

О выборе допустимых сечений проводникового материала внутренних электрических сетей при строительстве индивидуальных домовладений

Игорь Владимирович Наумов^{1,2}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского,

Иркутский р-он, пос. Молодежный, Россия,

professornaumov@list.ru

Аннотация. Целью является разработка программного комплекса, позволяющего исследовать применимость проводников разных сечений при монтаже внутренних электрических сетей в индивидуальном жилищном строительстве. В работе использовалась совокупность общенаучных методов: теории электрических цепей, численного анализа и визуализации графического редактора *Matlab*. Проведен анализ состояния индивидуального жилищного строительства в Иркутской области. Достоверно установлено, что одной из наиболее вероятных причин возгораний, связанных с сооружением внутренних электрических сетей индивидуальных домовладений, является несимметрия фазных токов, вызывающая дополнительные тепловые потери, способствующие возникновению пожароопасных ситуаций. Был выполнен тепловой расчет функционирования электрической сети при нормальных условиях эксплуатации, согласно которому получены выражения для определения предельно допустимых значений тока, протекающего в нулевом проводнике внутренней электрической сети дома. На основе разработанных алгоритмов и программ получены табличные значения предельных величин токов нулевой последовательности для различных сечений материала проводника и в разных температурных интервалах. На реальном примере доказана эффективность использования симметрирующих устройств для снижения последствий несимметричного электропотребления. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что одним из наиболее эффективных способов снижения пожарной опасности в индивидуальных жилых домах является реализация мероприятий по симметрированию режимов работы внутренней электрической сети жилого дома. По результатам исследования получены данные, которые могут быть интересны специалистам строительных организаций, а также сотрудникам МЧС России, контролирующим состояние пожарной безопасности индивидуальных жилых домов.

Ключевые слова: несимметрия фазных токов, ток нулевой последовательности, короткие замыкания, пожарная опасность, симметрирующее устройство, перераспределение электрических нагрузок потребителей

Для цитирования: Наумов И. В. О выборе допустимых сечений проводникового материала внутренних электрических сетей при строительстве индивидуальных домовладений // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 4. С. 589–599. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-589-599>.

Original article

On the choice of allowable cross-sections of conductor material in internal electrical networks when building individual households

Igor V. Naumov^{1,2}

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Yezhevsky,

Irkutsky district, Molodezhnyy settlement, Russia,

professornaumov@list.ru

Abstract. In this work, a software package was developed in order to investigate the applicability of conductors having different cross-sections for installing internal electrical networks in individual households. A combination of general scientific methods, including circuit theory, numerical analysis and visualisation using MATLAB graphical editor, was used. The state of individual households in the Irkutsk region was analysed. It was confirmed that one of the most common causes of combustion associated with the construction of internal electrical networks of individual households involves unbalanced phase currents, leading to additional heat losses, which give rise to fire hazards. A thermal calculation of the electric network functioning under normal operating conditions was carried out in order to obtain expressions for determining the maximum permissible values of the neutral conductor current of the internal electrical network of the house. These algorithms and programs were used to tabulate the limit values of the zero sequence currents for different cross-sections of the conductor material and temperature ranges. The efficiency of using balanced/unbalanced converters to mitigate the negative effects of unbalanced power consumption was demonstrated by a field test. It can be concluded that one of the most efficient ways to reduce fire hazards in individual houses involves balancing the operating modes of the internal electrical network. The obtained data may therefore be used by construction organisations, as well as the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, which monitors the fire safety of individual houses.

Keywords: phase current asymmetry, zero sequence current, short circuits, fire hazard, balancing device, redistribution of electrical loads of consumers

For citation: Naumov I. V. On the choice of allowable cross-sections of conductor material in internal electrical networks when building individual households. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022;12(4): 589-599. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-4-589-599>.

ВВЕДЕНИЕ

В недавно опубликованных материалах исследований отмечалось, что последние годы характеризуются повышенным интересом граждан Приангарья к строительству индивидуальных жилых домов (ИЖД) [1].

При этом, в соответствии с Указом Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204¹, в Иркутской области активно реализуются два региональных проекта – «Жилье» и «Обеспечение устойчивого сокращения непригодного для проживания жилищного фонда», что позволило за первое полугодие 2021 г. в Иркутской области построить более 413 тыс. м² индивидуальных жилых домов². И, не смотря на тот факт, что в связи с известными событиями, произошедшими в нашей стране, в 2022 г. строительство частных домов в Иркутской области снизилось на 2%, в сравне-

нии с прошлым годом³, тем не менее, прогрессирующий рост ИЖД не минуем. Об этом можно судить по прогнозам Программы, рассчитанной до 2024 г., которая предусматривает увеличение строительства ИЖД в России с нынешних 30–36 до 40 млн м² в год⁴, а в 2030 г. планируется строительство не менее 50 млн м² ИЖД в год⁵.

Как отмечается в [1], возрастание доли использования деревянных конструкций при строительстве индивидуальных домовладений связано и с ростом опасности возгораний этих строений.

При этом нами неоднократно отмечалось, что наиболее часто случающейся причиной возгораний в строениях, имеющих трёхфазный ввод электропитания, является значительная несимметрия фазных токов, возникающая вследствие несбалансированного

¹О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: указ Президента РФ // Правительство России: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf> (05.10. 2022).

²Министерство строительства Иркутской области. Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://irkobl.ru/sites/irkstroy/news/1228655/?type=original> (05.10. 2022).

³Строительство частных домов в Приангарье в 2022 году просело на 2% из-за экономической ситуации // Ирсити.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://ircity.ru/text/realty/2022/08/05/71545334/> (05.10.2022).

⁴Разработан проект программы по развитию индивидуального строительства в РФ // Специальный проект. Квадратный метр [Электронный ресурс]. URL: <https://rg.ru/2020/03/24/razrabotan-proekt-programmy-po-razvitiu-individualnogo-stroitelstva-v-rf.html> (05.10. 2022).

⁵Минстрой России разработал законопроект по развитию индивидуального жилищного строительства // Минстрой России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/minstroy-rossii-razrabotal-zakonoproekt-po-razvitiyu-individualnogo-zhilishchnogo-stroitelstva/> (05.10. 2022).

электропотребления группами электроприёмников (ЭП) во внутренней электрической сети ИЖД. Это обусловлено как неравномерным характером распределения ЭП по фазам трёхфазной электрической сети, так и случайным характером их коммутаций в процессе функционирования [2–4]. Вопросам несимметричного электропотребления в распределительных электрических сетях, а также внутренних электрических сетях индивидуальных жилищ, посвящено достаточное количество публикаций [5–18].

Как было отмечено ранее, возможность возникновения пожаров по указанной причине имеет место только в том случае, если ввод электрической энергии в помещение представлен трёхфазной системой напряжения. Если говорить о подобной проблеме в не столь отдалённом прошлом, следует отметить, что проблемы, как таковой, не существовало, поскольку индивидуальное жильё граждан в сельской местности получало электрическую энергию по неполнофазным (однофазным) ответвлениям, что, соответственно, не приводило к возникновению несбалансированных режимов.

В последние годы, с ростом индивидуальных домовладений и при развитии и многообразии современных электрических приемников, повышающих комфортность жизнеобеспечения граждан, практически каждый индивидуальный застройщик стремится осуществить трёхфазный ввод электрической энергии. Особенно актуальным и оправданным это стало в 2022 г., поскольку стоимость технологического подключения электропитания ИЖД возросла многократно (в 30 раз)⁶.

При трёхфазном (полнофазном) электропитании происходит значительный перегрев фазных проводников, поскольку, кроме токов прямой последовательности (соответствующих симметричному режиму), возникают дополнительные составляющие токов обратной и нулевой последовательности. Эти токи, протекая по фазным проводникам трёхфазной внутренней электрической сети ИЖД, осуществляют дополнительное выделение тепловой энергии.

При этом по нулевому рабочему и нулевому защитному проводнику (при использовании пяти проводной электрической сети)

будет протекать три тока нулевой последовательности, что в ещё большей степени способствует дополнительному тепловому перегреву.

Целью статьи является разработка методики и инструмента расчета предельных значений токов нулевой последовательности для различных сечений трёхфазных четырех- или пятипроводных изолированных проводников, используемых для электропередачи во внутренних электрических сетях коммунально-бытовых ИЖД.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- установить зависимость между допустимым предельным значением тока нулевой последовательности и сечением проводника;
- рассчитать предельные значения токов нулевой последовательности, соответствующие принятым сечениям используемых линий электропередачи во внутренних (внутридомовых) и наружных электрических сетях 0,4 кВ;
- на основе реальных измерений в действующих сетях 0,4 кВ произвести расчет несимметричного режима и установить пороговые значения потоков нулевой последовательности для исследуемых участков наружных и внутренних (внутридомовых) электрических сетей;
- рассмотреть возможность использования симметрирующих устройств с автоматически изменяющимися параметрами в исследуемых электрических сетях для снижения последствий несимметричного электропотребления.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретическую и методологическую базу исследования представляют изложенные в научной литературе и специальной периодической печати различные подходы к механизму определения симметричных составляющих токов и напряжений при несимметричном электропотреблении, теория теплового баланса нагрева проводниковых материалов, научные труды российских ученых и специалистов по исследованиям несимметричных режимов работы электрических сетей, а также функционированию средств симметрирования.

Информационную базу исследования составили Указы Президента и Правительства

⁶О внесении изменений в статью 23² Федерального закона «Об электроэнергетике: федер. закон от 26 января 2022 г. // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202160009?index=0&rangeSize=1> (05.10.2022);

О внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ по вопросам технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии к электрическим сетям: постановление Правительства РФ от 30 июня 2022 г. № 1178 // Официальный интернет-портал правовой информации [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207010048> (05.10.2022).

РФ, Правила устройств электроустановок, аналитические материалы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

В работе применялась совокупность общенаучных методов, в том числе теории электрических цепей, методов численного анализа, методы программирования и визуализации графического редактора *Matlab*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Математическая модель исследования

При протекании по нейтральному проводнику тока $I_N = 3I_0$, выделяется Джоулево количество тепловой энергии:

$$Q_1 = (3I_0)^2 \cdot r_{0N} \cdot l \cdot \tau. \quad (2)$$

С другой стороны выделенное тепло передается с поверхности нейтрального провода окружающему пространству. Условно (достаточно приближенно) можно считать окружающим пространством воздух, хотя на самом деле тепло будет передаваться внутри изолированного провода. С учетом принятого допущения будем считать, что тепло передается лучеиспусканием по следующему закону:

$$Q_2 = \varepsilon_{above} \cdot c_0 \cdot F_{Sur.} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \tau. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3), I_0 – ток нулевой последовательности; r_{0N} – удельное сопротивление материала нейтрального проводника; l – длина нейтрального провода; τ – время прохождения электропередачи; ε_{above} – приведенный коэффициент теплового излучения; $F_{Sur.}$ – площадь поверхности провода; T_1 и T_2 – температуры излучающей и принимающей поверхностей соответственно.

Допустимая температура нагрева излучающей поверхности, с учетом поправочного коэффициента⁷ для провода в резиновой (полихлорвиниловой) изоляции, составляет

$$T_1 = 65^\circ\text{C} + 273,15 = 338,15^\circ\text{K}.$$

Температура принимающей поверхности (при температуре среды, равной 20°C) составляет

$$T_2 = 20 + 273,15 = 293,15^\circ\text{K}.$$

$c_0 = 5,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$$\varepsilon_{above} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} - \text{приведенная}$$

степень черноты в замкнутой системе радиационного теплообмена, состоящей из двух серых тел⁸; ε_1 и ε_2 – интегральные степени черноты двух серых тел (материал проводника первого – полированный алюминий, изоляция проводника второго – полихлорвинил).

Основываясь на данных⁹, спустя определенное время количество теплоты, выделяемое в проводнике, будет уравниваться теплом, излучаемым с его поверхности. В соответствии с наступившим тепловым балансом можно определить максимальную величину тока нулевой последовательности, проходящего по нейтральному проводнику при несимметричном электропотреблении:

$$(3I_0)^2 \cdot r_{0N} \cdot l \cdot \tau = \varepsilon_{above} \cdot c_0 \cdot F_{Sur.} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \tau,$$

отсюда получаем

$$I_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{above} \cdot c_0 \cdot F_{Sur.} \cdot T}{9 \cdot r_{0N} \cdot l}}. \quad (4)$$

Подставляя (5) в (4), получим выражение для определения предельно допустимого тока нулевой последовательности для четырехпроводной трёхфазной линии электропередачи:

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{above} \cdot c_0 \cdot \pi \cdot d \cdot T}{r_{0N}}}, \quad (5)$$

где $T = \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4$, $F_{Sur.} = \pi \cdot d \cdot l$.

Полученная зависимость (5) характеризует следующее. При расчете несимметричного режима работы конкретного участка электрической сети 0,38, на основе разработанных методов и программ [12, 13], производится расчет симметричных составляющих токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Сравнение полученных значений для токов нулевой последовательности с рассчитанным предельным значением по выражению (5) для выбранного сечения нейтрального проводника позволяет сделать заключение о соответствии этого сечения реальному уровню несимметричного электропотребления и о возникновении (или отсутствии) угро-

⁷Правила устройств электроустановок. Поправочные коэффициенты на токи для кабелей, неизолированных и изолированных проводов и шин в зависимости от температуры земли и воздуха // Блог электрика [Электронный ресурс]. URL: <https://lemzspb.ru/dopustimyye-temperatury-nagreva-izolirovannykh-provodov> (06.10.2022).

⁸Теплообмен излучением // Portal.tpu.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PNB/learning/Thermodynamics/Tab3/Lecture18.pdf> (06.10.2022).

⁹Электроснабжение, электрические сети – нагрев проводов электрическим током // Forca.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://forca.ru/knigi/arhiv/elektrosnabzhenie-elektricheskie-seti/Page-18.html> (06.10.2022).

зы воспламенения.

Алгоритм и результаты исследования

На основе представленных выражений (2)–(5) по алгоритму (рис. 1) разработана Программа расчета предельного значения тока нулевой последовательности для раз-

ных сечений нейтрального проводника, реализованная в *Matlab*.

Расчет, произведенный по указанной программе, позволил получить предельно-допустимые значения для тока в нейтральном проводе для проводников разных сечений из меди и алюминия (рис. 2, табл. 1).

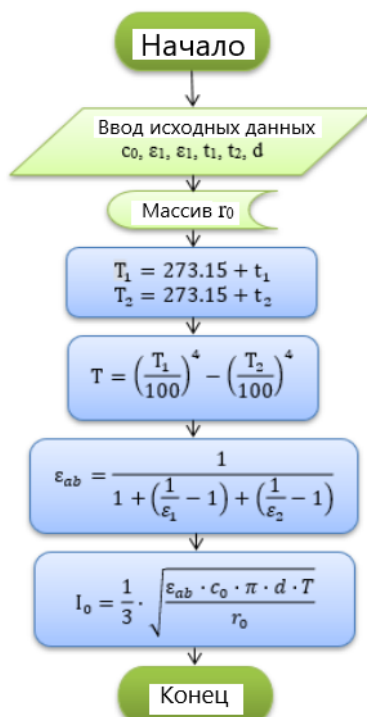


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета допустимого тока нулевой последовательности

Fig. 1. The calculating permissible zero sequence current algorithm block diagram

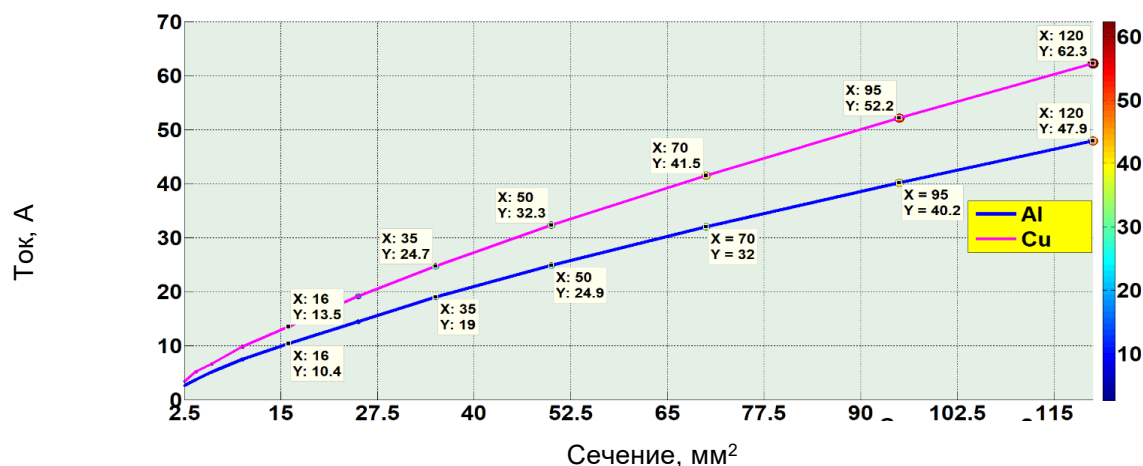


Рис. 2. Зависимость предельного значения тока нулевой последовательности в нейтральном проводнике с изоляцией из поливинилхлорида от его поперечного сечения

Fig. 2. Dependence of zero sequence current limit value in a neutral conductor with polyvinyl chloride insulation on its cross section

Полученные значения тока показывают, что в случае их превышения, температура поверхности нейтрального проводника превысит максимальное значение (65 °C), что приведет к нарушению изоляционных свойств проводника и соответствующим

условиям возникновения коротких замыканий и созданием пожароопасных ситуаций. Использование данных табл. 2 позволяет определить предельно-допустимое значение тока в нейтральном проводе для внутренних электропроводок зданий и сооружений.

Таблица 1. Предельные значения токовой нагрузки нейтрального проводника в трёхфазной четырёхпроводной линии электропередачи 0,4 кВ, выполненной изолированным проводником
Table 1. A neutral conductor current limit values in a three-phase four-wire 0.4 kV power transmission line made by an isolated conductor

Материал проводника	Сечение, мм ²	Предельно-допустимое значение тока (А) при значениях температуры окружающей среды											
		-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
Al	2,5	3,30	3,23	3,17	3,09	3,02	2,93	2,84	2,74	2,63	2,50	2,37	2,22
	4	4,70	4,61	4,52	4,41	4,30	4,18	4,05	3,90	3,74	3,57	3,38	3,16
	6	6,36	6,24	6,11	5,97	5,82	5,66	5,48	5,28	5,07	4,83	4,57	4,28
	10	9,37	9,20	9,01	8,80	8,58	8,33	8,07	7,78	7,47	7,12	6,73	6,30
	16	13,12	12,87	12,60	12,31	12,00	11,66	11,29	10,89	10,45	9,96	9,42	8,82
	25	18,19	17,85	17,48	17,08	16,64	16,17	15,66	15,10	14,49	13,82	13,07	12,24
	35	23,80	23,35	22,87	22,35	21,78	21,16	20,49	19,76	18,96	18,08	17,10	16,01
	50	31,21	30,62	29,99	29,30	28,55	27,75	26,87	25,91	24,86	23,70	22,42	20,99
	70	40,14	39,38	38,56	37,68	36,72	35,68	34,55	33,32	31,97	30,48	28,84	27,00
	95	50,50	49,55	48,52	47,41	46,21	44,90	43,48	41,92	40,22	38,35	36,28	33,97
Cu	120	60,10	58,97	57,75	56,43	54,99	53,44	51,74	49,90	47,87	45,65	43,18	40,43
	2,5	4,25	4,17	4,09	3,99	3,89	3,78	3,66	3,53	3,39	3,23	3,06	2,86
	4	6,48	6,36	6,23	6,09	5,93	5,77	5,58	5,38	5,16	4,92	4,66	4,36
	6	8,24	8,09	7,92	7,74	7,54	7,33	7,09	6,84	6,56	6,26	5,92	5,54
	10	12,30	12,07	11,82	11,55	11,25	10,94	10,59	10,21	9,80	9,34	8,84	8,27
	16	16,93	16,61	16,27	15,90	15,49	15,05	14,58	14,06	13,49	12,86	12,16	11,39
	25	24,11	23,66	23,17	22,64	22,06	21,44	20,76	20,02	19,21	18,31	17,32	16,22
	35	31,01	30,42	29,79	29,11	28,37	27,57	26,69	25,74	24,70	23,55	22,28	20,86
	50	40,56	39,80	38,97	38,08	37,11	36,06	34,92	33,67	32,31	30,80	29,14	27,28
	70	52,13	51,15	50,09	48,94	47,70	46,35	44,88	43,27	41,52	39,59	37,45	35,07
	95	65,60	64,36	63,03	61,58	60,02	58,32	56,47	54,46	52,25	49,82	47,13	44,13
	120	78,24	76,77	75,18	73,46	71,59	69,57	67,36	64,96	62,32	59,42	56,22	52,63

Кроме того, предлагаемое программное обеспечение позволяет установить предельное значение тока в нейтральном проводе и для наружных электрических сетей 0,4 кВ в различных диапазонах температур окружающей среды (см. табл. 1). При этом использование данных табл. 1 может быть применено при осуществлении проектирования наружной электрической сети, питающей внутреннюю электрическую сеть ИЖД.

Для того чтобы проанализировать реальный режим несимметричного электропотребления в действующей внутренней электрической сети 0,38 кВ, воспользуемся данными измерений¹⁰.

Исследования осуществлялись с 17 по 21 декабря 2021 г. на вводно-распределительном устройстве ИЖД, в г. Иркутске. В качестве инструмента измерений использовался сертифицированный прибор «Ресурс – UF2M» (заводской № 2337).

Для расчета несимметричных режимов исследуемой сети использовалась компьютерная программа «Unbalance-Modul»¹¹, разработанная на основе методов [12, 13].

Указанная программа позволяет осуществить расчет показателей, определяющих уровень несимметричного электропотребления и, кроме того, реализует возможность использования специальных симметрирующих устройств.

Параметры такого устройства рассчитываются для каждого изменения несбалансированной нагрузки внутреннего электропотребления ИЖД.

Более подробно работа такого устройства рассмотрена в работах¹² [19].

На рис. 3 представлены временные диаграммы изменения тока нулевой последовательности во внутренней электрической сети ИЖД до и после включения симметрирующего устройства (СУ).

Таблица 2. Максимально-допустимое значение тока в нейтральном проводе трёхфазного четырехпроводной электрической сети для внутренних электрических проводов жилых зданий
Table 2. The maximum permissible the current value in the neutral wire of the three-phase four-wire electrical network for internal residential buildings electrical wiring

Сечение, мм ²	Значение максимального тока в нейтральном проводнике с алюминиевой жилой в ПХВ изоляции, А	Значение максимального тока в нейтральном проводнике с медной жилой в ПХВ изоляции, А
2,5	2,625119	3,411836
4	3,744561	5,228995
6	5,06812	6,563987
10	7,465301	9,796973
16	10,44642	13,48627
25	14,48978	19,20515
35	18,95858	24,69701
50	24,85739	32,30685
70	31,9688	41,51998
95	40,22467	52,24841
120	47,87216	62,32222

Анализ рис. 3 показывает, что ток нулевой последовательности за время исследования принимает различные значения от минимального, равного 0,89 А, до максимального – 7,01 А. Среднее значение этого тока за период измерения составило 3,52 А.

Следовательно, ток в нейтральном проводнике, равный трем токам нулевой после-

довательности, в среднем составляет 10,6 А. Учитывая тот факт, что измерения производились на вводно-распределительном устройстве в помещении, в котором средняя температура окружающего воздуха составляла 5 °С, а сечение нулевой жилы трёхфазного кабеля, распределяющего электроэнергию по внутренней электрической сети ИЖД,

¹⁰Исследования осуществлены на ВРУ 0,4 кВ ИЖД.

¹¹Свидетельство о государственной регистрации программы «Unbalance-Modul» расчета режимов работы действующих электрических сетей 0,38 кВ с трёхфазной несимметричной нагрузкой и симметрирующим устройством Программы для ЭВМ. № 2022667513 / И. В. Наумов, А. А. Митягин, С. В. Подъячих от 21.09.2022 г.

¹²Наумов И. В. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских распределительных сетях 0,38 кВ с помощью симметрирующих устройств: дисс. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2002. 387 с.

составляло 6 мм², следовательно, на основании табл. 1, максимально допустимый ток

в нейтральном проводе кабеля, изготовленного из меди, не должен превышать 7,33 А.

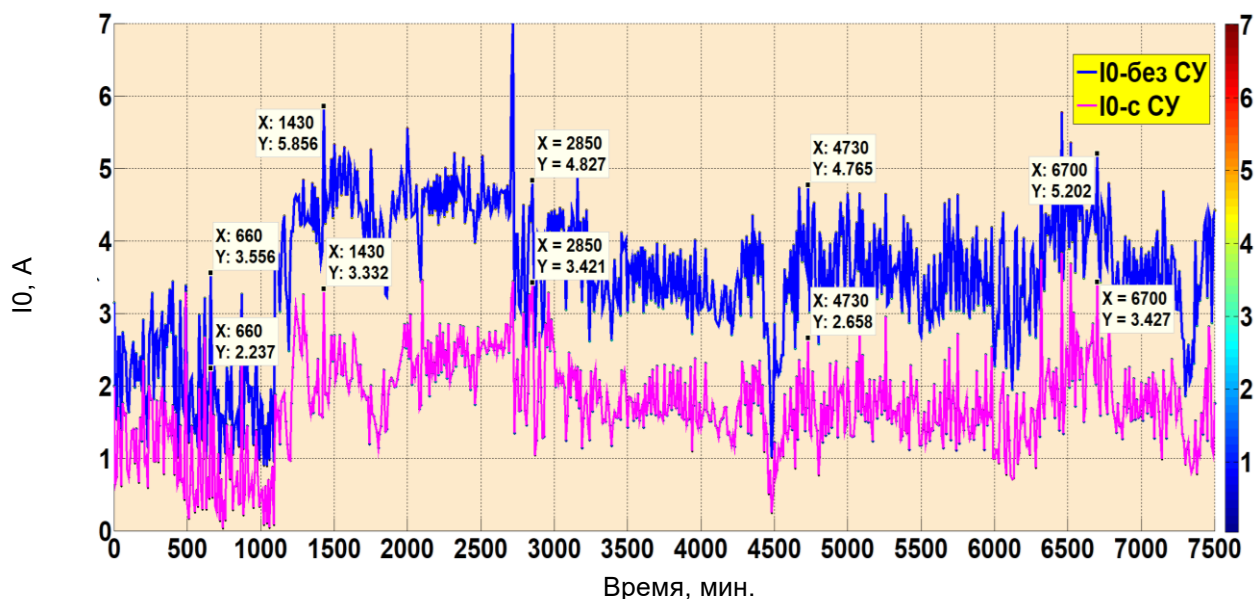


Рис. 3. Временные диаграммы изменения тока нулевой последовательности в исследуемой электрической сети 0,4 кВ до и после включения симметрирующего устройства

Fig. 3. Time diagrams of changes the zero-sequence current in the 0,4 kV electrical network under study before and after switching on the balancing device

Исходя из сказанного очевидно, что реальное среднее значение допустимого тока в нулевом проводнике превышает предельно допустимое более чем на 30%.

Это создает реальную угрозу нарушения теплового равновесия проводниковых материалов, т.е. перегрева изоляции, возможности возникновения короткого замыкания и соответствующего возгорания.

На рис. 3 также приведена временная диаграмма изменения тока нулевой последовательности в этой же электрической сети, при условии подключения в ней СУ. Как видно из диаграммы (рис. 3), в этом случае ток нулевой последовательности изменяется от минимального значения, равного 0,04 А, до максимального – 3,44 А. При этом среднее значение данного тока составит 1,73 А. Соответственно этому ток, протекающий в нулевом проводнике, составит 5,19 А. Как видно, это значение меньше предельно допустимого (7,33 А) почти на 30%.

Таким образом, для приведенного примера реальной работы действующей внутренней электрической сети индивидуального жилого дома возможны следующие способы предотвращения пожароопасных ситуаций:

а) на основании произведенных исследований произвести расчет, изготовление и установку симметрирующего устройства на вводно-распределительном устройстве

ИЖД;

б) произвести перераспределение однофазных нагрузок потребителей во внутренней электрической сети, что позволит снизить несбалансированность электропотребления по фазам сети и уменьшить ток нулевой последовательности в сети;

в) произвести замену существующего кабеля 6 мм² на кабель минимального сечения 10 мм² (на головном участке от вводно-распределительного устройства до группового распределительного силового щита).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании произведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Год от года происходит возрастание строительства индивидуальных жилых домов, основным строительным материалом которых служат деревянные конструкции.

2. Выполнение электрических проводов во внутренних электрических сетях индивидуальных домовладений производится без учета значительной несимметрии фазных токов в трёхфазной электрической сети, обусловленной несбалансированным электропотреблением в отдельных фазах. В результате этого нейтральный проводник внутренней электрической сети перегревается, что создает угрозу возгораний.

3. Создано программное обеспечение расчетов несимметричных режимов, на ос-

новании которого получены предельные значения тока нулевой последовательности для проводников разных сечений и материалов при их использовании в различных температурных интервалах.

4. Представлены результаты практического применения произведенных исследо-

ваний, на основании которых можно сделать вывод о целесообразности использования специальных симметрирующих устройств во внутренних электрических сетях индивидуальных домовладений как средства пожарной безопасности при использовании электроустановок в быту.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Наумов И. В. К вопросу пожарной безопасности при строительстве индивидуальных жилых домов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 3. С. 350–361. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-350-361>.
2. Naumov I. V. Additional power losses in low-voltage electrical networks and their influence on people // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. Research Paradigms Transformation in Social Sciences. 2018. Vol 50. P. 844–853. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2018.12.103>.
3. Naumov I. V. An analysis of fires due to violation of the rules for design and operation of electrical plants, and how to prevent them in residential buildings (on the example of the amur region) // EastConf-2019: International science and technology conference (Vladivostok, 1–2 March 2019). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2019. <https://doi.org/10.1109/EastConf.2019.8725407>.
4. Наумов И. В., Карамов Д. Н. К вопросу о возникновении пожароопасных ситуаций при несимметричном электропотреблении // Надежность и безопасность энергетики 2021. Т. 14. № 1. С. 69–76. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-69-76>.
5. Бортник Д. В., Орлов А. И., Волков С. В. Качество электрической энергии в низковольтных электрических сетях с коммунально-бытовой нагрузкой // Материалы XII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Саранск, 15–16 марта 2017 г.) в рамках IV Всеросс. светотехн. форума / отв. ред О. Е. Железнякова; МГУ им. Н. П. Огарева. Саранск: ИД В. С. Афанасьева, 2017. С. 517–525.
6. Абдиева З. Э. Оценка влияния несимметрии нагрузки на потери электрической энергии в сетях 0,4 кВ // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2014. № 32-1. С. 157–159.
7. Козловская В. Б., Калечиц В. Н. Несимметричные режимы линий наружного освещения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 3. С. 232–246.
8. Basmanov V. G., Votintsev A. V. Developing a Methodology for Calculating Asymmetric Modes of Power Supply Systems at Enterprises if Source Information Is Incomplete // Proceedings – 2021 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (Sochi, 17–21 May 2021). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446400>.
9. Ogunboyo P. T., Remy T., Davidson I. E. An Investigation of Voltage Quality in Low Voltage Electric Power Distribution Network under Normal Operation Mode // EAI International Conference for Research, Innovation and Development for Africa (Zimbabwe, Victoria Falls, 20–21 June 2017). ACRID. P. 254–265. <https://doi.org/10.4108/eai.20-6-2017.2270701>.
10. Наумов И. В. Симметрирование режимов работы внутренних электрических трёхфазных сетей как средство снижения пожарной опасности // Актуальные вопросы аграрной науки. 2021. № 38. С. 19–26.
11. Наумов И. В., Бастрон А. В. Исследование несимметричных режимов работы внутренних электрических сетей индивидуальных жилых домов в сельской местности // Вестник НГИЭИ. 2022. № 6 (133). С. 44–58. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-6-44-58>.
12. Наумов И. В. Метод и программа расчёта потерь мощности и показателей несимметрии токов и напряжений в распределительной сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. 1989. № 3. С. 30.
13. Косоухов Ф. Д., Гущинский А. Г., Колымцев М. В. Метод расчета потерь мощности и показателей несимметрии токов и напряжений в сельских электрических сетях 0,38 кВ при распределенной несимметричной нагрузке // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2012. № 26. С. 422–428.
14. Фетисов Л. В., Роженцова Н. В., Булатов О. А. Повышение качества электрической энергии в низковольтных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 99–106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>.
15. Жилин М. И., Воркунов О. В. Повышение качества электрической энергии // Приоритетные направления развития науки: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 2 июня 2017 г.). Иркутск: ООО «Научное партнерство "Апекс"». 2017. С. 83–85.
16. Girshin A., Goryunov V., Kuznetsov E., Safonov D., Petrova E. Analysis of asymmetrical modes in medium voltage electrical grids with compensated neutral. MATEC web of conferences 2016 3rd Inter-

national conference on manufacturing and industrial technologies (ICMIT 2016). (Istanbul, 25–27 May 2016 г.). EDP Sciences; 2016. p. 10008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167010008>.
17. Xie Rongbin, Du Fan, Cheng Xiang, Zhou Qun, Xu Fangwei. Influence of three-phase imbalance and harmonic on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network // *Power system protection and control*. 2020. Vol. 48. No 21. P. 22–30.
18. Дулепов Д. Е., Кондраненкова Т. Е. Снижение потерь и повышение качества электроэнергии в асимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях // *Электротехника глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции* (Самара, 2–6 октября 2017 г.). Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. С. 328–331.
19. Наумов И. В. К вопросу управления несимметричными режимами работы распределительных электрических сетей 0,38 кВ // *Промышленная энергетика*. 2022. № 5. С. 2–14. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.25.51.001>.

REFERENCES

1. Naumov I. V. Revisiting the issue of fire safety in private housing construction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2022;12(3):350-361. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-350-361>.
2. Naumov I. V. Additional power losses in low-voltage electrical networks and their influence on people. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. Research Paradigms Transformation in Social Sciences*. 2018;50:844-853. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2018.12.103>.
3. Naumov I. V. An analysis of fires due to violation of the rules for design and operation of electrical plants, and how to prevent them in residential buildings (on the example of the amur region). *EastConf-2019: International science and technology conference (INSPEC)*. Vladivostok, 1–2 March 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2019. <https://doi.org/10.1109/EastConf.2019.8725407>.
4. Naumov I. V., Karamov D. N. On the issue of the occurrence of fire-hazardous situations with asymmetric power consumption. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2021;14(1):69-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-69-76>.
5. Bortnik D. V., Orlov A. I., Volkov S. V. The quality of electric energy in low-voltage electric networks with household load. In the collection. *Materialy XII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem v ramkakh IV Vserossiiskogo svetotekhnicheskogo foruma = Materials of the XII All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation*. 15-16 March 2017, Saransk. Within the IV All-Russian Lighting Forum. O. E. Zheleznyakov (Eds.); Ogarev Mordovia State University. Saransk: PH V. S. Afanasyev; 2017. p. 517-525. (In Russ.).
6. Abdieva Z. E. Estimation of influence of unsymmetry of loading on the losses of electric energy in the networks of 0,4kV. *Izvestiya kyrgyzskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I. Razzakova*. 2014;32-1:157-159. (In Russ.).
7. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. Asymmetrical

modes of outdoor lighting lines. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG = Energetika. Proceedings of cis higher education institutions and power engineering associations*. 2019;62(3):232-246. (In Russ.).
8. Basmanov V. G., Votinsev A. V. Developing a Methodology for Calculating Asymmetric Modes of Power Supply Systems at Enterprises if Source Information Is Incomplete. *Proceedings – 2021 International conference on industrial engineering, applications and manufacturing*. Sochi, 17–21 May 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446400>.
9. Ogunboyo P. T., Remy T., Davidson I. E. An Investigation of Voltage Quality in Low Voltage Electric Power Distribution Network under Normal Operation Mode. *EAI International Conference for Research, Innovation and Development for Africa*. Zimbabwe, Victoria Falls, 20-21 June 2017. ACRID. P. 254-265. <https://doi.org/10.4108/eai.20-6-2017.2270701>.
10. Naumov I. V. Symmetrization of operating modes of internal three-phase electric networks as a means of reducing fire hazard. *Aktual'nye voprosy agrarnoi nauki = Actual issues of agrarian science*. 2021;38:19-26. (In Russ.).
11. Naumov I. V., Bastron A. V. Unbalancing modes investigation of the operation internal individual residential buildings electrical networks in rural areas. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGIEI*. 2022;6:44–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-6-44-58>.
12. Naumov I. V. Method and program for calculating power losses and indicators of current and voltage asymmetry in a 0.38 kV distribution network with a symmetrical device. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo sel'skogo khozyaistva*. 1989;3:30. (In Russ.).
13. Kosoukhov F. D., Gushchinskii A. G., Kolymtsev M. V. A method for calculating power losses and indicators of current and voltage asymmetry in rural electric networks of 0.38 kV with a distributed asymmetric load. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestiya Saint-Petersburg state agrarian university*. 2012;26:422-428. (In Russ.).

14. Fetisov L. V., Rozhencova N. V., Bulatov O. A. Improving the quality of electric power in low voltage networks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>.
15. Zhilin M. I., Vorkunov O. V. Improving the quality of electric energy. In: *Prioritetnye napravleniya razvitiya nauki: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference*. 2 July 2017, Moscow. Irkutsk: LLC "Scientific Partnership "Apex"; 2017. p. 83-85. (In Russ.).
16. Girshin A., Goryunov V., Kuznetsov E., Safonov D., Petrova E. Analysis of asymmetrical modes in medium voltage electrical grids with compensated neutral. MATEC web of conferences 2016 3rd International conference on manufacturing and industrial technologies (ICMIT 2016). Istanbul,

- 25–27 May 2016 r.. EDP Sciences; 2016. p. 10008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167010008>.
17. Xie Rongbin, Du Fan, Cheng Xiang, Zhou Qun, Xu Fangwei. Influence of three-phase imbalance and harmonic on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network. *Power system protection and control*. 2020;48(21):22-30.
18. Dulepov D. E., Kondranenkova T. E. Eduction of loss and enhancement of electric energy quality in non-symmetric regimes in rural distribution electric networks. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Electric Power Industry through the eyes of youth: Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference*. 2-6 October 2017, Samara. Samara: Samara State Technical University; 2017. p. 328-331. (In Russ.).
19. Naumov I. V. On the control of asymmetric operation modes of 0.38-kV distribution electrical networks. *Industrial Power Engineering*. 2022;5:2-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.34831/EP.2022.25.51.001>.

Информация об авторе**И. В. Наумов,**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
Иркутский государственный аграрный
университет им. А. А. Ежевского,
664038, Иркутский р-н,
пос. Молодежный, 1/1, Россия,
e-mail: professornaumov@list.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4767-0127>

Information about the author**Igor V. Naumov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
Irkutsk State Agrarian University
named after A. A. Yezhevsky,
1/1 Molodezhnyy settlement, Irkutsk district,
664038, Russia,
e-mail: professornaumov@list.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4767-0127>

Вклад автора

Наумов И. В. провел исследование, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Contribution of the author

Naumov I. V. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.10.2022.
Одобрена после рецензирования 02.11.2022.
Принята к публикации 07.11.2022.

Information about the article

The article was submitted 10.10.2022.
Approved after reviewing 02.11.2022.
Accepted for publication 07.11.2022.