



## ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

### К вопросу о выборе нулевых проводников в городских электрических сетях\*

Вагин Г. Я., доктор техн. наук,  
Севостьянов А. А., Солнцев Е. Б., кандидаты техн. наук, Терентьев П. В., инж.

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Исследованы причины повреждения кабелей в городских электрических сетях 380/220 В. Установлено, что основная из них — перегрев нулевой жилы, связанный с выбором сечения кабелей без учета высших гармоник (ВГ) тока и несовершенством нормативных документов по выбору сечения нулевых жил. Представлены результаты исследования ВГ тока, генерируемых различными электроприемниками. Даны рекомендации по выбору сечения нулевых рабочих проводников с учетом ВГ.

**Ключевые слова:** городские электрические сети, выбор сечения нулевых проводников, высшие гармоники тока, нелинейные однофазные потребители электроэнергии.

Проведенные авторами исследования систем электроснабжения городских электрических сетей напряжением 380/220 В и публикации [1–8] свидетельствуют о выходах в них из строя питающих кабелей. В России наиболее часто это происходит с кабелями АСБ, когда в качестве нулевого провода используется их свинцовая оболочка или сечение нулевой жилы питающих кабелей принимается меньше 0,5 сечения фазной жилы. В данной статье авторы на основе собственных исследований и анализа нормативных документов указывают причины неисправностей кабелей в сетях 380/220 В и дают рекомендации по их устранению.

Главная причина повреждения кабелей — перегрев нулевой жилы, возникающий из-за неучета влияния ВГ тока при выборе ее сечения, и несовершенства нормативных документов — ПУЭ 6-го [9] и 7-го [10] изданий. В соответствии с ПУЭ различают нулевые рабочие (N) и нулевые защитные (PE) проводники. В системе зануления, существовавшей до 1998 г. (TN-C), применялась совмещенная система (PEN) [9].

В п. 1.7.74 ПУЭ [9] допускается использование в городских электрических сетях (при реконструкции) в качестве нулевых защитных проводников свинцовой оболочки кабелей. Этот пункт противоречит всем ранее проведенным исследованиям, согласно которым

проводимость защитных проводников должна быть не менее 50 % проводимости фазных [11, 12]. В переработанном 6-м издании ПУЭ, вышедшем в 1998 г., данный пункт еще оставался в силе, но в 7-м издании ПУЭ [10] ошибка была исправлена. В п. 1.7.126 даны следующие значения минимальных сечений защитных проводников: при сечении фазных проводников  $F_{\phi} \leq 16 \text{ мм}^2$  —  $F_{PE} = F_{\phi}$ ; при  $16 < F_{\phi} \leq 35 \text{ мм}^2$  —  $F_{PE} = 16 \text{ мм}^2$ ; при  $F_{\phi} > 35 \text{ мм}^2$  —  $F_{PE} = F_{\phi}/2$ . Аналогичные нормы приняты во многих странах Западной Европы и в США [4, 12]. Однако несмотря на это, кабели с нулевой жилой, сечением намного меньше 0,5 сечения фазной, выпускаются в России до настоящего времени. Ниже приведены сечения,  $\text{мм}^2$ , четырехжильных кабелей марок ВВГ, ВВГ<sub>нг</sub>, АВВГ, АВВГ<sub>нг</sub>, АПВГ на напряжение 0,66 кВ [13]:  
 $3 \cdot 2,5 + 1 \cdot 1,5$ ;  $3 \cdot 4 + 1 \cdot 2,5$ ;  $3 \cdot 6 + 1 \cdot 4$ ;  
 $3 \cdot 10 + 1 \cdot 6$ ;  $3 \cdot 16 + 1 \cdot 10$ ;  $3 \cdot 25 + 1 \cdot 16$ ;  
 $3 \cdot 35 + 1 \cdot 16$ ;  $3 \cdot 50 + 1 \cdot 25$ ;  $3 \cdot 70 + 1 \cdot 25$ ;  
 $3 \cdot 95 + 1 \cdot 35$ ;  $3 \cdot 120 + 1 \cdot 35$ ;  $3 \cdot 150 + 1 \cdot 50$ ;  
 $3 \cdot 185 + 1 \cdot 50$ ;  $3 \cdot 240 + 1 \cdot 70$ .

Применение кабелей с сечением нулевой защитной жилы меньше 0,5 сечения фазной резко снижает безопасность обслуживания электрических сетей, так как увеличивается время срабатывания защитных аппаратов при однофазных КЗ. Использование таких кабелей особенно опасно в жилых зданиях, где нет постоянного обслуживающего персонала.

\* В порядке обсуждения. *Ред.*

Потребитель	Ток гармоник (в % от тока первой гармоники)							
	1-й	3-й	5-й	7-й	9-й	11-й	13-й	15-й
ПЭВМ (процессор AMD Athlon II X3 425 2,7 ГГц), ненагруженный режим	100	86,5	62,0	34,7	13,3	13,9	17,7	13,8
ПЭВМ (процессор AMD Athlon II X3 425 2,7 ГГц), нагруженный режим	100	87,7	64,6	38,1	13,7	9,0	15,2	13,1
ПЭВМ (процессор Intel Celeron 2,4 ГГц), ненагруженный режим	100	68,3	24,7	11,6	10,8	3,0	5,2	4,2
ПЭВМ (процессор Intel Celeron 2,4 ГГц), нагруженный режим	100	69,4	29,8	15,8	9,6	3,2	9,2	6,4
СВЧ-печь Samsung MW73VR	100	24,2	5,5	3,8	2,1	1,2	0,9	0,7
Компактная люминесцентная лампа (Navigator), 20 Вт	100	74,1	46,9	38,1	29,2	13,2	1,7	5,2
ЛЛ 2 × 36 с ЭмПРА	100	24,3	4,3	0,8	1,4	1,1	0,3	0,4
ЛЛ 2 × 36 с ЭПРА	100	11,4	5,9	1,7	2,8	1,1	0,4	1,1

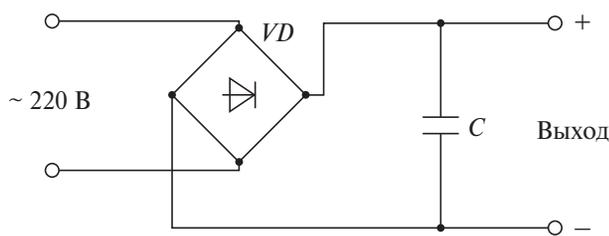
Проанализируем, как выбирается сечение нулевой рабочей жилы кабелей. Согласно п. 7.1.33 ПУЭ [9] оно должно быть равно сечению фазных проводников в случаях, когда сечения последних не превышают  $25 \text{ мм}^2$ , а при больших сечениях — не менее 50 % сечения фазных проводников. Однако в п.2.3.52 допускается при реконструкции городских электрических сетей использовать в качестве нулевого провода свинцовую оболочку трехжильных кабелей. Этот пункт, вошедший в ПУЭ в 1986 г., действует и сегодня, так как 7-го издания главы 2 ПУЭ пока нет. Поскольку проектировщики и монтажники могли придерживаться этого пункта ПУЭ, который не соответствует правилам как техники безопасности, так и пожарной безопасности, необходима ревизия систем электроснабжения всех городских зданий, построенных или реконструированных за последние 30 лет.

В ПУЭ 7-го издания скорректированы требования к сечению нулевого рабочего проводника, которое в соответствии с п. 7.1.45 должно быть равно сечению фазного проводника при питании однофазных нагрузок. Однако значительное увеличение в жилых и общественных зданиях количества однофазных нелинейных потребителей электроэнергии (компьютерной техники, газоразрядных источников света, светодиодов, телевизоров, СВЧ-печей, медицинской аппаратуры, зарядных устройств и др.) требует новых подходов к выбору нулевых рабочих проводников.

Авторы с помощью анализатора качества электрической энергии Fluke 434 провели исследование гармоник тока, генерируемых некоторыми из этих потребителей (см. таблицу). Полученные результаты сходятся с аналогичными и в других странах [3–6, 8]. В частности, в [8] приведены итоги исследования содержания гармоник тока, генерируемых цветными телевизорами: 3-й гармоники —  $73 \div 82 \%$  от первой, 5-й —  $59 \div 66 \%$ , 7-й —  $34 \div 43 \%$ , 9-й —  $14 \div 27 \%$ , 11-й —  $9 \div 15 \%$ , 15-й —  $4 \div 4,5 \%$ .

Результаты анализа показывают, что наибольшие уровни гармоник тока генерируют потребители с импульсными источниками питания (с ключевым режимом работы), преобразующими переменное напряжение электросети в одно или несколько постоянных напряжений (ими оснащаются компьютеры, цветные телевизоры, газоразрядные и светодиодные источники света, зарядные устройства аккумуляторов сотовых телефонов, источники питания дисплеев и др.) Входной блок этих источников содержит диодный мост  $VD$  с накопительным конденсатором  $C$  (см. рисунок). За счет высокой скорости переключения токов и напряжений импульсные источники генерируют в сеть большие уровни ВГ тока, порядок которых определяется из выражения

$$n = kp \pm 1, \quad (1)$$



где  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $p$  — пульсность преобразователя;  $n$  — номер гармоники.

Уровень тока гармоник зависит от емкости накопительного конденсатора  $C$ , с увеличением которой коэффициент нелинейных искажений тока может достигать 250 % [4, 5].

Большие уровни гармоник тока, кратных трем, в импульсных источниках питания приводят к возрастанию тока в нулевых рабочих проводниках. Этот ток определяется из выражения

$$I_N = \sqrt{I_{\text{неб}}^2 + 3 \sum_{n=3}^{39} I_{3n}^2}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{неб}}^2$  — действующее значение тока небаланса (от неравномерного распределения нагрузок по фазам);  $I_{3n}$  — действующее значение токов гармоник, кратных трем (от 3-й до 39-й).

В фазных проводниках протекает ток

$$I_{\phi} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2}, \quad (3)$$

где  $I_1$  — действующее значение тока основной частоты;  $I_n$  — действующее значение токов гармоник (от 2-й до 40-й).

Как показано в [6],  $I_N$  может превышать  $I_{\phi}$  в 1,5 – 2 раза, что характерно для большого количества потребителей с импульсными источниками питания.

При выборе сечения нулевых рабочих жил кабелей и проводов, по которым питаются нелинейные однофазные потребители электроэнергии, в [2] предложено вводить понижающие коэффициенты. Авторы данной статьи считают, что это неприемлемо по следующим причинам:

1) исследование проведено только для кабелей одного типа, причем неперспективного для использования в сетях 380/220 В с глухозаземленной нейтралью;

2) соотношение линейной и нелинейной нагрузок во всех типах зданий разное и по-

стоянно изменяется в сторону увеличения нелинейной нагрузки, поэтому нельзя получить однозначные понижающие коэффициенты;

3) анализ подходов к решению рассматриваемой проблемы в ведущих странах показывает, что там предпочитают снижать уровни гармоник тока, генерируемых данными потребителями [3, 4, 7, 8], а не вводить понижающие коэффициенты.

Все производители электротехнического, электронного и радиоэлектронного оборудования и изделий (далее — технических средств ТС) должны придерживаться стандартов на ограничение гармонических составляющих тока, инжектируемых в системы электроснабжения. Например, в действующем в США стандарте IEEE 519–1992 [14], который содержит рекомендации по контролю ВГ тока и напряжения, установлены максимальные значения токов нечетных гармоник (в процентах от первой гармоники) и общий коэффициент нелинейных искажений по току в точках общего присоединения потребителей электроэнергии. Эти максимальные значения приняты в зависимости от отношения тока КЗ  $I_{\text{КЗ}}$  к току нелинейной нагрузки  $I_{\text{нел}}$  в точках общего присоединения. В случае превышения этими показателями требований стандарта изготовители ТС должны ограничить токи гармоник путем оснащения его корректорами коэффициента мощности (ККМ). Наиболее перспективны активные ККМ, выполненные на базе преобразователей напряжения повышающего или понижающего типа. ККМ формирует близкую к синусоидальной форму входного тока и близкий к единице коэффициент мощности.

Ведущие иностранные производители ТС (телевизоров, компьютеров, газоразрядных источников света, светодиодов и др.) с импульсными источниками питания оснащают их ККМ, структурные и схемы включения которых приведены в [4, 15 – 17].

В Евросоюзе действуют три стандарта по ограничению эмиссии гармонических составляющих тока: МЭК 61000-3-2–2005 для ТС с потребляемым током не более 16 А; МЭК 61000-3.12–2004 для ТС с потребляемым током от 16 до 75 А; технический отчет МЭК 61000-3.4–1998 для ТС с потребляемым током более 75 А. В РФ используются модифицированные версии данных стандартов: ГОСТ Р 51317.3.2–2006 [18], ГОСТ Р 51317.3.12–2006 [19], ГОСТ Р 51317.3.4–2006 [20].

В ГОСТ Р 51317.3.2–2006 все ТС с потребляемым током до 16 А делятся на 4 класса:

**класс А** — симметричные трехфазные технические системы, бытовые электрические приборы, электрические инструменты, устройства регулирования силы света ламп накаливания, аудиооборудование;

**класс В** — переносные электрические инструменты, оборудованные для сварки, но не относящиеся к профессиональному оборудованию;

**класс С** — осветительное оборудование;

**класс D** — персональные компьютеры и мониторы, телевизоры.

Для каждого класса определены нормы гармонических составляющих тока, которые они могут генерировать в сеть.

В ГОСТ Р 51317.3.12–2006, охватывающем ТС с потребляемым током от 16 до 75 А, установлены предельно допустимые нормы эмиссии гармонических составляющих нечетных гармоник тока и общий коэффициент нелинейных искажений тока (в процентах от первой гармоники). Нормы даны в зависимости от отношения мощности КЗ  $S_{КЗ}$  в точке общего присоединения к мощности нелинейной нагрузки  $S_{нел}$ . Изготовитель ТС должен указать в эксплуатационных документах о его соответствии данному стандарту при отношении  $S_{КЗ}/S_{нел} = 33$ . Если это соответствие не соблюдается, изготовитель ТС должен определить минимальное значение отношения  $S_{КЗ}/S_{нел}$ , при котором уровни эмиссии гармонических составляющих тока ТС не превышают норм данного стандарта.

ГОСТ Р 51317.3.4–2006 охватывает ТС с потребляемым током более 75 А. Их изготовители должны указать в эксплуатационных документах значения индивидуальных гармонических составляющих потребляемого тока и коэффициенты этих составляющих. Точки подключения данных ТС необходимо согласовывать с поставщиком электрической энергии.

На основе проведенных исследований можно дать следующие рекомендации по выбору нулевых защитных и рабочих проводников в городских электрических сетях:

указанные проводники следует выбирать в соответствии с п. 7.1.45 ПУЭ 7-го издания;

нужно исключить из Правил п. 2.3.52 ПУЭ 6-го издания, в котором допускается использовать в качестве нулевого провода свинцовую оболочку трехжильных кабелей;

при выборе сечения проводов и кабелей наряду с расчетным током, протекающим по фазным проводам, необходимо определять из выражения (2) расчетный ток в нулевом рабочем проводе. При превышении им фазового тока следует принять меры по его уменьшению с помощью корректоров коэффициента мощности или фильтров ВГ (пассивных или активных).

### Выводы

1. Большое количество нелинейных однофазных потребителей электрической энергии в городских электрических сетях 380/220 В создают высокие уровни ВГ, кратных трем, в нулевых проводниках, что приводит к их перегреву и повреждению кабелей. Особенно часто повреждаются кабели марки АСБ, в которых в качестве нулевого проводника используется свинцовая оболочка кабеля.

2. Рекомендация в п. 2.3.52 ПУЭ [9] о возможном использовании при выборе сечения нулевого проводника в городских электрических сетях свинцовой оболочки кабелей противоречит многочисленным исследованиям, проведенным как в России, так и за рубежом. Учитывая большой срок ее существования (более 30 лет), Ростехнадзору необходимо провести ревизию систем электроснабжения всех городских зданий, которые были построены или реконструированы за это время.

3. Исследование ВГ тока, генерируемых различными электроприемниками в городских зданиях, показывает, что наибольшие уровни ВГ создают однофазные нелинейные потребители с импульсным режимом работы.

4. Производители нелинейных однофазных потребителей электроэнергии должны в паспортах оборудования указывать на его соответствие стандартам ГОСТ Р 51317 3.2, ГОСТ Р 51317 3.12 или ГОСТ Р 51317 3.4 и наличие в них корректоров коэффициента мощности.

### Список литературы

1. **Оценка** теплового режима кабеля, питающего нелинейную нагрузку / В. Н. Тульский, И. И. Карташов, М. Г. Симуткин, Р. Р. Насыров. — Промышленная энергетика, 2012, № 7.
2. **Влияние** высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В. Н. Тульский, И. И. Карташов, М. Г. Симуткин, Р. Р. Насыров. — Промышленная энергетика, 2013, № 5.
3. **Ульямс Т., Армстронг К.** ЭМС для систем и установок / Пер. с англ. — М.: Издательский Дом «Технологии», 2004.

4. **Куско А., Томпсон М.** Качество энергии в электрических сетях / Пер. с англ. — М.: Додэка-XXI, 2008.
5. **Жежеленко И. В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 2004.
6. **Шидловский А. К., Жаркин А. Ф.** Высшие гармоники в низковольтных сетях. — Киев: Наукова думка, 2005.
7. **Экономика** в энергетике и энергоснабжение посредством рационального использования электро-технологии: Учеб. пособие для вузов. — СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 1998.
8. **Арилла Дж., Брэдли Д., Боджеер П.** Гармоники в электрических системах / Пер. англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. **Правила** устройства электроустановок 6-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. **Правила** устройства электроустановок. 7-е изд. (разделы I и 7). — СПб.: Изд-во ДЕАН, 2004.
11. **Карпов Ф. Ф.** Расчет городских распределительных электрических сетей. — М.: Энергия, 1968.
12. **Найфельд М. Р.** Заземление, защитные меры электробезопасности. — М.: Энергия 1971.
13. **Кабели ВВГ** (<http://www.briefreview.ru/item/kabel-vvg-i-vvgng.html>).
14. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.** — IEEE Std. 519 – 1992.
15. **Применение** светильников нового поколения для наружного освещения предприятий / Г. Я. Вагин, А. И. Гардин, А. А. Асабин, А. С. Шевченко. — Промышленная энергетика, 2011, № 4.
16. **Энергоэффективное** электрическое освещение: Учеб. пособие / С. М. Гвоздев, Д. И. Пажрилов, В. Д. Поляков и др. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
17. **Современные** блоки питания АТХ и их характеристики (<http://www.easycom.com.ua/data/power/0907282251>).
18. **ГОСТ Р 51317.3.2–2006 (МЭК 61000-3.2).** Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А. — М.: Стандартиформ, 2007.
19. **ГОСТ Р 51317.3.12–2006 (МЭК 61000-3.12).** Ограничение гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. — М.: Стандартиформ, 2007.
20. **ГОСТ Р 51317.3.4–2006 (МЭК 61000-3.4).** Ограничение эмиссии гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током более 16 А, подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. — М.: Стандартиформ, 2007.

terentyevpv@inbox.ru