, так и на самой электрической сети. Указанное явление приводит к снижению эффективности процессов передачи и распределения электрической энергии вследствие появления дополнительных потерь. Симметрирование нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ производят как на стадии проектирования сетей, так и при их эксплуатации. На стадии проектирования стараются равномерно распределить нагрузки по фазам. Авторами статьи решается актуальная задача распределения однофазных электропотребителей на стадии проектирования системы электроснабжения для анализа суммарной доли дополнительных потерь от несимметрии в структуре суммарных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть проблему несимметрии нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ, вызывающие дополнительные потери электроэнергии. Произвести анализ существующих методов симметрирования при распределении по фазам линий  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  однофазных электроприемников на этапе проектирования электрических сетей. Разработать алгоритм распределения однофазных электроприемников, использующий в качестве исходных данных массивы мгновенных значений силы тока отдельных электроприемников, который заключается в поиске наилучшего решения распределения электроприемников по фазам линий  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , по критерию минимизации влияния несимметрии нагрузки на потери в элементах системы электроснабжения, используемых для транспортировки электрической энергии. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленной задачи в работе использован метод полного перебора, реализованный с помощью троичной системы счисления, применяемой для кодирования распределения электроприемников по фазам системы электроснабжения. В качестве целевой функции используется коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по фазам системы электроснабжения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Приведены результаты использования разработанного алгоритма, применяемого в виде стороннего плагина для программного комплекса по проектированию, для распределения электроприемников одного из кабинетов, разрабатываемой ВМ офисного здания. Выполнено сравнение разработанного алгоритма с существующими наиболее широко применяемыми подходами к распределению однофазных электроприемников в системах электроснабжения. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработанный алгоритм позволил получить принципиально новые технические решения на этапе разработки проектной документации системы электроснабжения (стадия ПД и РД), способствующие повышению энергоэффективности передачи электрической энергии, за счет снижения дополнительных потерь от несимметричной нагрузки.

**Ключевые слова:** коэффициент неравномерности нагрузки фаз; несимметричные нагрузки; однофазные потребители электрической энергии; троичная система счисления; проектирование систем электроснабжения; ВМ технологии.

**Для цитирования:** Пестерев А.А., Костинский С.С. Алгоритм распределения по фазам в системах электроснабжения однофазных электроприемников по критерию минимизации коэффициента неравномерности нагрузки фаз, применяемый на этапе проектирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 18-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-18-28.

**ALGORITHM FOR PHASE DISTRIBUTION IN POWER SUPPLY SYSTEMS OF SINGLE-PHASE ELECTRIC RECEIVERS ACCORDING TO THE CRITERION OF MINIMIZATION OF THE COEFFICIENT OF LOAD UNUNIFORMITY OF THE PHASES USED AT THE DESIGN STAGE**

**AA. Pesterev, SS. Kostinskiy**

**South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov,  
Novocherkassk, Russia  
pesterevaa@srspu.ru**

**Abstract:** *RELEVANCE.* Unbalance of loads adversely affects both the work of consumers and the electrical network itself. This phenomenon leads to a decrease in the efficiency of the processes of transmission and distribution of electrical energy due to the appearance of additional losses. Balancing of loads in electrical networks of 0.4 kV is carried out both at the design stage of networks and during their operation. At the design stage, they try to evenly distribute the loads across the phases. The authors of the article solve the actual problem of distributing single-phase electrical consumers at the stage of designing a power supply system to analyze the total share of additional losses from unbalance in the structure of total losses in distribution networks of 0.4 kV. *THE PURPOSE.* To consider the problem of unbalance of loads in electrical 0.4 kV networks, causing additional losses of electricity. To analyze the existing methods of balancing when distributing the phases of the lines L1, L2, L3 of single-phase power receivers at the stage of designing electrical networks. Develop an algorithm for single-phase power consumer distribution, using arrays of instantaneous values of the current strength of individual electrical receivers as initial data. It stipulates calculating the best distribution of power consumers across the phases of lines L1, L2, L3 using the minimization of the load unbalance impact on the losses in power grid elements used for the electric power transfer. *METHODS.* To solve this problem, the authors employed the complete enumeration method implemented with a tertiary numerical system used to code power consumer distribution across the power supply grid phases. The coefficient accounting for the unbalance of load distribution across power grid phases is used as the target function. *RESULTS.* The developed algorithm can be applied as an external plug-in for the design software package to distribute the power consumers of one of the rooms in a BIM office building. The developed algorithm is compared to the existing widely-used approaches to single-phase power consumer distribution in power grids. *CONCLUSION.* The developed algorithm allowed producing brand-new engineering solutions while developing a design document for the power supply grid (design and detailed documentation stage). They help improve the efficiency of electric power transmission by reducing additional losses caused by unbalanced loads.

**Key words:** *coefficient the unbalance of load distribution phases; asymmetric loads; single-phase high-power consumers; tertiary number system; design of power supply systems; BIM technologies.*

**For citation:** Pesterev AA., Kostinskiy SS. Algorithm for phase distribution in power supply systems of single-phase electric receivers according to the criterion of minimization of the coefficient of load ununiformity of the phases used at the design stage. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):18-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-18-28.

**Введение (Introduction)**

Переход на более высокий уровень конкурентоспособности в отрасли промышленного и гражданского строительства во многих странах мира, побудил инжиниринговые и консалтинговые компании к созданию полноценных *Building Information Modeling* (далее *BIM*) проектируемых объектов. Наряду с зарубежными странами этому способствует и Правительство Российской Федерации. Начиная с 2017 г., оно начало реализовывать программы, направленные на создание необходимых условий для реализации и развития цифровой экономики. Для этого была разработана и введена в действие соответствующая нормативная база: постановление Правительства РФ № 331 от 5.03.2021 г., ГОСТ Р 57311-2016, ГОСТ Р ИСО 22263-2017, ГОСТ Р 57563-2017, СП 328.1325800.2017, СП 404.1325800.2018, Федеральные законы № 190-ФЗ от 29.12.2004 г, № 149-ФЗ от 27.07.2006 г., № 162-ФЗ от 29.06.2015 г.

Комплексная концепция *BIM* представляет собой информационную модель здания в виде трехмерной модели, связанную с информационной базой данных, где каждому

элементу модели могут присваиваться дополнительные параметры [1]. Основополагающая цель *VIM*, применительно к проектированию систем электроснабжения, создать ее расширенную 3D-модель, а функция цифрового двойника – эмулировать то, что она отражает [2]. Цифровой двойник служит для более качественной проработки проектов за счет интеграции данных и информации на протяжении всего срока службы объекта, что обеспечивает формирование цифрового жизненного цикла объекта [3, 4]. Цифровые двойники позволяют получить не только визуализацию объекта, но и производить экспериментальные исследования по моделированию процесса, получить сведения по наблюдению за моделируемой системой или объектом, а также изучать воздействие каких-либо внешних факторов. Таким образом, цифровой двойник является экспериментальной площадкой, где можно провести исследовательскую работу перед созданием прототипа системы электроснабжения. При этом подразумевается не только зеркальная копия моделируемых объектов, но и учет взаимосвязей между ними [5].

Процесс, связанный с моделированием цифровых двойников систем электроснабжения, подразумевает под собой работу в системе параметрического моделирования, способную самостоятельно выполнять автоматическую координацию любых изменений, происходящих в разрабатываемой модели. Важной составляющей данной технологии является единое информационное пространство, база данных, содержащая всю информацию о технических, энергетических, экологических, коммерческих и другие характеристиках объекта. Высокая точность и детальное описание модели позволяют проводить различные расчеты и анализ полученных результатов.

Передовой метод управления строительством с использованием *VIM* предлагает новые устойчивые подходы к проектированию систем электроснабжений. Это особенно полезно на ранних стадиях проекта, чтобы иметь возможность оценить и уменьшить воздействие электроприемников на систему электроснабжения [6]. *VIM* моделирование зданий включает геометрию, пространственные отношения, географическую информационную систему, а также взаимосвязь между всеми элементами системы электроснабжения в модели [7]. В зависимости от требований, стадии проекта и уровня детализации, к общей информации, включенной в *VIM*, могут быть добавлены конкретные параметры электроприемников, в том числе и в виде массивов мгновенных значений токов и напряжений за период, полученных от поставщиков оборудования и измеренных ими с помощью сертифицированной и поверенной аппаратуры, при проведении приемосдаточных испытаний [8].

Проведенные исследования потенциальности использования *VIM* в направлении развития методов проектирования систем электроснабжения, содержащих однофазные нагрузки, показали, что преимущество *VIM* возникает благодаря разработке цифрового двойника системы электроснабжения, с применением сторонних плагинов, программируемых специально под инженеров электриков, с дальнейшей их установкой в программный комплекс [8]. Концепт цифрового двойника системы электроснабжения заключается в объединении искусственного интеллекта, машинного обучения и аналитики больших данных об электроприемниках, для создания динамической модели системы электроснабжения, при работе в которой инженеры могут получить принципиально новые технические решения [9].

Наблюдаемая в последние десятилетия тенденция роста количества и повышения установленной мощности однофазных электроприемников, способствует увеличению показателей несимметрии нагрузки на объектах как промышленного, так и общественного назначения, что сказывается на качестве электрической энергии в системах электроснабжения [10,11]. Указанное явление приводит к снижению эффективности процессов передачи и распределения электрической энергии вследствие появления дополнительных потерь [12, 13]. Оценка экономического ущерба от снижения качества электроэнергии, из-за несимметрии токов и напряжений, обуславливается ухудшением энергетических показателей и сокращением срока службы электрооборудования, общим снижением надежности функционирования электрических сетей, увеличением потерь активной мощности и потребления активной и реактивной мощностей. Поэтому при проектировании систем электроснабжения необходимо выполнять оценку величины дополнительных потерь мощности, вызванных несимметричным характером нагрузки, в отдельных элементах сети, что позволит выполнить предварительные расчеты экономической эффективности проектируемой системы электроснабжения [14, 15]. Оценка величины указанных дополнительных потерь мощности необходима для анализа суммарной доли дополнительных потерь в структуре суммарных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ, что в последующем скажется на выборе и типе

мероприятий по оптимизации режимов энергопотребления [12].

Авторы А.И. Орлов, С.В. Волков [16] представили исследования алгоритмов управления устройствами балансировки нагрузки в их групповой работе. Авторы А.М. Маклецов, И.Ф. Галиев, Р.И. Галиев и Лью Куок Кьонг [17] были произведены исследования по мониторингу несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ.

В настоящее время актуальной становится задача по совершенствованию существующих и разработке новых алгоритмов, направленных на снижение дополнительных потерь в распределительных сетях 0,4 кВ, обусловленных несимметричным режимом их работы [18, 19, 20]. Решению указанных задач способствует наращивание вычислительной мощности существующих ПК и повышение требований к проектируемым системам электроснабжения, содержащим однофазные нагрузки. Все выше сказанное, свидетельствует об актуальности исследований направленных на поиск новых алгоритмов для решения задач размещения и оптимального подключения к фазам сети однофазных электроприемников [21]. В немалой степени решению способствует и анализ на стадии проектирования массивов мгновенные значения силы токов и напряжений электроприемников за один период, в рамках реализации концепции *VIM*.

*Цель* исследования состоит в изучении проблемы несимметрии нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ, вызывающие дополнительные потери электроэнергии.

*Научная значимость* результатов в представленной работе определяется нахождением оптимального распределения по фазам системы электроснабжения однофазных линейных электропотребителей по критерию минимизации коэффициента неравномерности загрузки фаз, который рассчитывается в разработанной авторами программе, использующей метод полного перебора, которая реализована в виде плагина для программного комплекса *Revit* (номер свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023610303 от 10.01.2023 г.). Расчеты проводились на примере распределения силовых электроприемников одного из кабинетов проектируемого офисного здания.

*Практическая значимость* результатов работы определяется получением на стадии проектирования системы электроснабжения детальной оценки величины дополнительных потерь, вызванных несимметрией нагрузки.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Разработка и использование при реализации *VIM* сторонних плагинов, может способствовать выбору оптимальной схемы электроснабжения, с точки зрения минимизации дополнительных потерь активной мощности в основных элементах системы электроснабжения от несимметрии нагрузки. При этом при проектировании системы электроснабжения необходимо иметь достаточный объем первичной информации об элементах системы и параметров их работы в режиме протекания технологических процессов генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии, что возможно при разработке цифровых двойников проектируемых систем электроснабжения [22 – 25].

Традиционно широко используемые при проектировании систем электроснабжения алгоритмы для распределения электроприемников по фазам, в своем большинстве, основаны на двух подходах.

Первый подход заключается в упорядочивании электроприемников по убыванию значений их номинального действующего значения силы тока, и дальнейшего распределения первых трех электроприемников с максимальными номинальными действующими значениями силы тока по одному на каждую фазу  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ . После этого, в порядке уменьшения величины номинального действующего значения силы тока, выполняется пошаговое распределение на менее загруженные фазы оставшихся электроприемников. Указанный подход используется в соответствии с техническим руководством по проектированию электрических установок, предназначенным для специалистов, работающих в конструкторских бюро, разработанным и используемым в виде плагина компаниями *Systeme electric*.

Второй подход, также как и первый, на начальном этапе сводится к упорядочиванию электроприемников по убыванию их номинальной действующей силы тока. В последующем вычисляется сумма значений номинальной действующей силы тока всех электроприемников, и далее она делится на три. Таким образом, вычисляется эталонная величина действующего значения силы тока для каждой фазы, при которой будет отсутствовать несимметрия токов. На следующем этапе в фазу  $L_1$  из упорядоченного набора электроприемников, начиная с наибольшего, электроприемники распределяются в порядке уменьшения номинального действующего значения силы тока, при условии, что их

суммарное действующее значение силы тока в фазе не превышает эталонного значения. Аналогичные действия выполняются для фаз  $L_2$  и  $L_3$ . Оставшиеся нераспределенными электроприемники с минимальными действующими значениями силы тока, распределяются пошагово по одному в порядке уменьшения величины их силы тока на менее загруженные фазы. Указанный подход используется в международной консалтинговой и инжиниринговой компании при разработке цифровых двойников систем электроснабжения на основе *VIM* технологий.

Описанные подходы не позволяют найти оптимальное (наилучшее) решение размещения электроприемников по фазам линий  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , которое бы позволило минимизировать влияние несимметрии нагрузки на элементы системы электроснабжения, используемые для транспортировки электрической энергии.

Одной из показательных величин, отражающих влияние несимметричной нагрузки на изменение соответствующих норм качества электрической энергии и потерь активной мощности в электрических сетях, является коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по фазам [26]. Указанный параметр рекомендуется применять в соответствии приказом Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 года № 326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» при определении дополнительных потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ, обусловленных неравномерностью распределения нагрузок по фазам. Так же в работе [27], в качестве одного из количественных показателей, характеризующих схему сети, на основе объективных данных, для выведения зависимости дополнительных потерь от несимметрии нагрузки, предлагается использовать соответственно коэффициенты неодинаковости нагрузок фаз и дополнительных потерь от неравномерности нагрузки фаз. Причем, указанные коэффициенты, по своей сути, идентичны коэффициенту неравномерности, формула для расчета которого приведена в приказе № 326 Министерства энергетики [26].

С учетом вышесказанного, итоговым решением, сформулированной ранее задачи, является получение комбинации из общего количества электроприемников, путем распределения их по фазам линий  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , соответствующая минимально возможному значению коэффициента неравномерности нагрузки фаз, на основе массивов мгновенных значений силы токов и напряжений электроприемников за один период, загруженных в *VIM* системы электроснабжения проектируемого объекта.

Алгоритм решения поставленной задачи предлагается следующий:

- во-первых, для нахождения общего количества возможных комбинаций подключения однофазных электроприемников к фазам линий  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , необходимо определиться с видом представления данных о распределении электроприемников по фазам. Рациональным вариантом для представления данных, в рамках решения указанной задачи, служит троичная система счисления. Рациональность обусловлена тем, что троичная система счисления является наилучшим вариантом для кодировки / декодировки при распределении электроприемников по фазам. Указанный вариант заключается в представлении данных в виде комбинации, обозначаемой одной из трех цифр 0, 1, 2. Где цифра 0 обозначает, что электроприемник подключен к фазе  $L_1$ , цифра 1 – к фазе  $L_2$ , а цифра 2 – к фазе  $L_3$ . Существует ряд работ, например [28], в которых предложен подход, основанный на управлении межфазными переключениями однофазных потребителей электроэнергии за счёт применения бинарных алгоритмов. Основу такого подхода составляет применение двоичного кодирования / декодирования при обработке данных для получения комбинаций распределения электроприемников по фазам. При этом указывается, что двоичная система счисления в современном мире широко используется цифровыми устройствами, системами и различными методами оптимизации. Однако, при использовании двоичной системы счисления при кодировании / декодировании данных о подключении электроприемника к одной из трех фаз используется 2 бита или 4 варианта, что приводит к получению дополнительных комбинаций, которые не имеют физического смысла, т.к. для одного электроприемника возможно только 3 варианта. По итогу имеет место нерациональное использование вычислительной мощности ЭВМ или усложнение алгоритма, с целью исключения незадействованных вариантов;

- во-вторых, необходимо выполнить анализ всех возможных вариантов комбинаций распределения электроприемников по фазам, исходя из их общего количества. Каждой комбинации подключения электроприемников к той или иной фазе соответствует порядковый номер в десятичной системе счисления от 1 до  $3^n - 1$  где  $n$  – общее количество электроприемников. Далее для получения в троичной системе счисления комбинаций подключения к фазам сети электроприемников, необходимо перевести порядковый номер комбинации из десятичной системы счисления в троичную;

- в-третьих, после получения всех комбинаций с вариантами подключения

однофазных электроприемников к фазам линий  $L_1, L_2, L_3$ , необходимо проанализировать каждую комбинацию, сгенерированную при помощи метода полного перебора, на предмет вычисления величины коэффициента неравномерности нагрузки фаз. Формула (1), для расчета коэффициента соответствует формуле (52), приведенной в приказе Министерства энергетики РФ № 326, и является целевой функцией поставленной задачи [29]:

$$K_{\text{нер}} = \frac{I_{L1}^2 + I_{L2}^2 + I_{L3}^2}{3 \cdot \left( \frac{I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N}{3} \right)^2} \left( 1 + 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}} \right) - 1,5 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Ф}}} \quad (1)$$

где  $I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}$  – суммарные действующие величины значений силы тока по каждой фазе, после распределения однофазных электроприемников в соответствии с заданной комбинацией, вычисленные на основе суммирования массивов мгновенных значений силы токов каждого электроприемника, подключенного к соответствующей фазе, причем измерения массивов мгновенных значений силы тока отдельных электроприемников за один период синхронизированы по переходу мгновенных значений напряжения через ноль, и количество мгновенных значений за один период должно составлять не менее чем в два раза больше максимального значения частоты сети в соответствии с теоремой Котельникова-Найквиста;

$I_1, I_2, I_3 \dots I_N$  – номинальные значения силы тока отдельных однофазных электроприемников;

$R_{\text{Н}}, R_{\text{Ф}}$  – сопротивления нейтрального и фазного проводников;

- в-четвертых, следует выявить комбинацию с минимальным значением целевой функции, номер указанной комбинации в троичной системе счисления будет соответствовать оптимальному распределению электроприемников по фазам и являться решением задачи. Указанных комбинаций при использовании метода полного перебора будет шесть.

Исходные данные в виде массивов мгновенных значений силы тока отдельных электроприемников, синхронизированные по переходу мгновенных значений напряжения через ноль для выполнения научных исследований, могут быть заимствованы, например, из международной базы *Panda*. База содержит данные в виде массивов мгновенных значений силы токов и напряжений для ряда электроустановок, серийно используемых при проектировании офисных зданий, которые были получены в ходе лабораторных замеров.

Разработанный алгоритм в виде плагина для программного комплекса *Revit*, являющегося интегрированным инструментом среды проектирования системы электроснабжения, на основе данных об электроприемниках, используемых при разработке цифровых двойников на основе *BIM* технологий, был применен в проектной деятельности международной консалтинговой и инжиниринговой компании *ООО Bilfinger Tebodin RUS*. Указанный плагин позволил выполнить оптимизацию подключения к фазам однофазных электроприемников в системе электроснабжения офисного здания компании на этапе проектирования по критерию минимизации коэффициента дополнительных потерь при неравномерной нагрузке фаз. В рамках выполнения проекта была разработана *BIM* офисного здания, являющаяся ядром проекта, которая позволила получить, на этапе разработки рабочей документации, исходные данные в виде массивов мгновенных значений силы токов и напряжений электроприемников за один период, установленных внутри здания.

### Результаты (Results)

Рассмотрим результаты работы разработанного плагина, на примере распределения силовых электроприемников одного из кабинетов офисного здания. В кабинете установлено 10 электроприемников: ноутбуки с действующими значениями силы потребляемого тока, рассчитанными на основании загруженных в *BIM* осциллограммам, соответственно 0,165 А, 0,656 А, 0,422 А, 0,571 А и настольные ПК – 0,979 А, 0,468 А, 1,053 А, 0,773 А, 1,113 А, 0,554 А. Для сравнения были выполнены расчеты по двум подходам, широко используемым при проектировании систем электроснабжения, которые ранее были изложены в статье. Результаты расчета полученных суммарных значений силы тока по каждой фазе, а также величин коэффициентов, учитывающих неравномерность распределения нагрузок по фазам, рассчитанные в соответствии с формулой (52), приведенной в приказе Министерства энергетики РФ № 326, отражены в табл. При расчете коэффициента, учитывающего неравномерность распределения нагрузок по фазам, было принято, что для проектируемой системы электроснабжения заложены одинаковые сечения нейтрального рабочего и фазного проводников.

**Суммарные значения силы тока по каждой фазе и величин коэффициентов, учитывающих неравномерность распределения нагрузок по фазам**  
Summary values of current intensity for each phase and values of coefficients taking into account the uneven distribution of loads by phase

| Параметры            | $I_{L1}$ , А | $I_{L2}$ , А | $I_{L3}$ , А | $K_{\text{нпр}}$ , о.е. |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|
| Первый подход        | 2,233        | 2,178        | 2,339        | 1,002194                |
| Второй подход        | 2,331        | 2,22         | 2,199        | 1,001661                |
| Разработанный плагин | 2,257        | 2,245        | 2,248        | 1,000013                |

\*Источник: составлено автором. \*Source: compiled by the author.

Для оценки эффективности разработанного алгоритма, с точки зрения снижения потерь от несимметрии нагрузки, в соответствии с формулой (51), приведенной в приказе Министерства энергетики РФ № 326, воспользуемся формулой (2):

$$\Delta W = 0,7 K_{\text{нпр}} \Delta U \frac{\tau}{T_{\text{макс}}}, \quad (2)$$

где  $\Delta U$  – потеря напряжения в максимум нагрузки сети от шин ТП до наиболее электрически удаленного электроприемника, %;

$T_{\text{макс}}$  – время максимальной нагрузки, ч;

$\tau / T_{\text{макс}}$  – соотношение, значение которого нормируется в соответствии с приведенной в приказе таблицей, был выполнен расчет потерь электроэнергии в проводниках проектируемой системы электроснабжения с номинальным напряжением 0,4 кВ (в процентах от отпуска электроэнергии в сеть) для рассматриваемых подходов. При этом, на основе результатов работы *ВМ*, проектируемой системы электроснабжения офисного здания, было установлено, что потеря напряжения в сети от шин ТП до наиболее электрически удаленного электроприемника составит 2,02 % и при  $T_{\text{макс}} = 2000$  ч, отношение  $\tau / T_{\text{макс}}$  составит 0,46. В рассматриваемом случае, применение разработанного плагина позволило снизить на этапе проектирования дополнительные потери от несимметричной нагрузки соответственно на 0,22 % и 0,16 %, по сравнению с традиционно используемыми подходами.

#### **Заключение (Conclusions)**

Разработанный плагин, используемый для проектирования систем электроснабжения на основе концепции *ВМ*, содержащих однофазные нагрузки, реализующий разработанный алгоритм, позволяет получить принципиально новые технические решения, способствующие повышению энергоэффективности передачи и качества электрической энергии, при разработке проектной документации (стадия ПД и РД), что соответствует реализации Энергетической стратегии России на период до 2030 года.

Однако сложность решения поставленной задачи методом полного перебора, для нахождения наилучшего распределения электроприемников по фазам с минимальным коэффициентом, учитывающим неравномерность распределения нагрузок по фазам, зависит от общего количества электроприемников и языка программирования, на котором реализован предлагаемый алгоритм. В случаях, когда количество электроприемников становится больше 12 шт. полный перебор может занять значительное время и привести к переполнению памяти, выделяемой для хранения вычисленных значений коэффициентов неравномерности токов фаз для каждой комбинации.

#### **Литература**

1. Разов И.О., Березнев А.В., Коркишко О.А. Проблемы и перспективы внедрения *ВМ* технологий при строительстве и проектировании // В сб.: *ВМ-моделирование в задачах строительства и архитектуры*. Материалы всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29-30 марта 2018 года. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. С. 27-31.
2. Hosamo H.N., Imran A., Cardenas-Cartagena J., et al. A Review of the digital twin technology in the AEC-FM industry // *Advances in civil engineering*. 2022. Vol. 2022. Art. no. 2185170.
3. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., et al. Towards a semantic construction digital twin: directions for future research // *Automation in construction*. 2020. Vol. 114. Art. no. 103179.
4. Zhao Q., Li Y., Hei X., et al. A graph-based method for IFC data merging // *Advances in civil engineering*. 2020. Vol. 2020. Art. no. 8782740.

5. Lu Y., Xu X. A digital twin reference model for smart manufacturing. 48th International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE). 2018. Vol. 2018, Art. no. 144541.
6. Ajayi S.O., Oyedele L.O., Ceranic B., et al. Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment // International journal of sustainable building technology and urban development. 2015. Vol. 6. Is. 1. P. 14-24.
7. Lin Y.C., Hsu Y.T., Hu H.T. BIM model management for BIM-based facility management in buildings // Advances in civil engineering. 2022. Vol. 2022. Art. no. 1901201.
8. Пестерев А.А., Костинский С.С. Концептуальная модель развития метода проектирования систем электроснабжения с применением BIM технологий // В сб.: Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XLIII международной научно-технической конференции. Новочеркасск, 19-22 октября 2021 года. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2021. С. 103-106.
9. Lu Q., Xie X., Heaton J., et al. From BIM towards digital twin: strategy and future development for smart asset management // Studies in computational intelligence. 2020. Vol. 853. P. 392-404.
10. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23, № 3. С. 209-222.
11. Гринкруг М.С., Митин И.А. Управление несимметрией токов в распределительных сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2009. №3-4. С. 80-84.
12. Дед А.В., Паршукова А.В., Халитов Н.А. Оценка дополнительных потерь мощности от несимметрии напряжений и токов в элементах систем электроснабжения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 10-3. С. 421-425.
13. Жежеленко И.В. Проблема качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2001. № 11. С.1-8.
14. Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В. Расчет дополнительных потерь мощности от воздействия несимметрии напряжений и токов в элементах электрических сетей // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 280-282.
15. Л. Куок Кьонг, Маклецов А.М., А. Альзаккар и др. Разработка алгоритма симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ при распределенной нагрузке вдоль линии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 87-97.
16. Орлов А.И., Волков С.В. Сравнение алгоритмов управления устройствами выравнивания нагрузки при их групповой работе // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 93–101.
17. Маклецов А.М., Галиев И.Ф., Галиев Р.И. и др. Мониторинг несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ. // Энергетик журнал. 2019. №5. С. 6-25.
18. Журавлёв Т.А. Оценка качества электроэнергии на стадии проектирования системы электроснабжения // В сб.: Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы. Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. под общей редакцией А.И. Вострецова. Астана, 30 октября 2018 года. Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2018. С. 25-29.
19. Дёмин Ю.В., Елизаров Д. А., Манусов В.З. и др. Совершенствование методов контроля и анализа показателей несинусоидальности напряжения в электроэнергетических системах // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 200-206.
20. Оморов Т.Т., Тақырбашев Б.К., Осмонова Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 93-102.
21. Курейчик В.В., Жиленков М.А. Генетический алгоритм для решения оптимизационных задач с явно выраженной целевой функцией // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. № 4 (19). С. 1-4.
22. Шведенко В.Н., Мозохин А.Е. Концепция управления сетевой структурой интеллектуальных устройств в условиях цифровой трансформации энергетической отрасли // НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ. 2021. Т. 21. № 5. С. 748-754.



23. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital twin: applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP conference on manufacturing systems (CMS)*. 2018. Vol. 72. P. 243-248.

24. Grieves M., Vickers J.; Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, editors. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham. P. 85-113.

25. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C., et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *7th Conference on Learning Factories. Procedia manufacturing*. 2017. Vol. 9. P. 113-120.

26. Дед А.В., Бирюков С.В., Паршукова А.В. Оценка дополнительных потерь мощности в электрических сетях 0,38 кВ на основе экспериментальных данных // *Успехи современного естествознания*. 2014. № 11 (ч. 3). С. 64-67.

27. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 280 с.

28. Мохов В.А. Применение агентных метаэвристик в реализации технологической цепочки минимизации потерь электроэнергии // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2021. № 1 (209). С. 18-26.

29. Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н., и др. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем. Под ред. Казанцева В.Н. М.: Энергоатомиздат, 1983. 386 с.

#### Авторы публикации

**Пестерев Александр Александрович** – аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжение и электропривод» (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>, [pesterevaa@srspu.ru](mailto:pesterevaa@srspu.ru)

**Костинский Сергей Сергеевич** – к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение и электропривод» (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, [mirovingen1987@mail.ru](mailto:mirovingen1987@mail.ru)

#### References

1. Razov IO, Bereznev AV, Korkishko OA. Problems and prospects of introduction of BIM technologies in the building and oil and gas industry. *BIM-modeling for construction and architecture, the proceedings of the all-russian research and practice conference*. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2018. pp. 27–31.

2. Hosamo HH, Imran A, Cardenas-Cartagena J, et al. A Review of the digital twin technology in the AEC-FM industry. *Advances in civil engineering*. 2022; 2022:2185170. doi: 10.1177/1933719113508817.

3. Boje C, Guerriero A, Kubicki S, et al. Towards a semantic construction digital twin: directions for future research. *Automation in construction*. 2020; 114:103179. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179.

4. Zhao Q, Li Y, Hei X, et al. A graph-based method for IFC data merging. *Advances in civil engineering*. 2020; 2020:8782740. doi: 10.1155/2020/8782740

5. Lu Y., Xu X. A digital twin reference model for smart manufacturing. *48th International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE)*. 2018. 2018, Art. no. 144541.

6. Ajayi SO, Oyedele LO, Ceranic B, et al. Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *International journal of sustainable building technology and urban development*. 2015; 6(1):14-24. doi: 10.1080/2093761X.2015.1006708.

7. Lin YC, Hsu YT, Hu HT. BIM model management for BIM-based facility management in buildings. *Advances in civil engineering*. 2022; 2022:1901201. doi: 10.1155/2022/1901201

8. Pesterev AA, Kostinskiy SS. The conceptual development model for the power grid design method using the BIM technology. *Power system cybernetics. The proceedings of XLIII International science and technology conference*. Novocherkassk, October 19-22, 2021. Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University (NPI) n.a. M.I. Platov, 2021. pp. 103-106.

9. Lu Q, Xie X, Heaton J, et al. From BIM towards digital twin: strategy and future development for smart asset management. *Studies in computational intelligence*. 2020; 85:392-404. doi: 10.1007/978-3-030-27477-1\_30.

10. Rakhimov OS, Mirzoev DN, Grachieva EI. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(3):209-222. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.
11. Grinkrug MS, Mitin IA. Control of asymmetry of currents in distribution low voltage networks. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2009; 3-4:80-84.
12. Ded AV, Parshukova AV, Khalitov NA. Assessment of additional losses of power from asymmetry of tension and currents in elements of systems of power supply. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2015; 10-3:421-425.
13. Zhezhelenko IV. The problem of power quality in industrial power supply systems. *Vestnik of Pryazovskyi State Technical University* 2001; 11:1-8.
14. Ded AV, Biryukov SV, Parshukova AV. Calculation of additional power losses from exposure unbalanced voltages and currents cell electric network. *Modern problems of science and education*. 2014; 5:280-282.
15. Luu Quoc Cuong, Makletsov AM, Alzakkar A, et al. Development of an algorithm for symmetrizing loads in networks of 0.4 kv at a distributed load along a line. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022; 24(2):87-97. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-2-87-97.
16. Orlov AI, Volkov SV. Comparison of control algorithms for load balancing devices during their group work. *Bulletin of the Chuvash University*. 2018; 3:93-101.
17. Makletsov AM, Galiev IF, Galiev RI, et al. Monitoring of load unbalance in 0.4 kV networks. *Energetik Journal*. 2019; 5:6-25.
18. Zhuravlev TA. Assessing the quality of electric power while designing the power supply system. *The problems of modern science: problems, trends, and prospects. International (virtual) practical research conference, edited by A.I. Vostretsov*. Astana, October 30, 2018. Neftekamsk: Mir nauki, 2018. pp. 25-29.
19. Demin YuV., Elizarov DA, Manusov VZ, et al. Improving the methods of controlling and analyzing the non-sine voltage parameters in electric power systems. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*. 2018; 1:200-206.
20. Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh. To the problem of mathematical modelling of the three-phase asymmetrical distribution network. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(1):93-102. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102
21. Kureychik VV, Zhilenkov MA. The genetic algorithm for the optimization with a clear target function. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie*. 2014; 4 (19):1-4.
22. Shvedenko VN, Mozokhin AE. The concept of managing the network structure of intelligent devices in the digital transformation of the energy industry. *SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS, AND OPTICS*. 2021; 21(5):748-754. (In Russ.). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-748-754
23. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital twin: applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP conference on manufacturing systems (CMS)*. 2018; 72:243-248. doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.139
24. Grieves M., Vickers J.; Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, editors. *Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham. P. 85-113.
25. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C., et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *7th Conference on Learning Factories. Procedia manufacturing*. 2017; 9:113-120. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.043
26. Ded AV, Biryukov SV, Parshukova AV. Assessment of additional power losses in electric networks 0.38 kv on the basis of experimental data. *Advances in current natural sciences*. 2014; 11 (3):64-67.
27. Zhelezko YuS, Artemyev AV, Savchenko OV. *Calculating, analyzing, and standardizing the power losses in power grids: a practical calculation guidebook*. Moscow: ENAS, 2004.
28. Mokhov VA. The application of agent-based metaheuristics in realization of technological chain of energy losses minimization. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. TECHNICAL SCIENCES*. 2021; 1(209):18-26. (In Russ). doi: 10.17213/0321-2653-2021-1-18-26.
29. Vorotnitsky VE, Zhelezko YuS, Kazantsev VN, et al; Kazantsev VN., editors. *Energy losses in power system grids*. Moscow: Energoatomizdat, 1983.

**Authors of the publication**

*Aleksandr A. Pesterev* - South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov, Novocheerkassk, Russia. *ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1683-7521>, [pesterevaa@srspu.ru](mailto:pesterevaa@srspu.ru)*

*Sergey S. Kostinskiy* - South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M.I. Platov, Novocheerkassk, Russia. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>, [mirovingen1987@mail.ru](mailto:mirovingen1987@mail.ru)*

*Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика.*

|                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| <i>Получено</i>        | <i>03.07.2023г.</i> |
| <i>Отредактировано</i> | <i>17.07.2023г.</i> |
| <i>Принято</i>         | <i>24.07.2023г.</i> |