

## Учёт несинусоидального/несимметричного режима работы электрической сети коммунально-бытового назначения при расчете уровня тока нулевого проводника

КАМОЛОВ М.М., ДЖУРАЕВ Ш.Дж., ИСМОИЛОВ С.Т.,  
ТТУ им. акад. М.С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан  
АБДУЛКЕРИМОВ С.А., НАЗИРОВ Х.Б.  
Филиал НИУ «МЭИ», Душанбе, Республика Таджикистан

*При эксплуатации электрических сетей напряжением 0,4 кВ несимметрия токов и напряжений неизбежна. Как известно, несимметричная работа электрических сетей 0,4 кВ обусловлена неравномерным распределением нагрузок между фазами. Это приводит к тому, что в четырехпроводной трехфазной электрической сети ток нулевой последовательности основной частоты будет протекать через нулевой проводник. С другой стороны, при симметричной работе четырехпроводной электрической сети с электроприемниками, имеющими нелинейную вольт-амперную характеристику, в нулевом проводнике суммируются токи высших гармоник, кратных трем. Поэтому актуальным является анализ несимметричного режима работы четырехпроводной электрической сети с нелинейной нагрузкой. В статье приведены характеристики коммунально-бытовой нагрузки для анализа несимметричного/несинусоидального режима её работы. Для проведения полной оценки несимметричного режима работы четырехпроводной электрической сети разработана имитационная модель участка сети 0,4 кВ, содержащего несинусоидальную нагрузку. Показано, что при несимметричной работе электрической сети, содержащей электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой, рекомендуется учитывать высшие гармонические составляющие тока нулевой последовательности, не кратные трем. Разработан алгоритм расчета гармонической составляющей тока нулевого проводника для определения температуры нагрева кабеля.*

**Ключевые слова:** моделирование, учёт, качество электроэнергии, несимметрия, несинусоидальность, электроприёмник, высшие гармоники тока, нулевой проводник

В составе коммунально-бытовой нагрузки в последние годы существенно выросла доля электроприёмников (ЭП) с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) [1]. При своей работе такие ЭП искажают синусоидальный ток, который, протекая по элементам электрической сети, искажает синусоиду напряжения сети. Несинусоидальность напряжения сети отрицательно влияет на функционирование электрооборудования, вызывая его износ и сокращая срок службы [2–4]. Вопросы несинусоидальности напряжения в электрических сетях 0,4 кВ и его влияния на работу ЭП рассмотрены в работах [5–9]. Вместе с тем, в электрических сетях 0,4 кВ нагрузки по фазам не распределены равномерно, что вызывает несимметрию напряжения [10]. Несимметрия нагрузки по фазам усиливает негативный эффект на элементы электрической сети. Особенно это сказывается на уже эксплуатируемых сетях, к которым подключается новая не-

линейная нагрузка. Дополнительный нагрев приводит к ускоренному старению изоляции кабельных линий (КЛ), что снижает надежность электроснабжения в целом [11–13]. В работах [11–16] приведен анализ последствий несимметричной нагрузки в электрических сетях. При этом несинусоидальному/несимметричному режиму работы электрической сети коммунально-бытового назначения в опубликованных работах не уделено должного внимания. Поэтому является актуальным анализ несимметричного режима работы электрической сети с ЭП, имеющими нелинейную ВАХ.

Известно, что при несимметричном режиме работы линейных ЭП в низковольтной четырехпроводной электрической сети ток в нулевом проводнике будет формироваться за счет тока нулевой последовательности основной частоты, а при симметричном режиме работы сети, содержащей ЭП с нелинейной ВАХ – за счёт гармонических состав-

ляющих тока, кратных трём ( $n=3k$ ), у которых отсутствует сдвиг фаз [7, 17]. Соответственно, согласно существующим методам расчёта тока нулевого проводника, при нелинейной и несимметричной нагрузке в рассматриваемой сети учитываются только токи нулевой последовательности основной частоты и высшие гармоники (ВГ) тока, кратные трём [17, 18]. Тогда суммарный ток, протекающий через нулевой проводник в таких сетях, определяется выражением:

$$I_N = 3 \sqrt{I_{1(0)}^2 + \sum_{i=3}^{3n} I_i^2}, \quad (1)$$

где  $I_N$  – ток нулевого проводника, А;  $I_{1(0)}$  – ток нулевой последовательности основной частоты, А;  $I_{3n}$  – ВГ тока, кратные трём, А;

Данной тематике посвящены исследования многих зарубежных и отечественных ученых [4–20, 25, 26]. Анализ публикаций показал, что в нулевом проводнике при несимметричной и несинусоидальной нагрузке в расчётах учитывают ток, определяемый по формуле (1). Однако, есть теоретическое предположение о появлении в нулевом проводнике гармонических составляющих токов, не кратных трём [17]. Цель данной работы – определение гармонических составляющих тока нулевого проводника, позволяющих оценить несиммет-

ричный режим работы городской распределительной сети с нелинейной нагрузкой.

**Разработка модели.** Для анализа несинусоидального/несимметричного режима работы распределительной сети коммунально-бытового назначения и расчета гармонического состава тока в нулевом проводнике разработана имитационная модель в среде *Matlab/Simulink* [19]. Объектом исследования является трансформаторная подстанция (ТП) городского типа К-42 №3232 Душанбинских городских электрических сетей, подключенная к подстанции (ПС) «БУСТОН» (рис. 1,а). ТП укомплектована масляным трансформатором типа ТМ-1000/10. РУ-0,4 кВ ТП питает вводно-распределительное устройство (ВРУ) объекта кабелем 0,4 кВ марки АВВГ (3×240+1×120) мм<sup>2</sup>. Длина КЛ 0,4 кВ – 650 м.

В качестве нагрузки коммунально-бытового назначения принята активно-индуктивная несинусоидальная нагрузка высокоэтажных жилых домов. Параметры элементов распределительной сети рассчитаны по их техническим данным.

Уровни ВГ тока, генерируемых ЭП с нелинейной ВАХ, были получены в результате инструментального обследования коммунально-бытовых ЭП [2].

При разработке имитационной компьютерной модели были приняты следующие допущения:

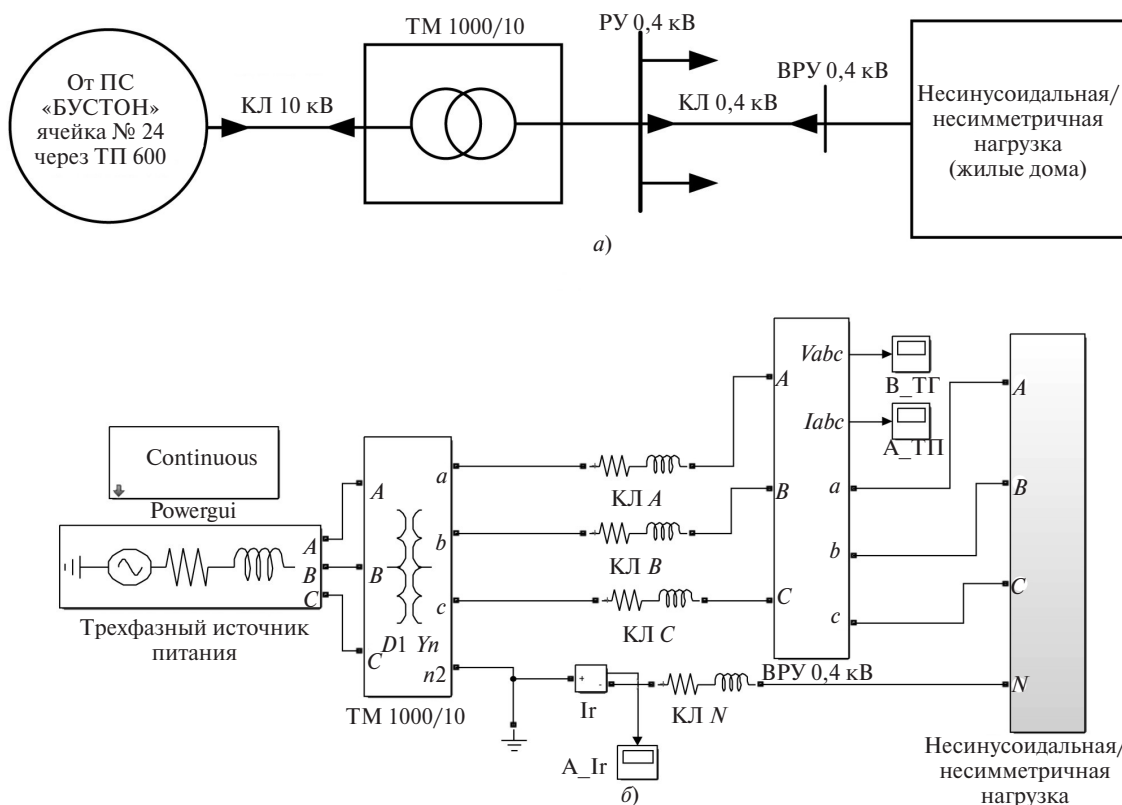


Рис. 1. Схема исследуемого объекта (а) и общий вид *Matlab/Simulink*-модели системы электроснабжения коммунально-бытового назначения (б)

ёмкости между фазами, фазой и землёй КЛ не учитываются;

в качестве источника питания выбран идеальный источник напряжения;

токи намагничивания и потери в сердечнике трансформатора не учитываются;

активное и индуктивное сопротивления трансформатора разделены поровну между обмотками высокого и низкого напряжения;

физические факторы окружающей среды (температура, атмосферное давление и др.) не учитываются.

Принятые допущения не оказывают существенного влияния на результаты моделирования [19].

В среде *Matlab/Simulink* расчет гармонических составляющих тока на шинах ВРУ и в нулевом проводнике 0,4 кВ исследуемой сети выполняется с помощью специального блока «расчет коэффициента несинусоидальности тока», использующего быстрое преобразование Фурье [17]:

$$X(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)]. \quad (2)$$

В общем виде для  $n$  гармоник:

$$X(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^n A_n \sin(n\omega t + \varphi_n); \quad (3)$$

$$A_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}; \quad \varphi_n = \arctg(B_n / A_n), \quad (4)$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая;  $A_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$  – амплитуда  $n$ -го гармонического колебания;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота основной гармоники;  $\varphi_n$  – начальный угол сдвига  $n$ -го гармонического колебания;  $t$  – время;  $n$  – номер гармоники.

**Анализ результатов моделирования.** Результаты моделирования распределительной электрической сети, содержащей несимметричную/несинусоидальную нагрузку, подтвердили, что значение тока нулевого проводника больше значения тока, определяемого по выражению (1). Форма кривой тока нулевого проводника при несимметричной работе несинусоидальной нагрузки приведена на рис. 2, а. Гармонический состав тока в нулевом проводнике,

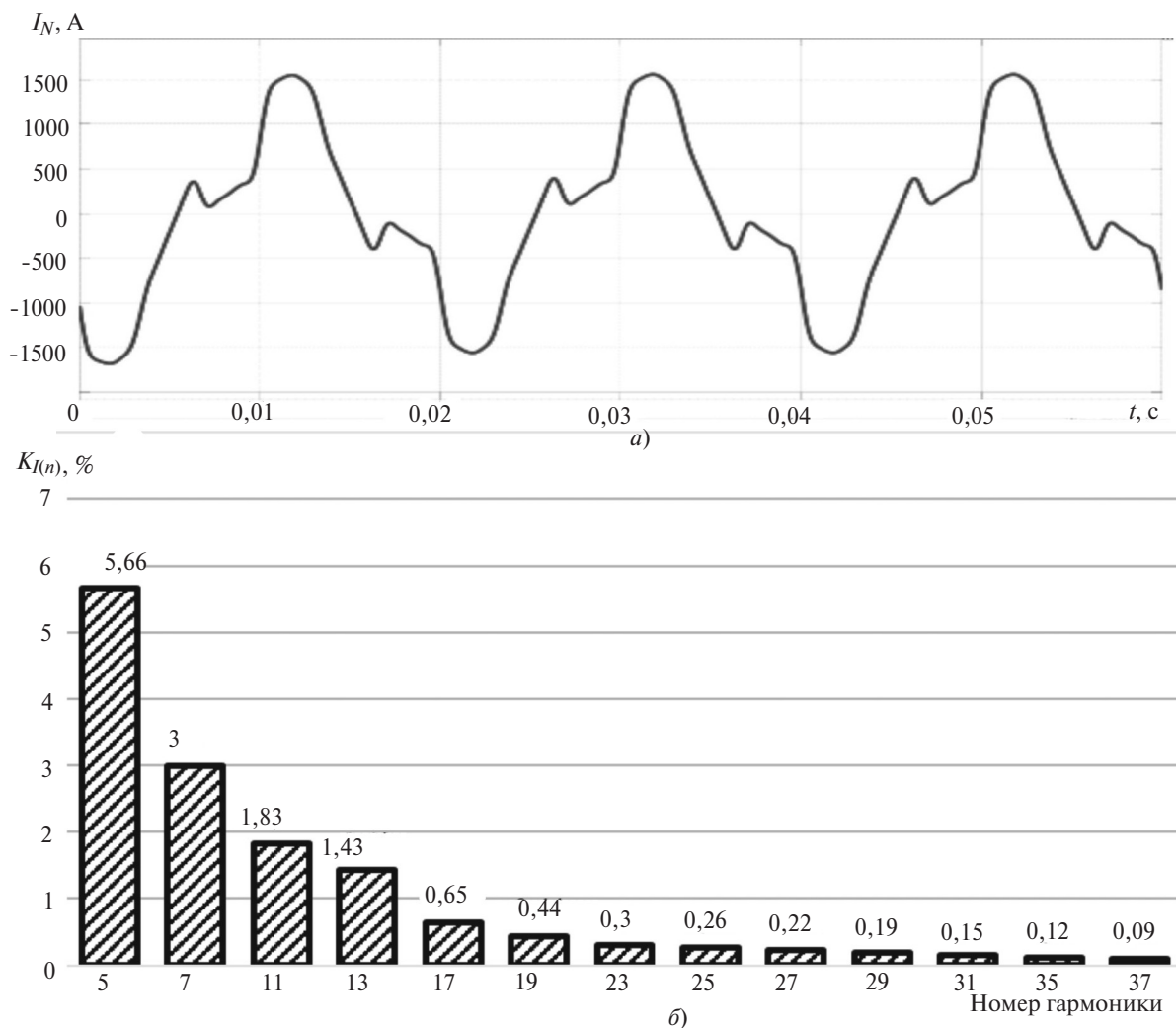


Рис. 2. Кривая тока (а) и спектр нечетных гармоник тока, не кратных трем, (б) нулевого проводника

полученный при моделировании рассматриваемой сети, показан на рис. 2,б.

Известно [17, 20, 21], что токи ВГ, кратных  $n=3k+1$ , составляют систему прямой последовательности, токи ВГ, кратных  $n=3k-1$  – систему обратной последовательности и токи ВГ, кратных  $n=3k$  – систему нулевой последовательности. В свою очередь, при несимметричном режиме гармонические составляющие тока также состоят из симметричных составляющих тока прямой, обратной и нулевой последовательностей. Как видно из рис. 2,б, при несимметрии нелинейной нагрузки в низковольтной четырехпроводной сети в нулевом проводнике, кроме тока основной частоты и ВГ тока, кратных трём, присутствуют и ВГ тока, не кратные трём. Следовательно, при несимметричном режиме несинусоидальной нагрузки в нулевом проводнике суммируются нечётные гармонические составляющие тока нулевой последовательности порядка  $n=3k+1$  и  $n=3k-1$ .

$$\begin{cases} I_{1(n)} = \frac{1}{3}(I_{A(n)} + aI_{B(n)} + a^2I_{C(n)}); \\ I_{2(n)} = \frac{1}{3}(I_{A(n)} + a^2I_{B(n)} + aI_{C(n)}); \\ I_{0(n)} = \frac{1}{3}(I_{A(n)} + I_{B(n)} + I_{C(n)}), \end{cases} \quad (5)$$

где  $I_{A(n)}$ ,  $I_{B(n)}$  и  $I_{C(n)}$  – соответственно ВГ тока фазы  $A$ ,  $B$  и  $C$ ;  $a$  – оператор, равный  $e^{2\pi/3}$ ;  $I_{1(n)}$  – ВГ тока прямой последовательности;  $I_{2(n)}$  – ВГ тока обратной последовательности;  $I_{0(n)}$  – ВГ тока нулевой последовательности.

Так, при известных значениях гармонических составляющих тока каждой фазы в соответствии с (5) можно определить симметричные составляющие ВГ тока, т.е., гармонические составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей тока. Ниже в качестве примера приведен расчёт симметричных составляющих ВГ тока 5-го порядка для несимметричного режима при известных фазных токах, А:

$$\begin{aligned} I_{A(5)} &= 125,042e^{i164,8^0}; & I_{B(5)} &= 92,738e^{i63,7^0}; \\ I_{C(5)} &= 59,124e^{i54,3^0}; & I_{1(5)} &= 22,445e^{i133,75^0}; \\ I_{2(5)} &= 92,2734e^{i172,292^0}; & I_{0(5)} &= 15,973e^{i168,179^0}. \end{aligned}$$

Результаты расчёта симметричных составляющих ВГ тока 5-го порядка при несимметричной/несинусоидальной нагрузке показывают, что кроме тока обратной последовательности существуют токи прямой и нулевой последовательностей, которые не характерны для ВГ тока 5-го порядка.

На рис. 3 и 4 приведен пример векторных диаграмм симметричной составляющей ВГ тока соответственно 5-го и 7-го порядков.

В соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраическая сумма токов любой частоты при симметричном режиме работы четырехпроводной трехфазной сети будет равна нулю [21]:

$$I_{A(n)} + I_{B(n)} + I_{C(n)} = 0. \quad (6)$$

При несимметричном режиме работы сумма фазных токов будет равна току нулевого проводника [21]:

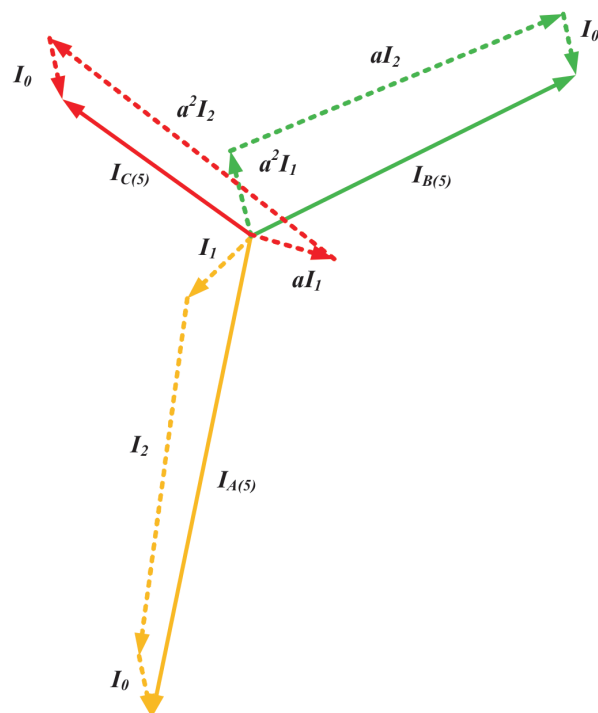


Рис. 3. Векторная диаграмма токов прямой, обратной и нулевой последовательностей 5-й гармоники на шинах ВРУ

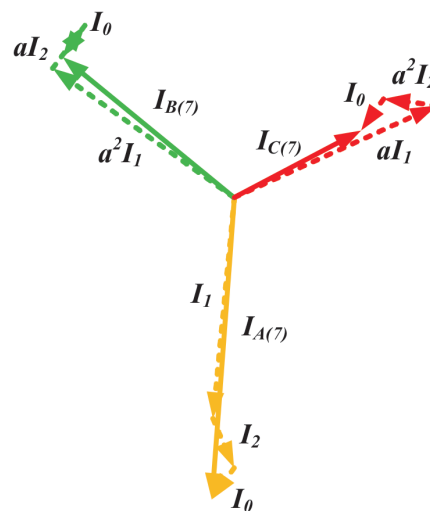


Рис. 4. Векторная диаграмма токов прямой, обратной и нулевой последовательностей 7-й гармоники на шинах ВРУ

$$I_{N(n)} = I_{A(n)} + I_{B(n)} + I_{C(n)} = 3I_{0(n)}. \quad (7)$$

Далее, по выражению (7) можно определить ВГ тока 5-го порядка, протекающего в нулевом проводнике:

$$I_{N(5)} = I_{A(5)} + I_{B(5)} + I_{C(5)} = 125,042e^{i164,8^0} + 92,738e^{i63,7^0} + 59,124e^{i54,3^0} = 49,919e^{i168,179^0} \text{ А.}$$

Сравнение расчетных данных ВГ тока 5-го и 7-го порядков, протекающих в нулевом проводнике, в векторном виде представлено на рис. 5.

Таким образом, по выражению (7) можно определить ВГ тока любого порядка нулевого проводника. Далее для верификации предложенной методики результаты расчета симметричных составляющих ВГ тока, не кратных трем, приведем в табличном виде и сравним суммарное значение ВГ тока нулевой последовательности с данными тока нулевого проводника, полученными моделированием.

Как видно из таблицы, результаты моделирования совпадают с расчетными значениями гармонических составляющих тока нулевого проводника. Максимальная погрешность составляет 1,65%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при несимметричном режиме работы несинусоидальной нагрузки в нулевом проводнике кроме тока нулевой последовательности основной частоты и тока ВГ, кратных трем, протекает ток ВГ нулевой последовательности, не кратных трем ( $n=3k+1$  и  $n=3k-1$ ).

В соответствии с методикой [7, 18], результирующий ток нулевого проводника при симметричном режиме работы трехфазной четырехпроводной сети образуется за счет ВГТ, кратных трём. Однако результаты моделирования показывают, что при несимметричном режиме работы нелинейной нагрузки данная методика дает некорректный результат. Поэтому для совершенствования методики

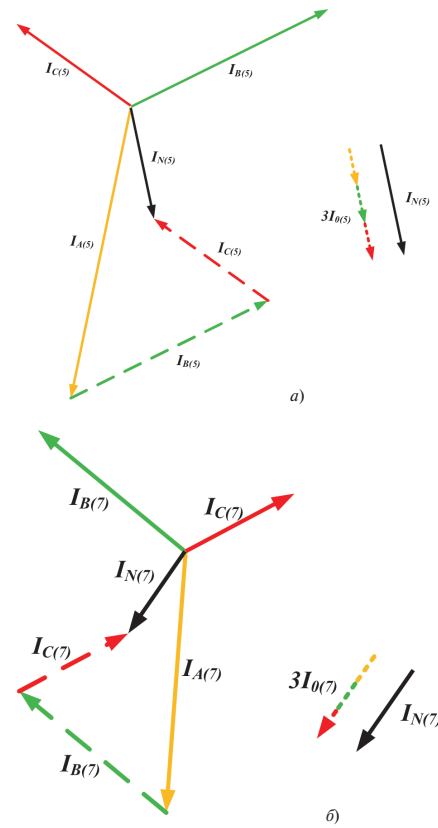


Рис. 5. Векторная диаграмма для нахождения токов 5-й  $I_{5(0)}$  (а) и 7-й  $I_{7(0)}$  (б) гармоник в нулевом проводнике

расчета тока нулевого проводника при несимметричном/несинусоидальном режиме работы трехфазной сети рекомендуется ввести в формулу (1) составляющую, учитывающую нечетные ВГТ, не кратные трем:

$$I_N = 3\sqrt{I_{1(0)}^2 + \sum_{i=3}^{3n} I_i^2 + \sum_{i=5}^{6n+1} I_{i(0)}^2}, \quad (8)$$

где  $I_N$  – ток нулевого проводника, А;  $I_{0(1)}$  – ток нулевой последовательности основной частоты, А;

**Действующие значения нечетных гармонических составляющих тока прямой, обратной и нулевой последовательностей и ток в нулевом проводнике**

n	Результаты расчёта				Результаты моделирования	Погрешность, %
	$I_{1(n)}$ , А	$I_{2(n)}$ , А	$I_{0(n)}$ , А	$I_{N(n)}=3I_{0(n)}$ , А	$I_{N(n)}$ , А	
5	$22,445e^{i133,75}$	$92,273e^{i172,29}$	$15,97e^{i168,2}$	$47,92e^{i168,18}$	$47,97e^{i167,9}$	0,1
7	$48,972e^{i174,465}$	$11,842e^{-i156}$	$8,524e^{i144,94}$	$25,572e^{i144,94}$	$25,425e^{i145,4}$	0,47
11	$6,811e^{i141,89}$	$28,203e^{i175,96}$	$5,15e^{-i162,73}$	$15,45e^{-i162,73}$	$15,51e^{-i161,9}$	0,39
13	$22,8e^{i176,82}$	$5,52e^{-i153,67}$	$4,08e^{i150,5}$	$12,24e^{i150,5}$	$12,12e^{i151,6}$	1,06
17	$1,974e^{i149,7}$	$7,58e^{i177,02}$	$1,815e^{-i165,5}$	$5,445e^{-i165,52}$	$5,508e^{-i164,8}$	1,16
19	$4,492e^{i178,44}$	$1,279e^{-i159,52}$	$1,258e^{i164,69}$	$3,774e^{i164,69}$	$3,729e^{i165,8}$	1,2
23	$0,66e^{i161,14}$	$1,997e^{i176,48}$	$0,838e^{-i172}$	$2,514e^{-i172}$	$2,54e^{-i170,85}$	1,02
25	$1,822e^{i178,82}$	$0,62e^{-i165,95}$	$0,747e^{i170,8}$	$2,241e^{i170,8}$	$2,204e^{i171,8}$	1,65

$I_{0(6n+1)}$  – нечетные ВГ тока нулевой последовательности, не кратные трём, А;  $I_{3n}$  – ВГ тока, кратные трём, А.

На рис. 6 приведен алгоритм расчета симметричных составляющих гармонической составляющей тока нулевого проводника. Суть алгоритма заключается в следующем. В электрической четырехпроводной трехфазной цепи, содержащей несимметричную/несинусоидальную нагрузку, определяются показатели качества электроэнергии (ПКЭ), характеризующие несимметрию и несинусоидальность напряжения (коэффициенты несимметрии напряжения нулевой  $K_{0U}$  и обратной  $K_{2U}$  последовательностей, суммарный коэффициент гармо-

нических составляющих напряжения  $K_U$  и коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$ ). Затем рассчитанные ПКЭ сравниваются с нормативными данными [22]. При несоответствии сравниваемых ПКЭ допустимым значениям [22] принимаются меры по симметрированию нагрузки и снижению ВГ [23–27], после чего расчет несимметрии/несинусоидальности напряжения повторяется. В случае соответствия ПКЭ нормативам определяется ток нулевого проводника, значение которого сравнивается с паспортным значением длительно допустимого тока кабеля. При выполнении условия расчет завершается. Если условие не выполняется, определяются гармонические составляющие фазных токов для расчета ВГ тока нулевой последовательности и допустимая температура нагрева нулевого проводника. Известно [17], что при увеличении частоты переменного тока активное сопротивление КЛ и проводников увеличивается в  $\sqrt{n}$  раз по отношению к  $n$ -ой гармонике, что приводит к дополнительному нагреву. После определения фактической температуры нагрева КЛ (ТК) ее значение сравнивается с допустимым значением ( $T_{Кдоп}$ ). При выполнении условия расчет завершается, при невыполнении – применяются меры по компенсации ВГТ и симметрированию напряжения.

**Вывод.** Исследование несимметричного режима работы городской распределительной сети с нелинейной нагрузкой и определение гармонических составляющих тока нулевого проводника четырехпроводной трехфазной электрической сети 0,4 кВ, позволило установить следующее:

– в нулевом проводнике, кроме тока обратной последовательности основной частоты и ВГ тока, кратным трём, присутствуют и нечетные ВГ тока, не кратные трём ( $I_{0(6n+1)}$ ). Например, значение тока ВГ 5-го порядка, являющегося током обратной последовательности, в нулевом проводнике составляет 47,92 А;

– с целью совершенствования существующей методики расчета тока нулевого проводника необходимо учитывать ток ВГ порядка  $6n+1$ . Выражение

$$(1) \text{ следует дополнить слагаемым } \sum_{i=5}^{6n+1} I_i^2(0), \text{ учиты-}$$

вающим нечетные ВГТ нулевой последовательности, не кратные трем.

Разработанный алгоритм расчета гармонической составляющей тока нулевого проводника при несимметрии нелинейной нагрузки позволяет определить действительное значение температуры нагрева КЛ четырехпроводной трехфазной электрической сети 0,4 кВ.



Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета гармонической составляющей тока нулевого проводника электрической сети с нелинейной нагрузкой для определения нагрева КЛ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шведов Г.В. Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети: учебное пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012, 268 с.
2. Камолов М.М., Назиров Х.Б., Бобоев Б.А. Анализ современных электроприемников с нелинейной ВАХ коммунально-бытового сектора. — Modern Science, 2020, № 2–2, с. 322–325.
3. Камолов М.М., Назиров Х.Б., Исмоилов С.Т., Джураев Ш.Д., Амирханов А.С. Экспериментальная оценка качества электрической энергии современных коммунально-бытовых и офисных электроприемников. — Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования, 2019, № 2 (46), с. 26–33.
4. Камолов М.М., Назиров Х.Б., Махмадов Ш.С. Инструментальная оценка показателей качества электроэнергии в распределительной сети напряжением 0,4 кВ. — Modern Science, 2020, № 1–2, с. 286–290.
5. Агунов, А.В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. СПб.: СПбГМТУ, 2009, 134 с.
6. Темербаев С.А. и др. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. — Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2013, т. 6, № 1, с. 107–120.
7. Авербух, М.А., Жилин Е.В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов. — Промышленная энергетика, 2017, № 12, с. 40–45.
8. Тульский В.Н., Джураев Ш.Д., Валянский А.В., Султонов Ш.М. Анализ результатов моделирования распределения высших гармоник тока в электрических сетях республики Таджикистан. — Энергетик, 2018, № 7, с. 44–50.
9. Вагин Г.Я., Севостьянов А.А., Солнцев Е.Б., Юртаев С.Н., Терентьев П.В., Смирнов В.В. Анализ влияния нелинейной однофазной нагрузки на значение тока в нулевом проводе. — Промышленная энергетика, 2013, № 12, с. 17–19.
10. Дед А.В., Зайцев В.Ю., Денисенко М.Ю. Несимметричные режимы низковольтных электрических сетей. — Динамика систем, механизмов и машин, 2012, № 1, с. 121–123.
11. Висящев А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электрических системах: учебное пос. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1997, 187 с.
12. Железко Ю.С. Научно-методические основы стратегии снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях: автореф. дисс.... докт. техн. наук. М.: 1996, 46 с.
13. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009, 456 с.
14. Левин М.С., Мурадян А.Е., Сырых Н.Н. Качество электрической энергии сельских районов. М.: Энергия, 1975, 224 с.
15. Майер, В.Я. Исследование влияния симметричного и несимметричного отклонения напряжения на эксплуатационные характеристики асинхронного двигателя. — Промышленная энергетика, 1993, № 9, с. 30–34.
16. Косоухов Ф.Д., Наумов И.В. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях. Иркутск: Иркут. гос. с.-х. акад., 2003, 257 с.
17. Каргашев И.И., Тульский В.Н., Шаманов Р.Г., Шаров Ю.В., Насыров Р.Р. Управление качеством электроэнергии, 3-е изд. М.: Издат. дом МЭИ, 2017, 347 с.
18. Симуткин М.Г., Тульский В.Н. Методы оценки влияния гармоник тока на силовые масляные трансформаторы и кабельные линии. — Сб. трудов междунар. научно-практ. конф. «Управление качеством электрической энергии», 26–28 ноября 2014 г., М., 2014, с. 161–169.

19. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2014, 288 с.

20. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984, 160 с.

21. Зевеке Г.В., Ионкин А.В., Нетушил А.В., Страков С.В. Основы теории цепей: Учебник для вузов, 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989, 528 с.

22. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартиформ. 2014, 16 с.

23. Назиров Х.Б. Разработка системы управления качеством электрической энергии в электрических сетях. автореф. дисс.... канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2012, 20 с.

24. Алексеев Б.А. Активные фильтры высших гармоник. — Электро, 2007, №3. с. 28–32.

25. Dipak Suresh B., Kiran. P. Varade, Veeresh C. Shunt Active Filter for Power Quality Improvement. —International Journal of Engineering Research and General Science, 2015, vol. 3: Issue 4. July-August, pp. 136–148.

26. Gosbell V.J., Muttik P.K. Power quality monitoring in Australia. — CIGRE Session 2002. Paris, France, 2002, pp. 163–168.

27. Тульский В.Н., Иноятов Б.Д., Джураев Ш.Д. Мониторинг качества электроэнергии как инструмент диагностики состояния нейтрали низковольтных кабелей. — Энергетик, 2019, № 6, с. 30–33.

28. Тульский В.Н., Иноятов Б.Д., Джураев Ш.Д., Рахимов Д.Б., Исмоилов С.Т. Оценка влияния несимметричной нагрузки на тепловой режим работы кабельной линии. — Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования, 2018, № 4 (44), с. 17–23.

[05.10.2020]

*Авторы: Камолов Мухаммаджон Мутайбович — докторант PhD, ассистент кафедры «Теоретические основы радио- и электротехники» энергетического факультета Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими.*



*Абдулкеримов Сагид Абдурахманович — кандидат техн. наук, директор филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в Душанбе (Республика Таджикистан).*



*Назиров Хуршед Бобоходжаевич — кандидат техн. наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в Душанбе (Республика Таджикистан).*



*Джураев Шохин Джураевич — кандидат техн. наук, старший преподаватель кафедры «Теоретические основы радио- и электротехники» энергетического факультета Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими.*



*Исмоилов Саиджон Туронович — кандидат техн. наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы радио- и электротехники» энергетического факультета Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими.*



## Consideration of Nonsinusoidal/Unbalanced Operating Conditions of a Municipal Electric Network for Calculating the Current Level through the Neutral Conductor

**KAMOLOV Mukhammadzhon M.** (*Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan*) – assistant of the Theoretical Fundamentals of Radio and Electrical Engineering Dept., PhD Student (Eng.)

**ABDULKERIMOV Sagid A.** (*Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Dushanbe, Republic of Tajikistan*) – Director, Cand. Sci. (Eng.)

**NAZIROV Khurshed B.** (*Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Dushanbe, Republic of Tajikistan*) – Head of the Power Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.)

**DZHURAEV Shokhin D.** (*Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan*) – Senior Lecturer of the Theoretical Fundamentals of Radio and Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.)

**ISMOILOV Saidjon T.** (*Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan*) – Head of the Theoretical Fundamentals of Radio and Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.)

During the operation of 0.4 kV electric networks, asymmetry of currents and voltages is unavoidable. As is known, unbalanced operation of 0.4 kV networks is stemming from nonuniform distribution of loads between the phases. This results in that a fundamental frequency zero-sequence current will flow through the neutral conductor in a four-wire three-phase electric network. On the other hand, during balanced operation of a four-wire electric network containing loads with a nonlinear volt-ampere characteristic, higher harmonic currents multiple to three are summed in the neutral conductor. Therefore, it is of relevance to analyze unbalanced operating conditions of a four-wire electric network containing loads with a nonlinear volt-ampere characteristic. The article presents the characteristics of a municipal load for analyzing unbalanced/nonsinusoidal conditions of its operation. For carrying out full-valued assessment of unbalanced operating conditions of a four-wire electric network, a simulation model of a 0.4 kV network section containing a nonsinusoidal load is developed. It is shown that during unbalanced operation of an electric network containing electric loads with a nonlinear volt-ampere characteristic it is recommended to take into account zero-sequence current higher harmonic components that are not multiple to three. An algorithm for calculating the neutral conductor current harmonic component for determining the cable temperature rating is developed.

**Key words:** modeling, consideration, power quality, asymmetry, nonsinusoidality, electric load, higher harmonic components, neutral conductor

### REFERENCES

1. Shvedov G.V. *Elektrosnabzheniye gorodov: elektropotrebleniye, raschetnyye nagruzki, raspredelitel'nyye seti: uchebnoye pos.* (Power supply of cities: power consumption, design loads, distribution networks: a tutorial). M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2012, 268 p.
2. Kamolov M.M., Nazirov K.H.B., Boboyev B.A. Modern Science, 2020, No. 2–2, pp. 322–325.
3. Kamolov M.M., Nazirov K.H.B., Ismoilov S.T., Dzhurayev Sh.D., Amirkhanov A.S. *Politehnicheskiiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya* – in Russ. (*Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*), 2019, No. 2 (46), pp. 26–33.
4. Kamolov M.M., Nazirov K.H.B., Makhmadov Sh.S. Modern Science), 2020, No. 1–2, pp. 286–290.
5. Agunov A.V. *Upravleniye kachestvom elektroenergii pri nesinusoidal'nykh rezhimakh* (Power quality management in non-sinusoidal modes). SPb.: SPbGMTU, 2009, 134 p.
6. Temerbayev S.A. i dr. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* – in Russ. (*Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*), 2013, iss. 6, No. 1, pp. 107–120.
7. Averbukh M.A., Zhilin Ye.V. *Promyshlennaya energetika* – in Russ. (*Industrial Energy*), 2017, No. 12, pp. 40–45.
8. Tul'skiy V.N., Dzhurayev Sh.D., Valyanskiy A.V., Sultonov Sh.M. *Energetik* – in Russ. (*Energetik*), 2018, No. 7, pp. 44–50.
9. Vagin G.Ya., Sevost'yanov A.A., Solntsev Ye.B., Yurtayev S.N., Terent'yev P.V., Smirnov V.V. *Promyshlennaya energetika* – in Russ. (*Industrial Energy*), 2013, No. 12, pp. 17–19.
10. Ded A.V., Zaytsev V.Yu., Denisenko M.Yu. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* – in Russ. (*Dynamics of systems, mechanisms and machines*), 2012, No. 1, pp. 121–123.
11. Visyashchev A.N. *Kachestvo elektricheskoy energii i elektromagnitnaya sovmestimost' v elektricheskikh sistemakh: uchebnoye posobiye* (The quality of electrical energy and electromagnetic



compatibility in electrical systems: a tutorial). Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 1997, 187 p.

12. **Zhelezko Yu.S.** *Nauchno-metodicheskiye osnovy strategii snizheniya poter' i povysheniya kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh: avtoref. dis. ... Dr. Sci. (Eng.)*. M.: 1996, 46 p.

13. **Zhelezko Yu.S.** *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* (Loss of electricity. Reactive power. Power quality: a guide for practical calculations). M.: ENAS, 2009, 456 p.

14. **Levin M.S., Muradyan A.Ye., Syrykh N.N.** *Kachestvo elektricheskoy energii sel'skikh rayonov* (Rural electricity quality). M.: Energiya, 1975, 224 p.

15. **Mayer, V.Ya.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Energy)*, 1993, No. 9, pp. 30–34.

16. **Kosoukhov F.D., Naumov I.V.** *Nesimmetriya napryazheniy i tokov v sel'skikh raspredelitel'nykh setyakh* (Unbalance of voltages and currents in rural distribution networks). Irkutsk: Irkut. gos. s.-kh. akad., 2003, 257 p.

17. **Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Shamanov R.G., Sharov Yu.V., Nasyrov R.R.** *Upravleniye kachestvom elektroenergii, 3-ye izd.* (Power Quality Management, 3rd ed.). M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2017, 347 p.

18. **Simutkin M.G., Tul'skiy V.N.** *Metody otsenki vliyaniya garmonik toka na silovyye maslyanyye transformatory i kabel'nyye linii. – Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii», 26–28 noyabrya 2014 g.* (Methods for assessing the influence of current harmonics on power oil transformers and cable lines. – Proceedings of the international scientific-practical conference «Electricity quality management», November 26–28, 2014, Moskva, 2014, pp. 161–169.

19. **Chernykh I.V.** *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* (Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink). M.: DMK Press, 2014, 288 p.

20. **Zhezhelenko I.V.** *Vysshiyе garmoniki v sistemakh elektroснабzheniya prompredpriyatiy. 2-ye izd.* (Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. 2nd ed.). M.: Energoatomizdat, 1984, 160 p.

21. **Zeveke G.V., Ionkin A.V., Netushil A.V., Strakov S.V.** *Osnovy teorii tsepey: Uchebnik dlya vuzov, 5-ye izd.* (Fundamentals of circuit theory: Textbook for universities, 5th ed.). M.: Energoatomizdat, 1989, 528 p.

22. **GOST 32144-2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroснабzheniya obshchego naznacheniya* (Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Electricity quality standards in general-purpose power supply systems). M.: Standartinform, 2014, 16 p.

23. **Nazirov Kh.B.** *Razrabotka sistemy upravleniya kachestvom elektricheskoy energii v elektricheskikh setyakh: avtoref. dis. .... kand. tekhn. nauk* (Development of a quality management system for electrical energy in electrical networks: author. dis. ... Cand. Sci. (Eng)). M.: NRU «MEI», 2012, 20 p.

24. **Alekseyev B.A.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2007, No. 3, pp. 28–32.

25. **Dipak Suresh B., Kiran. P. Varade, Veeresh C.** Shunt Active Filter for Power Quality Improvement. – International Journal of Engineering Research and General Science, 2015, vol. 3: Issue 4, July–August, pp. 136–148.

26. **Gosbell V.J., Muttik P.K.** Power quality monitoring in Australia. – CIGRE Session 2002. Paris, France, 2002, pp. 163–168.

27. **Tul'skiy V.N., Inoyatov B.D., Dzhurayev Sh.D.** *Energetik – in Russ. (Energetik)*, 2019, No. 6, pp. 30–33.

28. **Tul'skiy V.N., Inoyatov B.D., Dzhurayev Sh.D., Rakhimov D.B., Ismoilov S.T.** *Politekhnicheskiiy vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya – in Russ. (The Polytechnic Herald. Series: Engineering Research)*, 2018, No. 4 (44), pp. 17–23.

[05.10.2020]