

Научная статья

УДК 621.316.727

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29303>



А.А. Завалов¹✉, И.С. Кузьмин², В.С. Куликовский¹

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия;

² ООО ГК «Рутас», г. Красноярск, Россия

✉ zavalovartem@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДА В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ ГОРОДОВ

Аннотация. Использование современных однофазных бытовых электроприборов и оргтехники приводит к значительному потреблению реактивной мощности электропотребителями городов. Неравномерная нагрузка по фазам в городских четырёх- и пятипроводных электрических сетях до 1000 В создаёт условия для термического разрушения нейтрального провода из-за протекания в нём токов близких по значению или превышающих токи в фазах. Для обоснования рациональной системы компенсации реактивной мощности необходимо провести анализ электропотребления городских электропотребителей, а для подтверждения актуальности задачи снижения тока в нейтральном проводе сети проанализировать аварийность городских электрических сетей до 1000 В. Решением задачи исключения условий для термического разрушения нейтрального провода может являться реконструкция городских кабельных линий с целью замены на линии с большим сечением нейтрального провода. Однако данное решение является весьма трудоёмким и дорогостоящим. Целью данного исследования является определение возможности снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений с помощью эффективной компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: неравномерная и несимметричная нагрузка, отгорание нейтрального провода, компенсация реактивной мощности, компьютерное моделирование, Matlab/Simulink, системы электроснабжения городов.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (проект № 18261ГУ/2022)

Для цитирования:

Завалов А.А., Кузьмин И.С., Куликовский В.С. Влияние компенсации реактивной мощности на термическую устойчивость нейтрального провода в низковольтных сетях городов // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29303>



A.A. Zavalov¹✉, I.S. Kuzmin², V.S. Kulikovsky¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

² LLC GC "Rutas", Krasnoyarsk, Russia

✉ zavalovartem@mail.ru

INFLUENCE OF REACTIVE POWER COMPENSATION ON THERMAL STABILITY OF NEUTRAL WIRE IN LOW VOLTAGE CITY NETWORKS

Abstract. The use of modern single-phase household electrical appliances and office equipment leads to significant reactive power consumption by power consumers of cities. Unbalanced load by phases in urban four- and five-wire electrical networks up to 1000 V creates conditions for thermal destruction of neutral wire due to the flow of currents close in value or exceeding currents in phases. To justify a rational reactive power compensation system, it is necessary to analyze the electrical consumption of urban power consumers. To confirm the relevance of current reducing task in neutral wire of network, it is necessary to analyze accident rate of urban electrical networks up to 1000 V. Solution to the problem of eliminating conditions for thermal destruction of neutral wire can be the reconstruction of urban cable lines in order to replace them with lines with a large neutral wire section. However, this solution is very labor intensive and expensive. The purpose of this study is to determine whether it is possible to reduce current in neutral wire to acceptable continuous values using effective reactive power compensation.

Keywords: uneven and unbalanced load, neutral wire burnout, reactive power compensation, computer simulation, Matlab/Simulink, urban power supply systems.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Innovation Promotion Fund (Project No. 18261GU/2022)

Citation:

A.A. Zavalov, I.S. Kuzmin, V.S. Kulikovsky, Influence of reactive power compensation on thermal stability of neutral wire in low voltage city networks, Global Energy, 29 (03) (2023) 43–56, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29303>

Введение. Низковольтные системы электроснабжения городов России являются трёхфазными четырёх или пятипроводными.

В городской среде, как правило, используются однофазные электроприборы, имеющие активно-индуктивный характер нагрузки и подключенные между фазой и нейтральным проводом [1–4]. Это обуславливает несимметричный и неравномерный характер распределения нагрузки по фазам и высокий уровень потребления реактивной мощности (РМ) электропотребителями городов.

Неравномерная нагрузка в трёхфазных четырёх и пятипроводных электрических сетях приводит к протеканию значительных токов в нейтральном проводе близких или превышающих по значению токи в фазах, что при определённых обстоятельствах создаёт условия для его термического разрушения [5–8].

Наиболее остро данная проблема стоит для кабельных линий (КЛ) городов, выполненных по стандартам советского времени с заниженным сечением нейтрального провода по сравнению с сечением фазных проводов, которые и в настоящее время находятся в эксплуатации [9–11].



Термическое разрушение нейтрального провода при неравномерной нагрузке по фазам приводит к перекосу фазных напряжений, что, в свою очередь, может явиться причиной массового выхода из строя используемого электрооборудования [12, 13].

Целью настоящего исследования является определение закономерностей изменения тока в нейтральном проводе КЛ в зависимости от неравномерности активной и реактивной нагрузок по фазам сети, а также изучение возможности снижения тока в нейтральном проводе с помощью компенсации реактивной мощности (КРМ) до допустимых длительных значений.

Для достижения поставленной цели необходимо изучить электропотребление электропотребителей, подключенных к городским распределительным сетям до 1000 В, и провести анализ аварийности данных сетей. На основе математического моделирования необходимо исследовать влияние разных видов КРМ на величину снижения тока в нейтральном проводе КЛ.

Анализ электропотребления городских электропотребителей и аварийности городских электрических сетей до 1000 В

Электропотребление городских электропотребителей было изучено на примере города Дудинки, расположенного в одном из северных регионов России, в системе электроснабжения которого эксплуатируются КЛ с заниженным сечением нейтрального провода по сравнению с сечением фазных проводов. Для этого использовались следующие приборы: прибор комплексного контроля ПКК-57 и анализатор качества электрической энергии модели Metrel MI 2292.

Изучалось электропотребление следующих типов электропотребителей: школы, детские сады, учреждения средне-специального образования, административные здания, торгово-развлекательные и спортивные сооружения, жилые дома.

Фиксировались и рассчитывались следующие величины: ток в фазах сети, фазное и линейное напряжение, активная, реактивная и полная мощность, коэффициент мощности и коэффициент РМ в определённые промежутки времени суток.

Уровень неравномерности нагрузки по отдельным фазам сети определялся на основе коэффициентов неравномерности потребления активной и реактивной мощности.

Величина коэффициента неравномерности потребления активной мощности определялась следующим выражением:

$$\gamma = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}, \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальное значение активной мощности в одной из фаз сети, P_{\min} – минимальное значение активной мощности в одной из фаз сети.

Величина коэффициента неравномерности потребления РМ определялась следующим выражением:

$$\delta = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}, \quad (2)$$

где Q_{\max} – максимальное значение РМ в одной из фаз сети, Q_{\min} – минимальное значение РМ в одной из фаз сети.

Предельные значения коэффициента РМ, потребляемой в часы больших и малых суточных нагрузок электрической сети определяет приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. № 380. Так для электрических сетей до 1000 В предельное значение коэффициента РМ в часы больших суточных нагрузок устанавливается равным 0,35, а в часы малых суточных нагрузок равным 0.

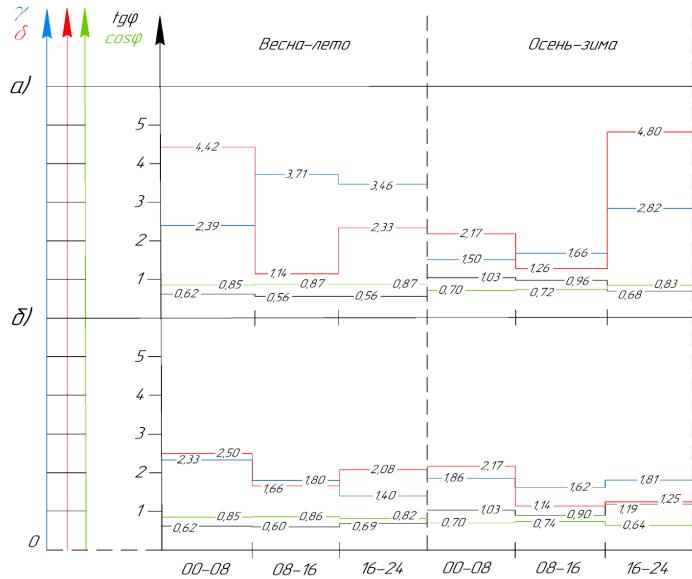


Рис. 1. График изменения γ , δ , $\cos\phi$, $\tg\phi$ для а) школа №4 (силовая часть), б) школа №4 (освещение)
Fig. 1. Schedule of changes in γ , δ , $\cos\phi$, $\tg\phi$ for a) school No. 4 (power equipment), b) school No. 4 (lighting)

Анализ электропотребления городскими электропотребителями показал, что зафиксированные значения коэффициента РМ превышают нормируемые для всех исследованных объектов. При этом, как правило, зафиксированные значения превышают нормируемые как в часы малых суточных нагрузок, так и в часы больших суточных нагрузок, а значения коэффициента РМ в зимний период года превышают значения в летний период. Также было отмечено, что количество подъездов и этажность не оказывают существенного влияния на изменение коэффициента РМ у жилых многоэтажных домов.

В качестве примера на рис. 1 представлены графики распределения $\cos\phi$, $\tg\phi$, γ и δ для электропотребителя школа №4.

Для школ значения коэффициента РМ находятся в диапазоне от 0,13 до 1,14 в летний период года и от 0,23 до 1,43 в зимний период года, для детских садов от 0,13 до 1,20 в летний период года и от 0,19 до 1,33 в зимний период, для техникума от 0,17 до 0,70 в летний период года и от 0,29 до 1,17 в зимний период, для общежития техникума от 0,38 до 1,33 в летний период года и от 0,50 до 1,14 в зимний период, для административных зданий (полиция, администрация) от 0,08 до 0,46 в летний период года и от 0,18 до 1,30 в зимний период, для торгово-развлекательных и спортивных сооружений (бассейн, фитнес центр, торгово-развлекательный центр) от 0,11 до 0,72 в летний период года и от 0,29 до 1,26 в зимний период, для жилых домов (5ти этажные и 9ти этажные) от 0,18 до 1,00 в летний период года и от 0,21 до 1,29 в зимний период, для гостиницы (5ти этажная) от 0,42 до 0,84 в летний период года и от 0,38 до 1,08 в зимний период.

Оценка неравномерности потребления активной и реактивной мощности по фазам сети показала, что для школ значения γ и δ находятся в диапазоне от 1,08 до 5,60 и от 1,14 до 5,17 соответственно, для детских садов от 1,14 до 4,60 и от 1,16 до 4,80 соответственно, для техникума от 1,32 до 2,25 и от 1,55 до 4,50 соответственно, для общежития техникума от 1,27 до 2,25 и от 1,22 до 2,67 соответственно, для административных зданий от 1,21 до 4,00 и от 1,36 до 3,33 соответственно, для торгово-развлекательных и спортивных сооружений от 1,18 до 3,00 и от 1,25 до 3,80 соответственно, для жилых домов от 1,20 до 5,33 и от 1,00 до 5,00 соответственно, для гостиницы от 1,24 до 4,41 и от 1,06 до 7,60 соответственно.



Таким образом, максимальное значение коэффициента неравномерности потребления активной мощности по фазам сети достигает 5,60, а коэффициента неравномерности потребления РМ 7,60. Значения коэффициента РМ достигают 1,43, что более чем в 4 раза превышает нормируемое значение.

На основании чего можно утверждать, что в низковольтных системах электроснабжения городов требуется КРМ.

Однако применительно к низковольтным системам электроснабжения городов с установленной неравномерной реактивной нагрузкой по фазам сети классическая КРМ с симметричным принципом компенсации по фазам будет иметь низкую эффективность ввиду возможной недокомпенсации и/или перекомпенсации РМ в отдельных фазах. В таком случае необходимо использовать компенсацию с принципом автоматической независимой пофазной КРМ, которая исключает возможность возникновения режимов недокомпенсации и перекомпенсации.

Для подтверждения актуальности задачи снижения тока в нейтральном проводе с целью предотвращения его термического разрушения на примере города Дудинки за период с 2010 по 2015 год было рассмотрено 215 аварийных отключений отходящих фидеров от 13 трансформаторных подстанций.

При анализе аварийности рассматривались следующие аварийные режимы: трёхфазное короткое замыкание (КЗ), двухфазное КЗ, однофазное КЗ, перегрузка, обрыв силовых или нейтральной жил кабеля. Также рассматривались последствия аварийного режима: термическое разрушение кабеля, термическое разрушение коммутационного аппарата, выход из строя электроприборов у электропотребителей.

В табл. 1 приведён количественный анализ аварийных отключений в сетях до 1000 В города Дудинки.

Таблица 1
Количественный анализ аварийных отключений в сетях до 1000 В города Дудинки

Table 1

Quantitative analysis of emergency shutdowns in networks up to 1000 V in the city of Dudinka

№	Вид аварии	Кол-во аварийных отключений	Доля в общем числе аварийных отключений, %	Последствия аварии					
				Термическое разрушение КЛ		Разрушение ком. аппарата		Выход из строя электроприборов	
				кол-во	доля, %	кол-во	доля, %	кол-во	доля, %
1	3х фазное КЗ	21	9,77	2	0,9	2	0,9	—	—
2	2x фазное КЗ	25	11,63	3	1,4	1	0,5	—	—
3	1-фазное КЗ	37	17,21	23	10,7	—	—	—	—
4	Перегрузка	45	20,93	19	8,8	—	—	—	—
5	Обрыв (отгорание) фазы	8	3,72	—	—	—	—	—	—
6	Термическое разрушение нейтрального провода	79	36,74	72	33,5	—	—	68	31,6
7	Итого	215	100,00	119	55,3	3	1,40	68	31,6



Количественный анализ аварийных отключений показал, что основными авариями в сетях до 1000 В города Дудинки являются: однофазное КЗ, перегрузка и термическое разрушение нейтрального провода. При этом в 68 случаях отгорания нейтрального провода из 79 происходил выход из строя бытовых электроприборов и оргтехники.

Из-за неравномерной и несимметричной нагрузки по фазам в нейтральном проводе могут протекать значительные токи, которые приводят к интенсивному его нагреву, что, в свою очередь, может вызвать термическое разрушение изоляции между нейтральным и фазным проводом кабеля, которое и приведёт к возникновению однофазного КЗ [14].

Следовательно, неравномерная и несимметричная нагрузка по фазам сети является основной причиной термического разрушения нейтрального провода и возникновения однофазных КЗ, что подтверждает актуальность задачи снижения тока в нейтральном проводе.

Для предотвращения термического разрушения нейтрального провода необходимо реконструировать существующие сети с заменой кабелей на кабели с большим сечением нейтрального провода, равного или более сечению фазных проводов. Также для решения данной проблемы может бытьложен дополнительный нейтральный провод. Однако данные решения требуют значительных финансовых затрат и направлены на решение только одной задачи снижения аварийности городских сетей.

Данная проблема может быть решена за счёт эффективной КРМ, которая позволит не только сократить потери электрической энергии и увеличить пропускную способность систем электроснабжения, но и снизить аварийность электрических сетей до 1000 В.

Для подтверждения данной гипотезы необходимо провести исследования возможности снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений с помощью КРМ.

Исследование возможности снижения тока в нейтральном проводе с помощью компенсации реактивной мощности

Исследование влияния неравномерности нагрузки на величину тока в нейтральном проводе в реальных условиях эксплуатации КЛ является сложной задачей, которую оптимально выполнить на основе математического (компьютерного) моделирования с помощью программной среды Matlab/Simulink.

На рис. 2 приведена схема построенной компьютерной модели для изучения влияния неравномерности нагрузки на величину тока в нейтральном проводе, а также возможности снижения данного тока с помощью разных способов КРМ.

С учётом установленной неравномерности активной и реактивной нагрузок в электрических сетях до 1000 В города Дудинки моделирование неравномерности осуществлялось в диапазоне от 1 до 10. Измерялись и фиксировались токи в фазах сети и нейтральном проводе, фазные и линейные напряжения.

Оценка возможности снижения тока в нейтральном проводе с помощью КРМ осуществлялась на примере алюминиевого кабеля сечением 3x95+1x50, который зачастую используется в городских системах электроснабжения.

Для определения значений допустимого длительного тока использовались данные приведённые в 7 издании ПУЭ. Принимался кабель с алюминиевыми жилами с резиновой или пластмассовой изоляцией в свинцовой, поливинилхлоридной и резиновой оболочках, при прокладке в земле с сечением фазных проводов 95 mm^2 и сечением нейтрального провода 50 mm^2 , допустимый длительный ток в фазах сети принимался равным 255 А, допустимый длительный ток в нейтральном проводе 175 А. Понижающий коэффициент 0,92 для четырёхжильных кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ не применялся.

Результаты компьютерного моделирования были оформлены в виде зависимостей тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной (индуктивной) нагрузки при различных нерав-

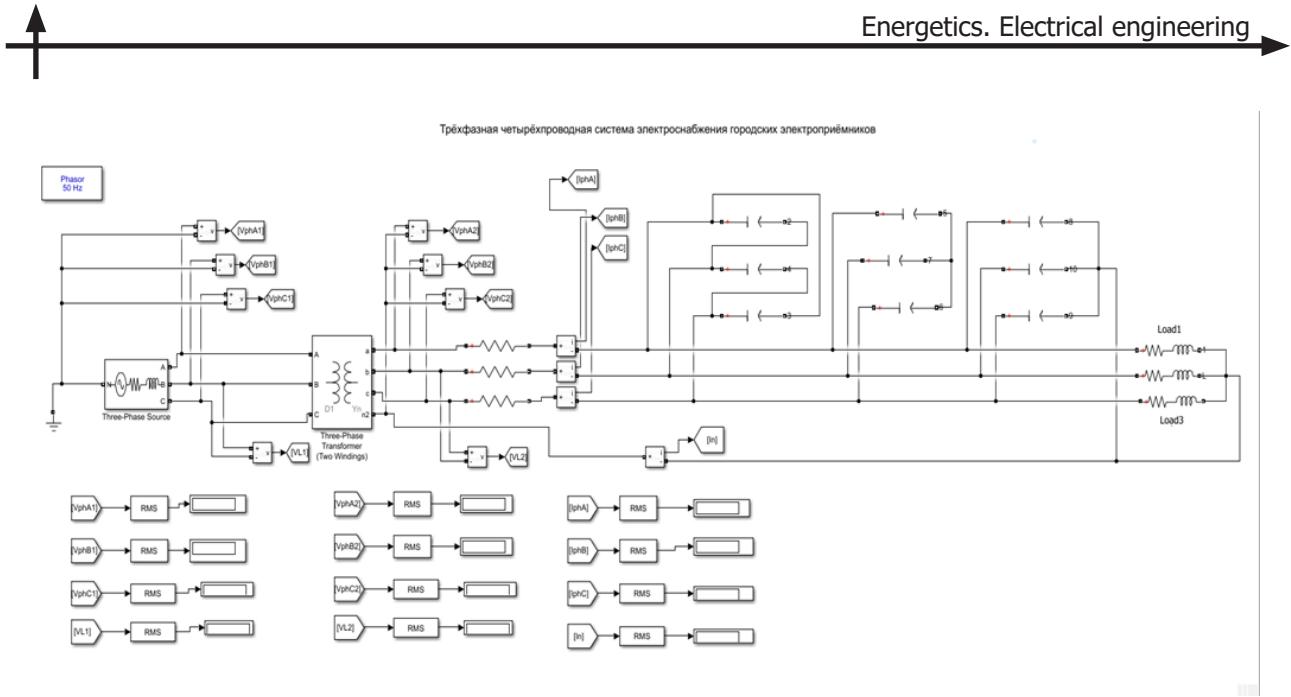


Рис. 2. Схема компьютерного моделирования электроэнергетической системы города

Fig. 2. Scheme of computer simulation of city electric power system

номерностях активной нагрузки. Коэффициент реактивной мощности принимался равным 0,95. Полная мощность рассчитывалась таким образом, чтобы ток в фазах не превышал допустимый длительный ток.

На рис. 3 приведены зависимости тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной нагрузки без учёта КРМ, где цифрами от 1 до 10 обозначены кривые значений тока в нейтральном проводе при различных неравномерностях по активной нагрузке (1: $\gamma = 1$; 2: $\gamma = 2$; 3: $\gamma = 3$; 4: $\gamma = 4$; 5: $\gamma = 5$; 6: $\gamma = 6$; 7: $\gamma = 7$; 8: $\gamma = 8$; 9: $\gamma = 9$; 10: $\gamma = 10$). Цифрам от 1 до 10 соответствуют следующие цвета: 1 – чёрный, 2 – жёлтый, 3 – коричневый, 4 – серый, 5 – зелёный, 6 – голубой, 7 – синий, 8 – тёмно-синий, 9 – фиолетовый, 10 – розовый.

Красной линией обозначено предельное значение допустимого длительного тока в нейтральном проводе, не вызывающего его термическое разрушение.

Анализ полученных зависимостей показал, что ток в нейтральном проводе не превышает допустимых длительных значений при неравномерности активной нагрузки от 1 до 10 и неравномерности реактивной нагрузки от 1 до 3,5. Соответственно, можно утверждать, что с высокой вероятностью в данных диапазонах неравномерностей активной и реактивной нагрузок термического разрушения нейтрального провода не произойдёт. В то же время при неравномерности реактивной нагрузки сверх полученного диапазона возможно отгорание нейтрального провода.

На рис. 4 представлены зависимости тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной нагрузки при симметричной КРМ, при которой компенсация производится на одинаковую величину в каждой фазе, а конденсаторы собираются по схеме «треугольник» или «звезда без нейтрального провода».

Анализ полученных зависимостей показал, что ток в нейтральном проводе также, как и до КРМ, не превышает допустимых длительных значений при неравномерности активной нагрузки от 1 до 10 и неравномерности реактивной нагрузки от 1 до 3,5. Следовательно, симметричная КРМ не эффективна в задаче снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений и предотвращения его термического разрушения.

Также было установлено, что влияние симметричной компенсации на ток в нейтральном проводе практически идентично и не зависит по какой из трёх фаз сети происходит управлением симметричной КРМ.

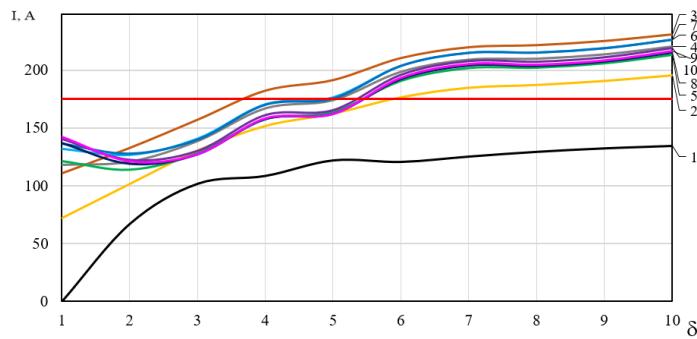


Рис. 3. Зависимости значений тока в нейтральной проводе от δ для кабеля 3x95+1x50

Fig. 3. Dependences of current values in neutral wire on δ for cable 3x95+1x50

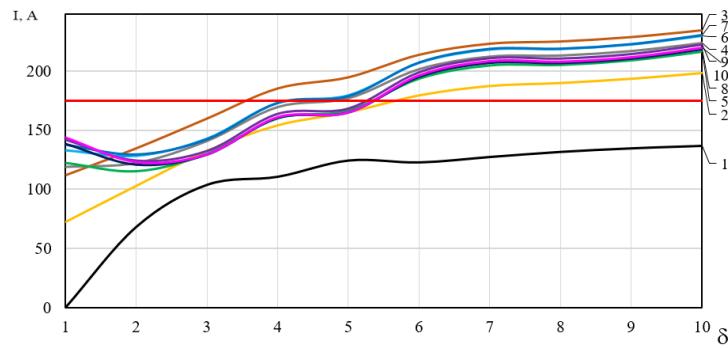


Рис. 4. Зависимости значений тока в нейтральной проводе от δ для кабеля 3x95+1x50 при симметричной КРМ

Fig. 4. Dependences of current values in neutral wire on δ for cable 3x95+1x50 with symmetrical reactive power compensation

При независимой пофазной КРМ измерение и регулирование РМ производится по каждой фазе в отдельности независимо друг от друга, а конденсаторы собираются по схеме «звезда с заземлённой нейтральной точкой».

Функциональная схема устройства автоматической независимой пофазной КРМ приведена на рис. 5 [15, 16].

Устройство автоматической независимой пофазной КРМ принципиально отличается от известных в настоящее время принципом регулирования мощности, которое осуществляется независимо пофазно в отличие от симметричного регулирования в известных устройствах, а также конфигурацией соединения конденсаторов по схеме «звезда с заземлённой нейтральной точкой» в отличие от схем соединения конденсаторов «звездой» или «треугольником» в известных устройствах [17–19].

На рис. 6 представлены зависимости тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной нагрузки при независимой пофазной КРМ.

Анализ полученных зависимостей показал, что ток в нейтральном проводе не превышает допустимые длительные значения во всём диапазоне неравномерностей как активной, так и реактивной нагрузок.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтверждают возможность исключения термического разрушения нейтрального провода за счёт снижения протекающего в

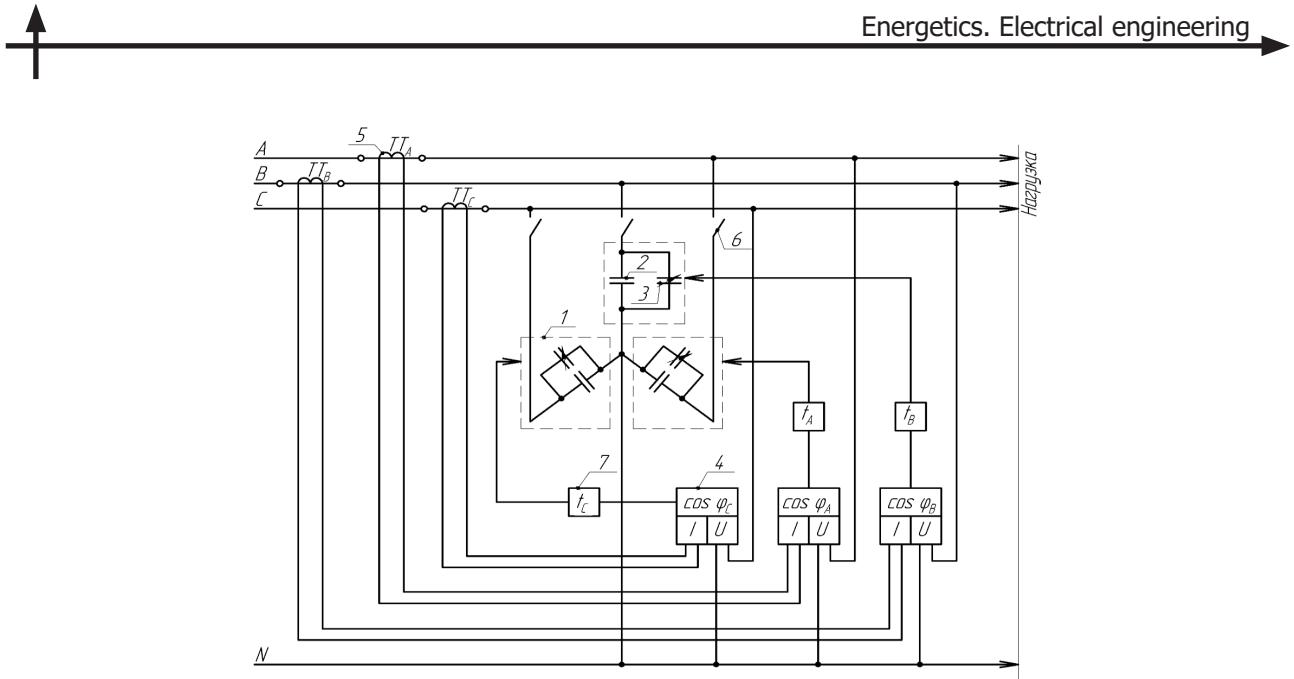
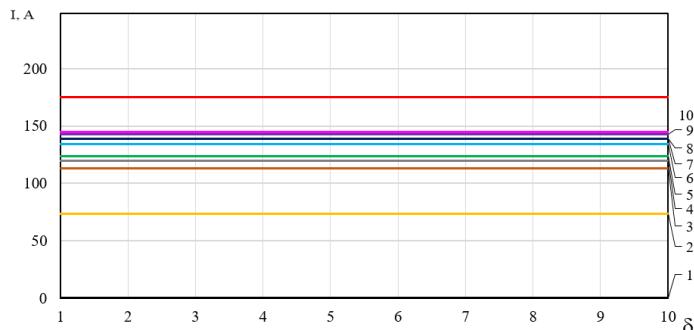


Рис. 5. Функциональная схема устройства автоматической независимой пофазной КРМ

Fig. 5. Functional diagram of the device for automatic independent individual phase reactive power compensation

Рис. 6. Зависимости значений тока в нейтральной проводе от δ для кабеля 3x95+1x50 при независимой пофазной КРМFig. 6. Dependences of current values in neutral wire on δ for cable 3x95+1x50 with independent individual phase reactive power compensation

нём тока до допустимых длительных значений с помощью эффективной КРМ по принципу независимой пофазной компенсации без применения индуктивных элементов, подключаемых между нейтральным проводом сети и нейтральной точкой конденсаторов, используемых в конденсаторных симметрирующих устройствах.

Симметрирующие устройства для трёхфазных сетей с нейтральным проводом имеют систему управления от уровня несимметрии токов и напряжений в сети до 1000 В или от тока в нейтральном проводе, а КРМ является второстепенной функцией, регулирование мощности осуществляется симметрично по фазам сети. В предлагаемом устройстве используется система управления от коэффициента мощности в отдельных фазах сети с независимым пофазным регулированием мощности, что принципиально отличает предлагаемое устройство от известных симметрирующих устройств [20–24].

Следовательно, независимая пофазная КРМ при использовании в низковольтных системах электроснабжения городов с преобладающей неравномерной и несимметричной нагрузкой по фазам сети позволит не только снизить потери электроэнергии и увеличить пропускную способность систем электроснабжения, но и снизить аварийность электрических сетей до 1000 В городов.

Заключение

Анализ электропотребления электропотребителей города Дудинки показал значительное превышение коэффициента РМ по сравнению с нормативными значениями у всех исследуемых объектов. Данное обстоятельство указывает на необходимость КРМ в низковольтных системах электроснабжения городов.

Также было установлено, что потребление РМ в одной из фаз сети может отличаться в 7,6 раза по сравнению с потреблением другими фазами, что позволяет сделать вывод о неэффективности симметричной КРМ в городских электрических сетях до 1000 В и рациональности применения независимой пофазной компенсации.

Анализ аварийности городских сетей до 1000 В города Дудинки показал, что на термическое разрушение нейтрального провода приходится почти 37% от общего числа аварийных отключений. Это подтверждает актуальность решения задачи снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений.

На основе компьютерного моделирования выявлена возможность снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений с помощью независимой пофазной КРМ.

Независимая пофазная КРМ позволяет не только снизить потери электроэнергии и увеличить пропускную способность систем электроснабжения, но и сократить количество аварийных отключений в электрических сетях до 1000 В.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А. Повышение эффективности компенсации реактивной мощности на основе устройств пофазной компенсации // Журнал Сибирского федерального ун-та. Техника и технологии. 2020. № 13 (1). С. 14–24.
- [2] Иванов И.В. Определение реактивной составляющей тока с помощью преобразования Кларка-Парка // Поколение будущего. Взгляд молодых учёных: Сб. научных статей. Курск: Юго-западный гос. ун-т., 2022. С. 27–30.
- [3] Мещеряков В.Н., Белоусов А.С. Система снижения пусковых токов и момента однофазного асинхронного двигателя // Информационные системы и технологии ИСТ-2021: Сб. трудов конференции. Нижний Новгород: Нижегородский гос. тех. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2021. С. 251–256.
- [4] Белянский С.В. Исследование влияния бытовых электрических приемников на показатели качества электроэнергии // Молодёжь и научно-технический прогресс: Сб. трудов конференции. Вып. 3. Губкин: ООО «Ассистент плюс», 2019. С. 11–15.
- [5] Белицкий А.А., Шклярский Я.Э. Компенсация несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырёхпроводных сетях низкого напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 11 (2). С. 531–540.
- [6] Moghaddam H.A., Vahedi A., Ebrahimi S.H. Optimum control strategy for shunt active filter under disturbed AC voltage and unbalanced load conditions in 4-wire power system, 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, Iran, (2017) 217–222.
- [7] Ojo A., Awodele K., Sebitosi A. Load Compensation in a Three-Phase Four Wire Distribution System Considering Unbalance, Neutral Current Elimination and Power Factor Improvement, Southern African Uni-



versities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, (2019) 389–394.

[8] **Guo Z.Q., Panda S.K., Prasanna I.V.** Design of new control strategies for a four-leg three-phase inverter to eliminate the neutral current under unbalanced loads, International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA), Hiroshima, Japan, (2014) 1580–1585.

[9] **Бершадский И.А., Якимишина В.В., Наглюк Е.Я.** Влияние несинусоидальности и несимметрии в четырехпроводной сети непромышленных потребителей на снижение пропускной способности кабелей // Вестник Донецкого национального технического ун-та. 2020. № 2 (20). С. 18–25.

[10] **Лакомов И.В., Помогаев Ю.М., Аксенов И.И.** Особенности расчета электрической сети с газоразрядными лампами // Современные научно-практические решения в АПК: Сб. трудов конференции. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2017. С. 132–135.

[11] **Белов А.В., Ильин Ю.П., Смирнов А.П.** Устройство контроля обрыва нулевого провода в сетях напряжением 0,38 кВ // АПК России. 2018. Т. 25. № 1. С. 80–88.

[12] **Самохин В.И., Самохин Д.В., Сухоставский И.В., Бабкин Е.Е.** Основные направления энергосбережения на предприятиях и оборудование, используемое для энергосбережения // Электронные и информационные системы. 2020. № 1 (24). С. 63–76.

[13] **Кудрина А.Е., Зеленый А.А., Колмаков В.О.** Перекос фаз в трехфазной сети // Инновационные научные исследования. 2021. № 1-1 (3). С. 62–83.

[14] **Наумов И.В.** Симметрирование режимов работы внутренних электрических трёхфазных сетей как средство снижения пожарной опасности // Актуальные вопросы аграрной науки. 2021. № 38. С. 19–26.

[15] **Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А.** Устройство для пофазной компенсации реактивной мощности. Пат. 2697259 Российская Федерация, МПК7 H 02 J 3/18; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2019105614; заявл. 27.02.2019; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23. 9 с.: ил.

[16] **Kuzmin R.S., Zavalov A.A., Kuzmin S.V.** Influence of Reactive Power Compensation on Power Quality in Grids Up to 1000V, Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, (2020) 1–5.

[17] **Максачев Ю.А., Саблин А.Ю., Шрамек В.Б.** Устройство компенсации реактивной мощности. Пат. 75517 Российская Федерация, МПК H 02 J (2006.01); заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Русская электротехническая компания» («РУСЭЛКОМ»). № 2008110903/22; заявл. 21.03.2008; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 22. 6 с.: ил.

[18] **Антонов С.В., Антонов И.С., Лычагов С.А., Мосолов В.Г.** Установка конденсаторная для компенсации реактивной мощности. Пат. 96670 Российская Федерация, МПК G04F 10/04; заявитель и патентообладатель Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики». № 2010102407/22; заявл. 27.01.2010; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 22. 6с.: ил.

[19] **Шишkin С.А.** Компенсация реактивной мощности однофазных нагрузок низковольтных систем электроснабжения // Силовая Электроника. 2007. № 3. С. 122–125.

[20] **Pana A., Baloi A., Molnar-Matei F.** From the Balancing Reactive Compensator to the Balancing Capacitive Compensator, Energies, № 11, (2018) 1–23.

[21] **Pana A., Baloi A., Molnar-Matei F.** Iterative Method for Determining the Values of the Susceptances of a Balancing Capacitive Compensator, Energies, 11 (10), (2018) 1–18.

[22] **Дулепов Д.Е., Дулепова Ю.М., Кондренкова Т.Е.** Результаты лабораторных исследований регулируемого симметрирующего устройства для трехфазной сети с нейтральным проводом // Вестник НГИЭИ. 2019. № 8 (99). – С. 44–54.

[23] Гринкруг М.С., Митин И.А., Ткачева Ю.И. Способ снижения потерь электроэнергии в распределительных сетях 6(10)/0,4 кВ. Пат. 2349012 Российская Федерация, МПК7 H02J3/00 H02J3/28; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КнАГТУ». 2007149185/09; заявл. 29.12.2007; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 7. 6 с.: ил.

[24] Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Криштопа Н.Ю., Кузнецов Е.С. Фильтросимметрирующее устройство для снижения потерь от несимметрии токов и повышения качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 2 (41). – С. 32–37.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАВАЛОВ Артем Александрович – ассистент, Сибирский федеральный университет, без степени.

E-mail: zavalovartem@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

КУЗЬМИН Илья Сергеевич – генеральный директор, ООО ГК "Румас", без степени.

E-mail: is@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7296-4178>

КУЛИКОВСКИЙ Валерий Сергеевич – заведующий кафедрой, доцент, Сибирский федеральный университет, канд. техн. наук.

E-mail: kvs47@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6019-8301>

REFERENCES

[1] S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov, Povysheniye effektivnosti kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na osnove ustroystv pofaznoy kompensatsii [Increase of Reactive Power Compensation Efficiency on the Basis of Individual Phase Compensation Devices] // Zhurnal Sibirskogo federalnogo un-ta. Tekhnika i tekhnologii. 2020. № 13 (1). S. 14–24.

[2] I.V. Ivanov, Opredeleniye reaktivnoy sostavlyayushchey toka s pomoshchyu preobrazovaniya Klarka-Parka [Determination of reactive component of current using the Clark-Park transformation] // Pokoleniye budushchego. Vzglyad molodykh uchenykh: Sb. nauchnykh statey. Kursk: Yugo-zapadnyy gos. un-t., 2022. S. 27–30.

[3] V.N. Meshcheryakov, A.S. Belousov, Sistema snizheniya puskovykh tokov i momenta odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya [System for reducing starting currents and torque of a single-phase asynchronous motor] // Informatsionnye sistemy i tekhnologii IST-2021: Sb. trudov konferentsii. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gos. tekh. un-t im. R.Ye. Alekseyeva, 2021. S. 251–256.

[4] S.V. Belyanskiy, Issledovaniye vliyaniya bytovykh elektricheskikh priyemnikov na pokazateli kachestva elektroenergii [Study of influence of household electrical receivers on power quality indicators] // Moshchnost i nauchno-tehnicheskiy progress: Sb. trudov konferentsii. Vyp. 3. Gubkin: OOO «Assistant plus», 2019. S. 11–15.

[5] A.A. Belitskiy, Ya.E. Shklyarskiy, Kompensatsiya nesinusoidalnykh tokov i tokov nesimmetrii v chetyrekhprovodnykh setyakh nizkogo napryazheniya [Compensation of non-sinusoidal and unbalance currents in four-wire low voltage networks] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. 2016. № 11 (2). S. 531–540.

[6] H.A. Moghaddam, A. Vahedi, S.H. Ebrahimi, Optimum control strategy for shunt active filter under disturbed AC voltage and unbalanced load conditions in 4-wire power system, 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, Iran, (2017) 217–222.



[7] **A. Ojo, K. Awodele, A. Sebitosi**, Load Compensation in a Three-Phase Four Wire Distribution System Considering Unbalance, Neutral Current Elimination and Power Factor Improvement, Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, (2019) 389–394.

[8] **Z.Q. Guo, S.K. Panda, I.V. Prasanna**, Design of new control strategies for a four-leg three-phase inverter to eliminate the neutral current under unbalanced loads, International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA), Hiroshima, Japan, (2014) 1580–1585.

[9] **I.A. Bershadskiy, V.V. Yakimishina, Ye.Ya. Naglyuk**, Vliyaniye nesinusoidalnosti i nesimmetrii v chetyrekhprovodnoy seti nepromyshlennykh potrebiteley na snizheniye propusknoy sposobnosti kabeley [Influence of non-sinusoidality and asymmetry in a four-wire network of non-industrial consumers on the reduction of cable throughput] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo un-ta. 2020. № 2 (20). S. 18–25.

[10] **I.V. Lakomov, Yu.M. Pomogayev, I.I. Aksenov**, Osobennosti rascheta elektricheskoy seti s gazorazryadnymi lampami [Features of the calculation of electrical network with gas discharge lamps] // Sovremennyye nauchno-prakticheskiye resheniya v APK: Sb. trudov konferentsii. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. Imperatora Petra I, 2017. S. 132–135.

[11] **A.V. Belov, Yu.P. Ilin, A.P. Smirnov**, Ustroystvo kontrolya obryva nulevogo provoda v setyakh napryazheniyem 0,38 kV [Device for monitoring the break of neutral wire in networks with a voltage of 0.38 kV] // APK Rossii. 2018. T. 25. № 1. S. 80–88.

[12] **V.I. Samokhin, D.V. Samokhin, I.V. Sukhostavskiy, Ye.Ye. Babkin**, Osnovnyye napravleniya energosberezeniya na predpriyatiyakh i oborudovaniye, ispolzuyemoye dlya energosberezeniya [The main directions of energy saving at enterprises and equipment used for energy saving] // Elektronnyye i informatsionnyye sistemy. 2020. № 1 (24). S 63–76.

[13] **A.Ye. Kudrina, A.A. Zelenyy, V.O. Kolmakov**, Perekos faz v trekhfaznoy seti [Phase imbalance in a three-phase network] // Innovatsionnyye nauchnyye issledovaniya. 2021. № 1-1 (3). S. 62–83.

[14] **I.V. Naumov**, Simmetrirovaniye rezhimov raboty vnutrennikh elektricheskikh trekhfaznykh setey kak sredstvo snizheniya pozharnoy opasnosti [Symmetrization of operating modes of internal electrical three-phase networks as a means of reducing fire hazard] // Aktualnyye voprosy agrarnoy nauki. 2021. № 38. S. 19–26.

[15] **R.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov**, Ustroystvo dlya pofaznoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Device for independent individual reactive power compensation]. Pat. 2697259 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H 02 J 3/18; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sibirskiy federalnyy universitet». № 2019105614; zayavl.27.02.2019; opubl. 13.08.2019, Byul. № 23. 9 s.: il.

[16] **R.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, S.V. Kuzmin**, Influence of Reactive Power Compensation on Power Quality in Grids Up to 1000V, Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, (2020) 1–5.

[17] **Yu.A. Maksachev, A.Yu. Sablin, V.B. Shramek**, Ustroystvo kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Reactive power compensation device]. Pat. 75517 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H 02 J (2006.01); zayavitel i patentoobladatel Obshchestvo s ogranicennoy otvetstvennostyu «Russkaya elektrotehnicheskaya kompaniya» («RUSELKOM»). № 2008110903/22; zayavl.21.03.2008; opubl. 10.08.2008, Byul. № 22. 6 s.: il.

[18] **S.V. Antonov, I.S. Antonov, S.A. Lychagov, V.G. Mosolov**, Ustanovka kondensatornaya dlya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Capacitive unit for reactive power compensation]. Pat. 96670 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G04F 10/04; zayavitel i patentoobladatel Mezhregionalnoye obshchestvennoye uchrezhdeniye «Institut inzhenernoy fiziki». № 2010102407/22; zayavl.27.01.2010; opubl. 10.08.2008, Byul. № 22. 6s.: il.

[19] **S.A. Shishkin**, Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti odnofaznykh nagruzok nizkovoltnykh sistem elektrosnabzheniya [Reactive power compensation of single-phase loads of low-voltage power supply systems] // Silovaya Elektronika. 2007. № 3. S. 122–125.

[20] **A. Pana, A. Baloi, F. Molnar-Matei**, From the Balancing Reactive Compensator to the Balancing Capacitive Compensator, Energies, № 11, (2018) 1–23.

- [21] **A. Pana, A. Baloi, F. Molnar-Matei**, Iterative Method for Determining the Values of the Susceptances of a Balancing Capacitive Compensator, Energies, 11 (10), (2018) 1–18.
- [22] **D.Ye. Dulepov, Yu.M. Dulepova, T.Ye. Kondranenkova**, Rezul'taty laboratornykh issledovanii regul'ruyemogo simmetriruyushchego ustroystva dlya trekhfaznoy seti s neytralnym provodom [The results of laboratory studies of an adjustable balancing device for a three-phase network with a neutral wire] // Vestnik NGIEI. 2019. № 8 (99). – S. 44–54.
- [23] **M.S. Grinkrug, I.A. Mitin, Yu.I. Tkacheva**, Sposob snizheniya poter elektroenergii v raspredelitelnykh setyakh 6(10)/0,4 kV. Pat. 2349012 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H02J3/00 H02J3/28; zayavatel i paten-toobladatel GOUVPO «KnAGTU». 2007149185/09; zayavl. 29.12.2007; opubl. 10.03.2009, Byul. № 7. 6 s.: il.
- [24] **F.D. Kosoukhov, N.V. Vasilyev, N.Yu. Krishtopa, Ye.S. Kuznetsov**, Filtrosimmetriruyushcheye ustroystvo dlya snizheniya poter ot nesimmetrii tokov i povysheniya kachestva elektricheskoy energii v setyakh 0,38 kV // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2017. № 2 (41). – S. 32–37.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem A. Zavalov – Siberian Federal University.
E-mail: zavalovartem@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

Ilya S. Kuzmin – LLC GC «Rutas».
E-mail: is@rutas.group
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7296-4178>

Valery S. Kulikovsky – Siberian Federal University.
E-mail: kvs47@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6019-8301>

Поступила: 25.05.2023; Одобрена: 29.06.2023; Принята: 16.07.2023.
Submitted: 25.05.2023; Approved: 29.06.2023; Accepted: 16.07.2023.