

И.А. Бершадский /д.т.н./, В.В. Якимишина /к.т.н./, Е.Я. Наглюк
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ И НЕСИММЕТРИИ В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ НЕПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА СНИЖЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЕЙ

Приведены результаты расчетов длительно допустимого тока четырехжильного кабеля на основной частоте с учетом токов высших гармоник и расчет величины тока в нулевой жиле при несимметрии нагрузки. Даны рекомендации по корректировке пропускной способности этих кабелей на основании их теплового состояния.

Ключевые слова: несинусоидальность, несимметрия, нагрузка, электроприемники, спектр гармоник.

Постановка проблемы

С развитием научно-технического прогресса и появлением большего количества электроприемников на душу населения возрастает электрическая нагрузка непромышленных потребителей – жилых и административных зданий. Сопутствующие изменения также влияют на качество электроэнергии, приводят к ухудшению номинальных показателей [1].

Основными источниками помех в сети являются силовые (механизмы лифтов, насосы водоснабжения в случае использования энергосберегающего электропривода), бытовые (компьютерная техника, пылесосы, стиральные машины и пр.) электроприборы, медицинское оборудование (магнитно-резонансный томограф, компьютерный томограф), а также некоторые виды осветительных ламп (например, компактные люминесцентные) [2,3].

Как правило, симметричный режим работы электроприемников возможен только при одинаковой нагрузке во всех трех фазах, что зачастую в современных условиях фактически невозможно выполнить. То есть в нынешних сетях превалирует несимметричный режим [4,5].

Такие особенности характера электропотребителей могут привести к значительной перегрузке тока нулевого провода и даже к его повреждению. При этом по нулевой жиле силового кабеля протекают токи, обусловленные отсутствием фазового сдвига у высших гармоник, кратных трем, и основной частоты, а также за счет несимметричной загрузки фаз. В отдельных случаях действующее значение тока в нулевом проводнике может превышать фазный ток в 1,5...2 раза [5,6].

Основная масса кабельных линий сетей низкого напряжения была спроектирована более

20 лет назад, и сечение нулевого проводника принималось меньше сечения фазного. Старые системы электроснабжения предусматривали лишь только линейную симметричную нагрузку, когда ток в нулевом проводе не превосходил ток в наиболее загруженной фазе, т.е. защита на фазных проводниках одновременно защищала от перегрева и нулевой рабочий проводник. Причем защита от токовых перегрузок в цепях нулевых проводников трехфазной сети не предусмотрена [7].

В то же время перегрузка нулевой жилы кабеля токами высших гармонических составляющих приводит к дополнительному увеличению температуры выше регламентируемой по ГОСТ 53769-2010 (70 °C). Это ускоряет старение изоляции кабеля и, следовательно, уменьшает срок его службы.

Анализ последних исследований и публикаций

Основные факторы, определяющие изменение тока нулевого провода в четырехпроводной системе электроснабжения непромышленных потребителей при переменном характере несинусоидальной и несимметричной нагрузки, выявлены и описаны в [6]: несинусоидальность тока нулевого провода; несимметрия токов фаз по нулевой последовательности; параметры нагрузки; параметры распределительной сети; напряжение нагрузки (уровень напряжения).

С увеличением числа электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой возрастает количество источников высших гармоник тока. Поэтому необходимо внедрять при проектировании и эксплуатации электрических

сетей методы и способы оценки влияния высших гармоник тока на оборудование распределительной сети, чтобы избежать проблем в системах электроснабжения в будущем [1]. Такие меры стоит принимать для реальных, а не табличных эксплуатационных показателей длительно допустимого тока проводников. Согласно [7], это такой ток, который, проходя по проводнику в течение длительного времени, нагревает его до допустимой (номинальной) температуры.

Также при проектировании следует учитывать величину тока в нулевом проводе при неравномерной нагрузке в трехфазной сети [8].

В связи с изменением длительно допустимого тока под влиянием гармонических составляющих и дополнительным термическим эффектом [9], возникающим от протекания тока в нулевой жиле, эксплуатационная величина этого тока может значительно отличаться от табличной. Тепловые режимы токов нагрузки установочных электропроводок различных конструкций рассмотрены в работе [9], но моделирование процесса нагрева четырехжильных кабелей с нулевой жилой в ней не рассматривалось.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование характера влияния несинусоидальности и несимметрии электрических параметров на эксплуатационные характеристики четырехпроводной электрической сети непромышленных потребителей в контексте совершенствования методов ее расчета.

Табл. 1. Спектры гармонических составляющих компактных люминесцентных ламп и монитора тока

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$I_n, \%$	100	60	40	45	37	36	32	22	20	13
	100	92	80	62	12	38	11	2	6	9

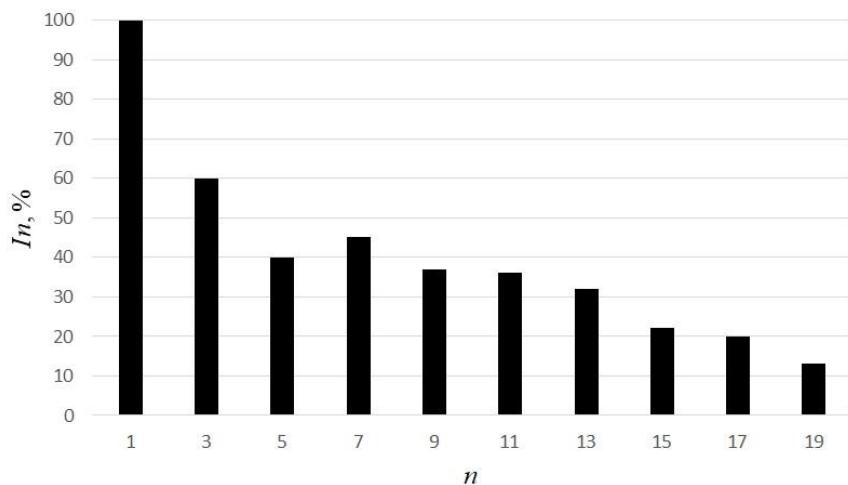


Рис. 1. Спектр гармонических составляющих тока компактных люминесцентных ламп

Основной материал исследования

Множество проведенных исследований показали, что большинство компактных люминесцентных ламп (КЛЛ) (табл.1, строка 1), в отличие от ламп накаливания, обладают широким спектром гармонических составляющих (рис. 1). Электроприемники, имеющие в своем составе выпрямитель с мощным емкостным фильтром или преобразователи с бестрансформаторным входом, называемые мониторами тока, также являются источником помех (табл.1, строка 2).

В табл. 2 (строки 1, 2) представлены спектры гармоник тока магнитно-резонансного и компьютерного томографа (МРТ и КТ), полученные в ходе экспериментов [1].

Несинусоидальность негативно сказывается на пропускной способности сети, увеличивает потери напряжения. Для электроприемников это весомый фактор сокращения срока службы, а для техники, которая особо чувствительна к помехам (микроэлектроника, микропроцессоры), является условием дополнительного риска отказа оборудования.

Для определения длительно допустимого тока на основной частоте необходимо учитывать токи высших гармоник. Расчет позволит получить значение, при котором изоляция проводника не будет перегреваться.

Построение математической модели кабеля для изучения тепловых процессов в нем под влиянием токов высших гармоник, определяющих пропускную способность, требует знания конструкции кабеля, включая как геометрические размеры, так и тепловые характеристики каждого из элементов.

Табл. 2. Спектры гармонических составляющих магнитно-резонансного томографа и компактных люминесцентных ламп

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I_n , %	66	1	100	6	3	2	4	1	6	1	1	1	2	1	1
	100	52	3	32	38	28	9	2	2	6	8	7	3	2	1

Известно, что тепловыми потерями в защитных металлических оболочках при расчете температуры изоляции пренебрегают в силу того, что в кабелях распределительной сети потери не превышают 1...3 % от потерь активной мощности в жиле. В кабелях 380 В можно пренебречь также выделением теплоты в изоляции за счет диэлектрических потерь, которые малы при напряжении до 35 кВ. При расчете температуры изоляции и длительно допустимой токовой нагрузки кабеля передачей тепла излучением также пренебрегают [1].

Одним из вариантов учета на этапе проектирования и эксплуатации высших гармоник тока, генерируемых нелинейными электроприемниками, является введение поправочного коэффициента для допустимых длительных токов, который учитывал бы дополнительные потери активной мощности от их воздействия. В работе рассмотрен наиболее простой метод расчета – аналитический, а также проводится проверка допустимой температуры нагрева жилы кабеля с использованием моделирования картины теплового поля в программной среде Comsol Multiphysics.

Задача решается на примере кабелей АВВГ-п 4x2,5 мм² и АВВГ-п 3x4+1x2,5 мм² с различными сечениями фазной и нулевой жил. Этот же подход может применяться к расчету подобных объектов.

Рассмотрим вычисление поправочного коэффициента для кабеля АВВГ-п 4x2,5 мм². Активное сопротивление жил кабеля $R_1 = R_1^{\text{нуз}} = 0,0126 \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}$, табличное значение длительно допустимого тока $I_{\text{дл.доп}}^{\text{раб}} = 21 \text{ А}$.

Спектр высших гармоник в долях основной частоты принимаем как осредненные по фазам полуволновые значения в режиме максимума нагрузки (табл. 3). Это связано с тем, что недельный график мощности характеризуется периодичностью с началом и окончанием рабочего

дня. Рассматриваются три фидера распределительных щитков административного здания, в которых установлены источники несинусоидальности – компьютеры, люминесцентные лампы, оргтехника.

Кабель АВВГ-п 4x2,5 мм² подсоединен к фидеру и питает нелинейных потребителей. Если по кабелю протекает ток основной частоты, равный 16,46 А, то кроме него в фазной жиле протекают токи высших гармоник, которые можно рассчитать, зная спектр токов (табл. 3). Полученные результаты сведены в табл. 4.

Активное сопротивление жилы тока на *n*-й гармонике (R_n) для $n \geq 3$ определяется по формуле (1) [1] (табл. 5):

$$R_n = R_1 (0,0187 + 0,532\sqrt{n}), \quad (1)$$

где *n* – номер гармоники; R_1 – сопротивление жилы токам на основной частоте, Ом.

Табл. 3. Значения токов высших гармоник административного здания в режиме наибольшей нагрузки в долях от тока основной частоты

Номер гармоники	Здание №1	Здание №2 (максимальное значение)	Здание №3
1	1	1	1
3	0,131	0,293	0,238
5	0,136	0,139	0,138
7	0,065	0,102	0,087
9	0,079	0,152	0,105
11	0,026	0,095	0,049
13	0,038	0,038	0,082
15	0,021	0,033	0,039
17	0,037	0,046	0,035
19	0,015	0,022	0,021
21	0,007	0,014	0,008

Табл. 4. Значение токов высших гармоник в фазной жиле

<i>n</i>	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	$I_{\text{фазн}}^{\text{раб}}$, А
Значение тока, А	16,46	4,82	2,29	1,7	2,5	1,56	0,63	0,54	0,76	0,36	0,23	18,1

Табл. 5. Активное сопротивление жилы тока на *n*-й гармонике R_n для $n \geq 3$

<i>n</i>	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
R_n , Ом	0,0126	0,014	0,0173	0,02	0,0225	0,0246	0,0265	0,0283	0,03	0,0316	0,0331

Общие потери активной мощности $P_{\Sigma}^{\text{фазн}}$ в фазной жиле можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}^{\text{фазн}} &= P_1^{\text{фазн}} + \sum_{n=2}^{40} P_n^{\text{фазн}} = I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_1^2 \cdot R_n = \\ &= I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_1^2 \cdot R_n = I_1^2 \cdot R_1 + \sum_{n=2}^{40} (K_{ln} \cdot I_1) \cdot R_1 \cdot (0,187 + \\ &+ 0,532 \cdot \sqrt{n}) = I_1^2 \cdot R_1 \left(1 + \sum_{n=2}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n \right), \quad (2) \end{aligned}$$

где $A_n = 0,0187 + 0,532\sqrt{n}$; K_{ln} – отношение тока основной частоты к току высшей гармоники; I_1 – среднеквадратичное значение тока n -й гармоники.

Потери мощности, выделившиеся в одной фазе жилы, равны:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}^{\text{фазн}} &= 16,46^2 \cdot 0,0126 + 4,82^2 \cdot 0,014 + \dots \\ &\dots + 0,23^2 \cdot 0,0331 = 4,13 \text{ Вт.} \quad (3) \end{aligned}$$

Действующее значение тока в фазной жиле

$$I_{\delta}^{\text{фазн}} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma}^{\text{фазн}}}{R_1}} = \sqrt{\frac{4,13}{0,0126}} = 18,1 \text{ А.} \quad (4)$$

Полученное действующее значение равно допустимому длительному току для кабеля сечением $2,5 \text{ мм}^2$.

По нулевому проводнику протекают токи высших гармоник, которые кратны трем. Значения токов высших гармоник и активное сопротивление жилы тока на $n=6k-3$ гармонике $R_n^{\text{нул}}$ сведены в табл. 6, 7.

По нулевому проводнику протекают токи высших гармоник $n=6k-3$ и постоянная составляющая тока, которая редко встречается и ею можно пренебречь. Значения этих токов в 3 раза больше величины токов высших гармоник в фазных жилах. Потери мощности, выделившиеся в нулевой жиле, равны в соответствии с формулой:

$$P_{\Sigma}^{\text{нул}} = 9 \sum_{\substack{n=6k-3 \\ n=3,9,15...}}^{40} I_n^2 \cdot R_n^{\text{нул}}. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}^{\text{нул}} &= 14,47^2 \cdot 0,014 + 7,51^2 \cdot 0,0225 + \dots \\ &\dots + 0,69^2 \cdot 0,0331 = 4,28 \text{ Вт.} \quad (6) \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}^{\text{нул}} &= 9 \cdot \sum_{\substack{n=6k-3 \\ n=3,9,15...}}^{40} (K_{ln} \cdot I_1)^2 \cdot R_1^{\text{нул}} \cdot A_n = \\ &= 9 \cdot I_1^2 \cdot R_1^{\text{нул}} \cdot \sum_{\substack{n=6k-3 \\ n=3,9,15...}}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n, \quad (7) \end{aligned}$$

где $R_1^{\text{нул}}$ – активное сопротивление нулевой жилы на основной частоте.

Действующее значение тока в нулевой жиле

$$I_{\delta}^{\text{нул}} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma}^{\text{нул}}}{R_1^{\text{нул}}}} = \sqrt{\frac{4,28}{0,0126}} = 18,43 \text{ А.} \quad (8)$$

При расчете потерь активной мощности на высших гармониках учитываются гармоники от 2 до 40. Значения токов высших гармонических составляющих выше 40-го порядка являются незначительными и ими можно пренебречь при отсутствии мощных источников искажения.

Определим сумму потерь активной мощности в нулевой и фазных жилах [1]:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma} &= 3 \cdot P_{\Sigma}^{\text{фазн}} + P_{\Sigma}^{\text{нул}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \times \\ &\times \left(1 + \sum_{n=2}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n \right) + 9 \cdot I_1^2 \cdot R_1^{\text{нул}} \times \\ &\times \sum_{\substack{n=6k-3 \\ n=3,9,15...}}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \times \\ &\times \left(1 + \sum_{n=2}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n + 3 \cdot \frac{R_1^{\text{нул}}}{R_1} \cdot \sum_{\substack{n=6k-3 \\ n=3,9,15...}}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n \right) = \\ &= 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \cdot K_{don} = 3 \cdot I_{\text{экв}}^2 \cdot R_1, \quad (9) \end{aligned}$$

где $I_{\text{экв}} = I_1 \cdot \sqrt{K_{don}}$; K_{don} – коэффициент дополнительных потерь активной мощности из-за токов гармоник.

Отсюда видно, что потери активной мощности в кабеле отличаются на величину дополнительных потерь K_{don} . Определим коэффициент добавочных потерь от токов высших гармоник K_{don} :

$$K_{don} = 1 + \sum_{n=2}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n + 3 \cdot \frac{R_1^{\text{нул}}}{R_1} \cdot \sum_{\substack{n=6k-3 \\ n=3,9,15...}}^{40} (K_{ln})^2 \cdot A_n, \quad (10)$$

Табл. 6. Значение токов высших гармоник в нулевой жиле

n	3	9	15	21	$I_{\delta}^{\text{нул}}$, А
Значение тока, А	14,47	7,51	1,63	0,69	18,43

Табл. 7. Активное сопротивление нулевой жилы тока на $n=6k-3$ гармонике $R_n^{\text{нул}}$

n	3	9	15	21
$R_n^{\text{нул}}$, Ом	0,014	0,0225	0,0283	0,0331

Тогда значение коэффициента высших гармоник тока K_{BG} и длительного допустимого тока с учетом поправок равно:

$$K_{BG} = \frac{1}{\sqrt{K_{don}}} = \frac{1}{\sqrt{1,63}} = 0,784. \quad (11)$$

Коэффициент K_{BG} может использоваться только для нахождения тока основной частоты. Действующее значение несинусоидального тока превосходит значение тока основной частоты. Для него следует ввести коэффициент K_{nel} , который рассчитывается по формуле:

$$K_{nel} = \frac{I_{\text{дл.доп}}^{\text{маб}}}{I_{\text{д}}^{\text{маб}}} = \frac{21}{18,1} = 1,16, \quad (12)$$

где $I_{\text{дл.доп}}^{\text{маб}}$ – табличное значение длительного допустимого тока; $I_{\text{д}}$ – действующее значение фактического тока.

Значение длительного допустимого тока основной частоты с учетом поправок на токи высших гармоник

$$I_{\text{дл.доп}}^{BG} = I_{\text{дл.доп}}^{\text{маб}} \cdot K_{BG} = 21 \cdot 0,784 = 16,46 \text{ А.} \quad (13)$$

Под влиянием высших гармоник тока значение

длительно допустимого тока $I_{\text{дл.доп}}^{\text{маб}}$ уменьшается на $\Delta_{\text{фазн}}$ (табл. 8). Также при наличии гармонических составляющих в нулевом проводе протекает ток $I_{\text{нул}}$, который превышает фазный $I_{\text{фазн}}$ на $\Delta_{\text{нул}}$.

При значительной несимметрии ток нулевого провода может превышать фазные токи, что создает проблему перегрузки и его возможного повреждения. В связи с этим возникает необходимость знать точную величину тока в нулевом проводе расчетным путем. В ходе вычислений будет использоваться графический метод для наглядности, а расчетная часть выполняется с применением тригонометрических формул.

На векторной диаграмме изображены заданные векторы токов A , B , C (рис. 2а). Фаза A в качестве эксперимента имеет значение тока 22 А, фаза B – 5 %-ное отклонение от заданного значения, т.е. 20,9 А, а фаза C – 10 %-ное отклонение, т.е. 19,8 А.

На рис. 2а изображены проекции этих векторов на оси x и y , а на рис. 2б показано их сложение путем параллельного переноса. Вектор тока в нулевом проводе I_h вычислен по теореме Пифагора с учетом проекций I_{hx} и I_{hy} .

Для определения проекций фазных токов I_x оси x и I_y оси y приведем расчет на примере фазы B . Фазы A , C рассчитываются аналогично.

Табл. 8. Отклонение значений фазного и нулевого тока с учетом поправочного коэффициента

Марка кабеля	$I_{\text{дл.доп}}^{\text{маб}}$, А	$I_{\text{д}}^{\text{фазн}}$, А	$I_{\text{д}}^{\text{нул}}$, А	$\Delta_{\text{фазн}}$, %	$\Delta_{\text{нул}}$, %
АВВГ-п 4х2,5 мм^2	21	18,1	18,43	13,81	1,8
АВВГ-п 3х4+1х2,5 мм^2	29	20,17	23,43	30,4	16,1

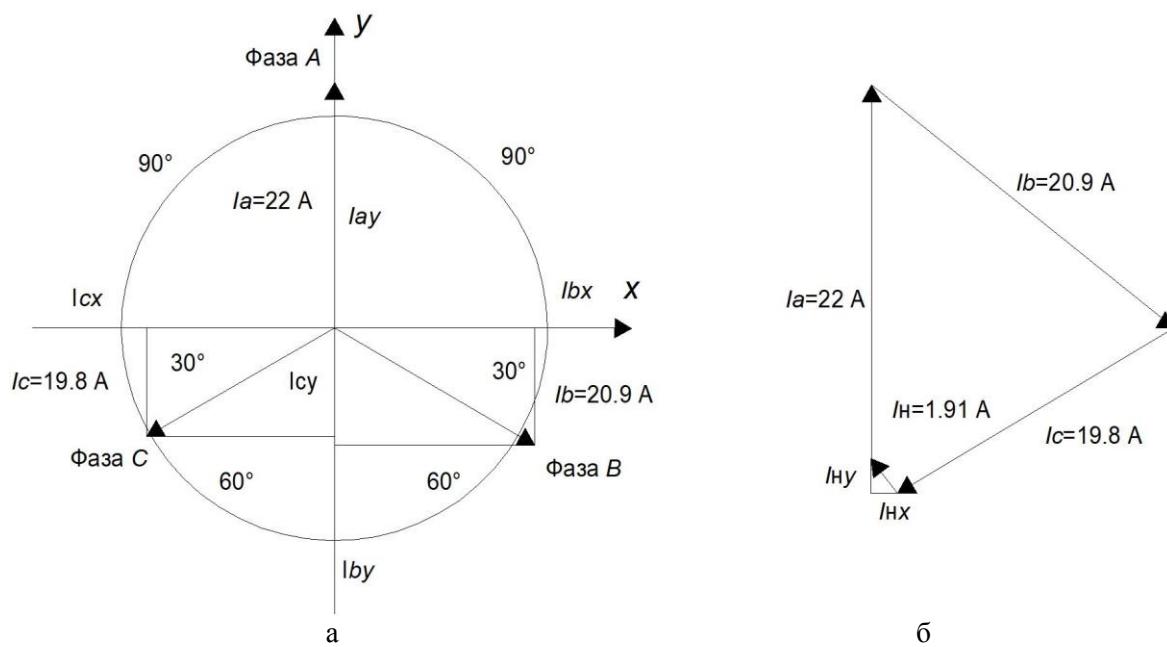


Рис. 2. Векторная диаграмма, поясняющая расчет тока в нулевом проводе при неравномерной активной трехфазной нагрузке:
а – векторы токов трехфазной сети; б – ток в нулевом проводе

Проекции I_{bx} , I_{by} – это проекции полного значения тока I_b . Для I_{by} следует учесть расположение в области отрицательных значений оси y :

$$I_{bx}=I_b \cdot \cos 30^\circ=20,9 \cdot 0,866=18,1, \quad (14)$$

$$I_{by}=I_b \cdot \cos 60^\circ=20,9 \cdot 0,5 \cdot (-1)=-10,45. \quad (15)$$

Получив все значения проекций (табл. 9), сложим их по осям x и y :

$$I_{nx}=I_{ax}+I_{bx}+I_{cx}=0+18,1-17,15=0,95, \quad (16)$$

$$I_{ny}=I_{ay}+I_{by}+I_{cy}=22-10,45-9,9=1,65. \quad (17)$$

Полное значение тока в нулевом проводе

$$I_n=\sqrt{I_{nx}^2+I_{ny}^2}=\sqrt{0,95^2+1,65^2}=1,91 \text{ А.} \quad (18)$$

Для расчета нагрева четырехжильных проводников при открытой прокладке был взят кабель АВВГ-п (рис. 3). Он состоит из трех фазных жил и одной нулевой жилы. Эксперименты, проведенные в программной среде Comsol Multiphysics, позволяют определить характер нагрева электрических проводников и зоны наиболее сложной теплоотдачи (рис. 4).

В эксперименте проводилось вычисление температур в точке между жилой и изоляцией при работе одной, двух, трех фаз с током в нулевой жиле $I_n=I_\phi/2$ (рис. 5), а также с разными кратностями тока в нулевой жиле ($0,5I_\phi$, I_ϕ , $1,5I_\phi$, $2I_\phi$) при одновременной работе трех фаз (рис. 6).

Для нормальной эксплуатации кабеля АВВГ-п $4 \times 2,5 \text{ мм}^2$ не нужно уменьшать значения токов в

трех работающих фазах I_ϕ при кратности тока в нулевой жиле $0,5I_\phi$, так как их температура не превышает 70°C . Для обеспечения безаварийной работы при более высоких кратностях тока в нулевой жиле следует уменьшать фазный ток I_ϕ .

Так, при максимально допустимой загрузке фазных жил и токе в нулевой жиле $I_n=0,5I_\phi$ установленная температура не превышает 70°C , а при $I_n=I_\phi$, $1,5I_\phi$, $2I_\phi$ прослеживается перегрев соответственно на 11 , 32 и 63°C . Поэтому требуется снижать величину I_ϕ , чтобы установленная температура нагрева находилась в пределах $68\ldots69^\circ\text{C}$.

Табл. 9. Значения проекций фаз токов A , B , C

	x	y	Ток, А
Фаза A	0	22	22
Фаза B	18,1	-10,45	20,9
Фаза C	-17,15	-9,9	19,8

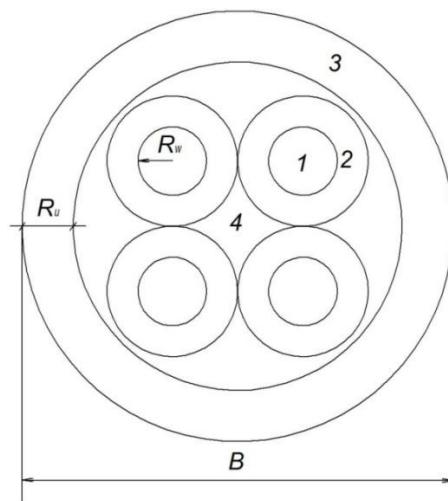


Рис. 3. Конструкция четырехжильного кабеля АВВГ-п

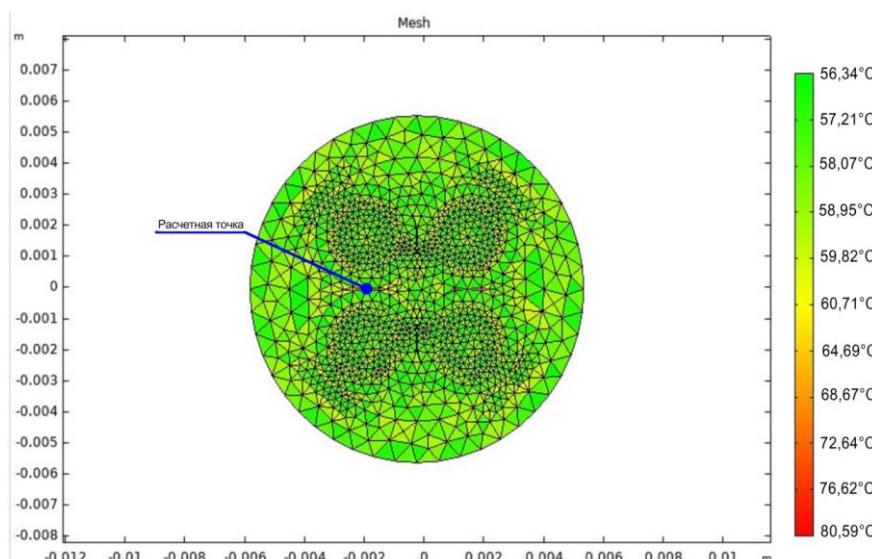


Рис. 4. Расчетная схема моделирования нагрева кабеля АВВГ-п $4 \times 2,5 \text{ мм}^2$ в программной среде Comsol Multiphysics, $I_\phi=I_n=21 \text{ А}$

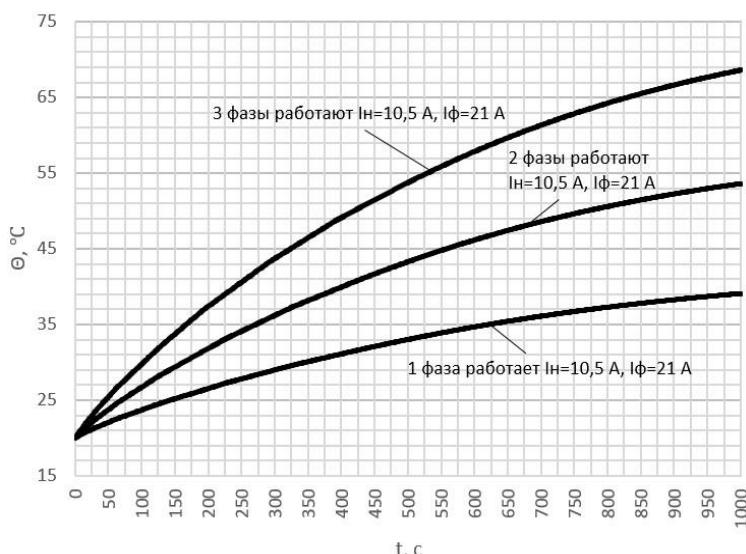


Рис. 5. Результаты моделирования динамики нагрева АВВГ-п 4х2,5 мм^2 при открытой прокладке на границе жила-изоляция и одновременной работе одной, двух, трех фаз, ток в нулевой жиле принят $0,5I_\phi$

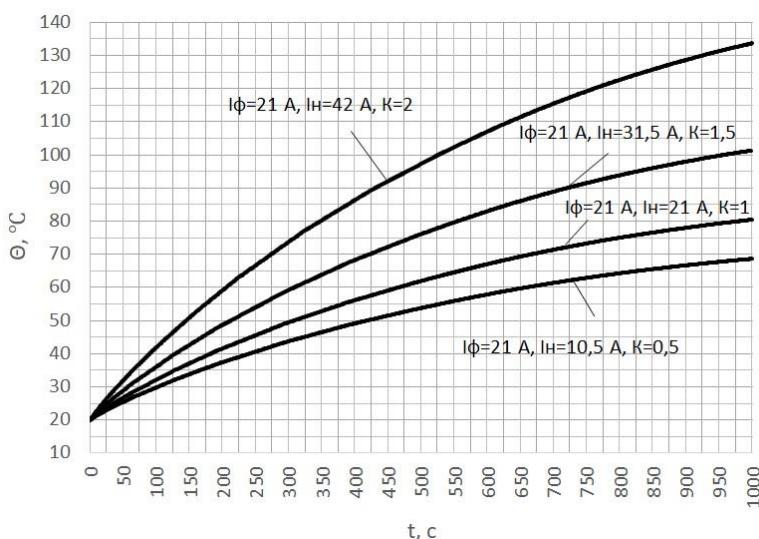


Рис. 6. Результаты моделирования динамики нагрева АВВГ-п 4х2,5 мм^2 при открытой прокладке на границе жила-изоляция с тремя работающими фазами и с кратностями протекающего тока в нулевой жиле $0,5I_\phi, I_\phi, 1,5I_\phi, 2I_\phi$

Выводы

Для определения длительно допустимого тока на основной частоте необходимо учитывать токи высших гармоник и влияние тока, протекающего в нулевой жиле. Расчет позволил получить значение тока основной частоты при заданном гармоническом спектре помехогенерирующих нагрузок, при котором изоляция проводника не будет перегреваться. Он приведен на примере кабелей АВВГ-п 4х2,5 мм^2 , АВВГ-п 3х4+1х2,5 мм^2 . В итоге, значение длительно допустимого тока кабелей с учетом поправок на токи высших гармоник $I_{\text{дл.доп}}^{\text{раб}}$ уменьшается на 13,81 и 20,62 % соответственно. При наличии гармонических составляющих заданного спектра в нулевом проводе протекает ток I_n , который превышает фазный I_ϕ на 1,8 и 1,75 % соответственно.

В экспериментальных целях для кабеля АВВГ-п 4х2,5 мм^2 были взяты несимметричные значения токов фаз $A - 22 \text{ A}$, $B - 20,9 \text{ A}$, $C - 19,8 \text{ A}$. Т.е. при отклонениях двух токов фаз от номинального (фаза $B - 5 \%$, фаза $C - 10 \%$) в нулевом проводе протекает ток, равный 8,68 % от номинального тока фазы A .

У кабеля АВВГ-п сечением 2,5 мм^2 при максимально допустимой загрузке фазных жил и токе в нулевой жиле $I_n=0,5I_\phi$ установившаяся температура не превышает 70 $^{\circ}\text{C}$, а при $I_n=I_\phi, 1,5I_\phi, 2I_\phi$ прослеживается перегрев на 11, 32 и 63 $^{\circ}\text{C}$. Поэтому требуется снижать величину I_ϕ , чтобы установившаяся температура нагрева находилась в пределах 68...69 $^{\circ}\text{C}$. Таким образом, допустимая температура нагрева кабеля зависит от значения тока в нулевой жиле I_n .

Список литературы

1. Симуткин, М.Г. Разработка методов оценки влияния нелинейных электроприемников на режимы работы оборудования распределительных сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Симуткин Максим Геннадьевич. – Москва: Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2014. – 150 с.
2. Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
3. Baggini, A.B. Handbook of Power Quality. – University of Bergamo, Italy: John Wiley and Sons, Ltd., 2008. – 618 p.
4. An approach to life estimation of electrical plant components in the presence of harmonic distortion / P. Caramia [et al.] // Harmonics and Quality of Power: Proc. 9th International Conference, Orlando (Florida, USA), 2000. – P. 887-892.
5. Шидловский, А.К. Высшие гармоники в низковольтных сетях: монография / А.К. Шидловский, А.А. Жаркин. – Киев: Наукова думка, 2005. – 210 с.
6. Белицкий, А.А. Оптимизация режимов работы электромеханического комплекса предприятия по критерию минимума тока в нулевом проводе: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Белицкий Антон Арнольдович. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – 123 с.
7. Правила устройства электроустановок. Изд. 7-е. – М.: Кнорус, 2015. – 491 с.
8. Расчет тока в нейтральном проводе при неравномерной активной трехфазной нагрузке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kd150kv.org/raschety.php#np>
9. Бершадский, И.А. Расчет нестационарного нагрева электропроводки 0,4 кВ / И.А. Бершадский, А.В. Згарбул, Е.Я. Наглюк // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. Т.2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2019. – С. 31-36.

I.A. Bershadskiy /Dr. Sci. (Eng.)/, V.V. Yakimishina /Cand. Sci. (Eng.)/, E.Ya. Naglyuk

Donetsk National Technical University (Donetsk)

IMPACT OF SINUSOIDALITY AND ASYMMETRY IN FOUR-WIRE NETWORK OF NON-INDUSTRIAL CONSUMERS ON REDUCING THE CABLE CAPACITY

Background. The results of calculations of the lengthy permissible current at the main frequency, taking into account the currents of higher harmonics, and the estimate of the current value in the zero core at load asymmetry, taking into account the thermal state of the cable in four-wire electrical networks of non-industrial consumers, are presented.

Materials and/or methods. The resulting cable heating temperature is determined by simulating the heating process calculated in the Comsol Multiphysics software environment.

Results. In the presence of harmonic components of a given spectrum for cables of grades АВВГ-*n* 4x2.5 mm², АВВГ-*n* 3x4+1x2.5 mm², the value of the lengthy permissible current decreased by 13.81 % and 20.62 %, respectively. The zero wire has a flow that exceeds the phase current by 1.8 % and 1.75 %, respectively. When two-phase currents deviate from the rated current (phase B – 5 %, phase C – 10 %), a current flows in the zero wire, which is equal to 8.68 % of the rated current of phase A.

Conclusion. In nonsinusoidal and nonsymmetrical load modes, it is required to reduce the current value of the cable's phase cores so that the established heating temperature of the cable is within 68...69 °C. The permissible heating temperature of the cable also depends on the current in the zero wire.

Keywords: nonsinusoidal, unbalancing, load, power-consuming equipment, the spectrum of harmonics.

Сведения об авторах**И.А. Бершадский**

СПИН-код: 4772-3504
Телефон: +380 (71) 414-28-12
Эл. почта: ibersh164@gmail.com

Е.Я. Наглюк

Телефон: +380 (71) 379-28-49
Эл. почта: katianagluk2010@mail.ru

В.В. Якимишина

Телефон: +380 (71) 355-07-87
Эл. почта: yvsm@list.ru

Статья поступила 23.04.2020 г.

© И.А. Бершадский, В.В. Якимишина, Е.Я. Наглюк, 2020

Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич