

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В¹

Тульский В. Н., Карташев И. И., кандидаты техн. наук, Насыров Р. Р.,
Симуткин М. Г., инженеры

НИУ “МЭИ”, Москва

Представлены результаты оценки влияния высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В. Приведены данные измерений показателей качества электроэнергии по току в этой сети. Рассмотрены тепловые процессы в четырехжильном кабеле при питании нелинейных потребителей. Рассчитаны понижающие коэффициенты, учитывающие тип нелинейного потребителя. Описаны механизмы теплового и электрического старения изоляции кабелей вследствие протекания токов высших гармоник.

Ключевые слова: кабельные линии, токовая нагрузка, температурное поле, качество электрической энергии, высшие гармоники.

Многочисленные инструментальные исследования качества электроэнергии в электрических сетях различных классов напряжения показывают, что сегодня одной из острых проблем является искажение синусоидальности кривой напряжения. Так, результаты контроля качества электроэнергии в сетях 380 В [1] свидетельствуют о том, что практически на каждой третьей трансформаторной подстанции уровень искажения синусоидальности кривой напряжения, особенно из-за 3, 9 и 15-й гармоник, существенно превышает нормально допустимые по ГОСТ 13109–97 значения. В основном это обусловлено увеличением в жилых и общественных зданиях доли нелинейных электроприемников, несинусоидальные токи которых могут стать причиной сокращения срока службы и выхода из строя питающих кабельных линий.

В данной статье приведены результаты исследований² сотрудников кафедры “Электроэнергетические системы” НИУ “МЭИ” о влиянии высших гармоник тока и напряжения на режимы работы кабельных линий электропередачи. Суть исследуемой проблемы заключается в следующем. При питании нелинейных электроприемников по нулевой жиле силового кабеля протекают токи, кото-

рые возникают из-за отсутствия сдвига высших гармоник, кратных трем, в фазах трехфазной системы. Наряду с этим в нулевой жиле возможно появление токов вследствие несимметричной загрузки фаз. В отдельных случаях действующее значение тока в данном проводнике может в 1,5–2 раза превышать ток в фазе [3]. В большинстве кабельных линий сетей низкого напряжения, спроектированных 20 лет назад и ранее, сечение нулевого проводника меньше сечения фазной жилы, что может стать причиной его перегрузки. В ПУЭ же защита от токовых перегрузок в цепях нулевых проводников не предусмотрена. “Старые” системы электроснабжения проектировались только под линейную нагрузку. Считалось, что ток в нулевом проводе не должен превышать ток в наиболее загруженной фазе, т. е. защита, предусмотренная для фазных проводников, одновременно защищала и нулевой рабочий проводник. Следует отметить, что повышение температуры выше установленной заводом-изготовителем ускоряет старение изоляции кабеля, а следовательно, сокращает его срок службы.

Для определения влияния высших гармоник тока на кабельные линии необходимо оценить уровни помех, создаваемых нелинейными потребителями. С целью исследования были выбраны три типа непромышленных нелинейных потребителей (торговый центр, специализирующийся на продаже оргтехники,

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-6416.2012.8.

² Промежуточные данные исследований опубликованы в [2].

Номер гармоники	Значение n -й гармонической составляющей тока I_n , %		
	Торговый центр	Офисное здание	Жилой дом
3	31,2	29,3	10,3
5	18,5	13,9	6,3
7	12,7	10,2	4,8
9	8,6	15,2	5,5
11	5,4	9,5	4,6
13	3,2	8,2	3,2
15	2,7	3,9	1,9
17	1,7	4,6	—
19	1,1	2,2	—
21	0,7	1,4	—

административное здание и жилой дом), для которых определяли спектры высших гармоник тока. Для каждого из них проведены серии измерений показателей качества электроэнергии по напряжению и току на различных питающих фидерах. Результаты измерений показали, что в течение длительного времени (до 8 – 9 ч) нагрузка кабельной линии оставалась практически на одном и том же уровне, при этом в фазных жилах кабеля протекал несинусоидальный ток с широким спектром высших гармоник тока. В таблице представлен спектр высших гармоник токов в часы наибольшей нагрузки, осредненных на получасовом интервале для разных типов потребителей.

Описание тепловых процессов в четырехжильном кабеле, питающем нелинейные электроприемники

Для оценки влияния высших гармоник тока на тепловые процессы были выбраны четырехжильные кабели марки АСБ, наиболее распространенные в Московских кабельных сетях. Согласно статистическим данным их общая доля составляет 53,3 % от общего количества эксплуатируемых кабелей. Для них в программном комплексе Elcut разработаны модели для решения тепловых задач. Достоверность каждой модели оценивали путем сопоставления справочных данных о длительном допустимом токе и температуре с результатами расчета.

Основная причина нагрева силового кабеля — потери в токопроводящих жилах, обусловленные протекающим током. Дополнительную теплоту, выделяемую под действием высших гармоник тока, учитывали (как и на основной частоте) по закону Джоуля – Ленца, а активное сопротивление жилы на n -й гармонике R_n определяли по формуле [4]

$$R_n = R_0(0,187 + 0,532\sqrt{n}),$$

где R_0 — сопротивление жилы на основной частоте; n — номер гармоники.

Таким образом, при протекании несинусоидального тока по фазным жилам выделяется теплота, пропорциональная потерям

$$P_{\Sigma}^{\text{фазн}} = I_1^2 R_1 + \sum_{n=2}^{40} I_n^2 R_n,$$

где I_1 — действующее значение тока основной частоты; R_1 — активное сопротивление на основной частоте.

В нулевом проводнике при питании нелинейной симметричной нагрузки протекают токи высших гармоник, кратные трем. При этом выделяется теплота, мощность источника которой

$$P_{\Sigma}^{\text{нул}} = 3 \sum_{n=3,9,15\dots} I_n^2 R_n,$$

где I_n — действующее значение фазного тока, создаваемого гармониками, кратными трем.

Тепловыми потерями в кабелях с защитными металлическими оболочками при расчете температуры изоляции пренебрегают, так как они 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 [5].

При эксплуатации и проектировании кабельных линий необходимо вводить поправочные коэффициенты, учитывающие тип нагрузки, которую питает кабель. Проиллюстрируем это на примере кабеля АСБ $3 \times 35 + 1 \times 16 \text{ мм}^2$ распределительной сети, питающего потребителя с нелинейной вольт-амперной характеристикой (торговый центр), спектр гармоник которого приведен в таблице. По нулевому проводу будут протекать токи высших гармоник, кратные трем, которые складываются в нулевой жиле арифметически как сумма токов гармоник, кратных трем, в трех фазах. Как видно из полученных картин теплового

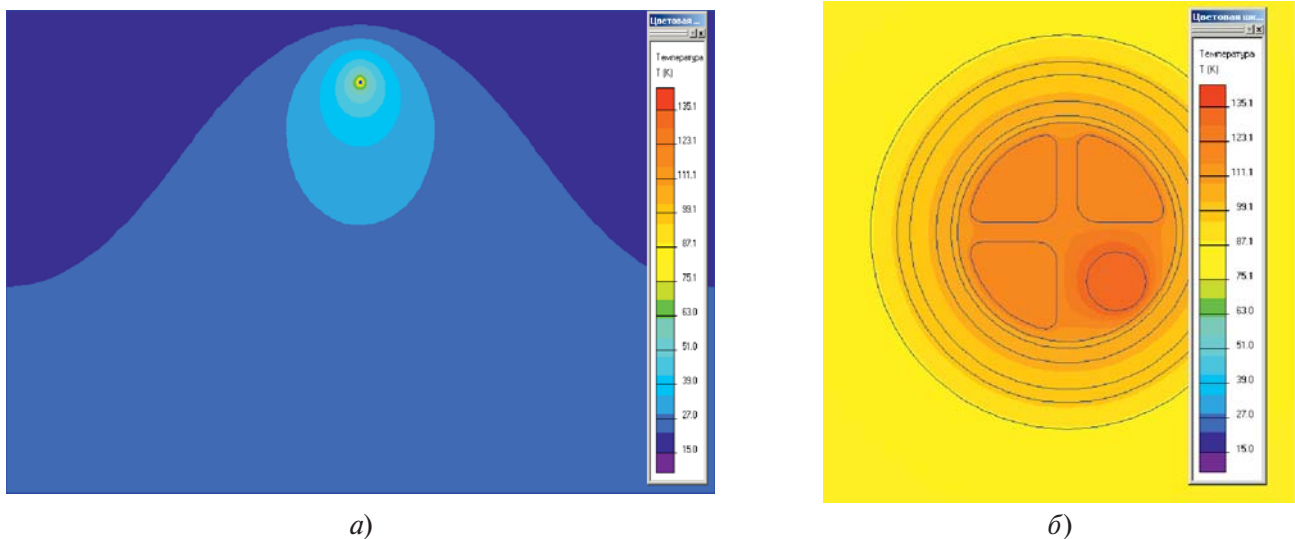


Рис. 1. Общий вид картины теплового поля в кабеле АСБ $3 \times 35 + 1 \times 16 \text{ мм}^2$ (а) и его жиле (б) при несинусоидальном токе, действующее значение которого равно длительно допустимому

поля (рис. 1), наибольшая температура изоляции при такой нагрузке составляет $135,1 \text{ }^\circ\text{C}$, что намного превышает длительно допустимую температуру ($80 \text{ }^\circ\text{C}$) для кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией напряжением до 1 кВ. Причем наибольшее значение температура достигает вблизи нулевой жилы.

Расчет понижающих коэффициентов

Одним из вариантов учета высших гармоник тока на этапе проектирования и эксплуатации является введение понижающего коэффициента для длительно допустимых токов, протекающих в фазных жилах кабеля,

$$K = I_{\text{д}} / I_{\text{дл.доп}}^{\text{табл}},$$

где $I_{\text{д}}$ — действующее значение тока в фазной жиле; $I_{\text{дл.доп}}^{\text{табл}}$ — табличное значение длительно допустимого тока.

Для расчета понижающего коэффициента применяли два метода. Первый — аналитический, использующий введенное понятие эквивалентного тока $I_{\text{экв}}$. Это ток основной частоты, при протекании которого по трем жилам кабеля выделяется такое же количество теплоты, как и при протекании несинусоидального тока по четырем жилам кабеля:

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\sum_{n=1} I_n^2},$$

где I_n — действующее значение тока n -й гармонической составляющей.

По своей энергетической сути введение понятия эквивалентного тока представляет

собой переход от четырех источников теплоты (три жилы и нуль) к трем источникам (три жилы), при этом принимается, что вся мощность выделяющейся теплоты при протекании несинусоидального тока заменяется равными по значению потерями активной мощности, созданными током основной частоты. С энергетической точки зрения не важно, какой ток греет проводник, — синусоидальный с частотой 50 Гц или несинусоидальный. Однако приведение четырех источников теплоты к трем вносит погрешность, обусловленную тем, что между нулевой и фазными жилами есть жильная изоляция, обладающая тепловым сопротивлением. Только в случае, если картина теплового поля между жилами кабеля представляет собой изотерму, метод не вносит погрешность. Достоинство рассматриваемого метода заключается в том, что он не требует составления математической модели и последующего ее расчета для тепловой задачи.

Вторым является метод простого перебора. С помощью него можно найти понижающие коэффициенты, учитывающие тип нагрузки, для которой выбирается кабель. Подбор значений токов при известном спектре высших гармоник осуществляется до тех пор, пока температура изоляции жилы не составит $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Данный метод можно реализовать, подставляя значения потерь активной мощности, вызванных протеканием несинусоидального тока по фазным и нулевой жилам, в математическую модель, составленную в программном комплексе Elcut.

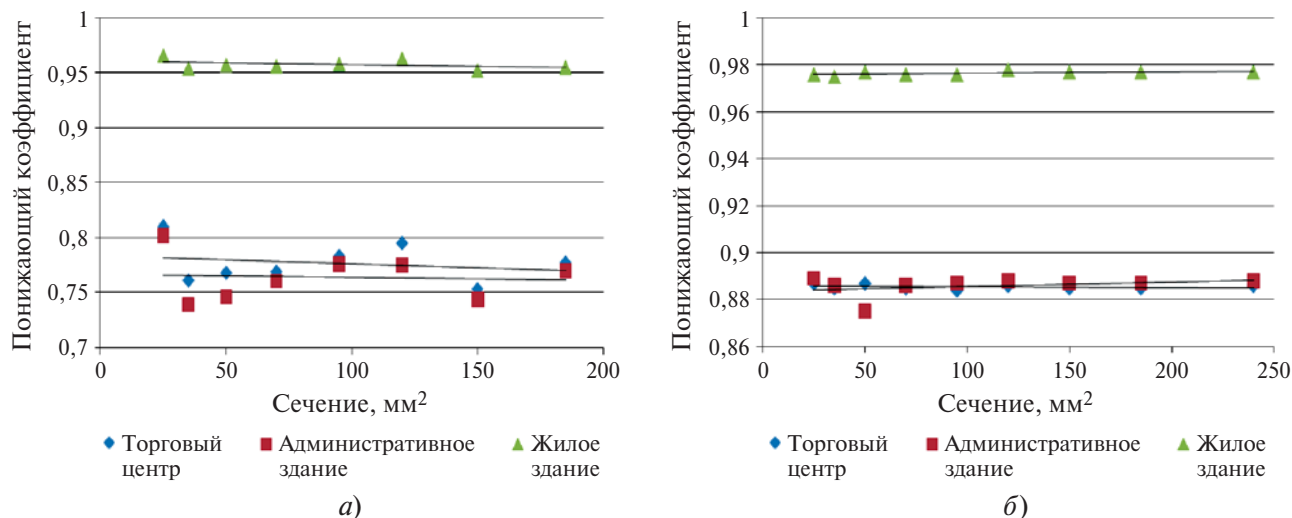


Рис. 2. Значения понижающего коэффициента при разных типах нагрузки для кабелей марки АСБ 3 × XX + 1 × XX мм² (а) и АСБ 4 × XX (б)

Результаты расчетов понижающих коэффициентов представлены на рис. 2, из которого видно, что для кабелей марки АСБ 3 × XX + 1 × XX мм² в зависимости от типа нелинейной нагрузки рассчитанные значения можно осреднить вне зависимости от сечения фазной жилы. Так, для торгового центра осредненный коэффициент нелинейной нагрузки принимаем равным 0,777, для офисного здания — 0,764, для жилого дома — 0,958. Для четырехжильного кабеля с одинаковыми фазными жилами можно также получить осредненное значение коэффициента: для торгового центра и административного здания — 0,885, для жилого дома — 0,977. Высшие гармоники тока в сетях административного здания и торгового центра приблизительно одинаково влияют на кабели распределительной сети 380 В вследствие близкого состава нелинейных электроприемников.

Значение понижающего коэффициента для четырехжильных кабелей с нулевой жилой меньшего сечения ниже, чем для кабелей такого же сечения, у которых сечения всех жил одинаковые.

Результаты, полученные методом прямого перебора и аналитическим методом, близки. Отклонение составляет менее 5 %, что вполне приемлемо для инженерных расчетов. Таким образом, используя первый метод, можно рассчитать значения понижающих коэффициентов без составления модели тепловых процессов в кабеле, однако нельзя определить значение температуры изоляции в наиболее нагретой точке.

Влияние высших гармоник тока на срок службы кабелей

При оценке срока службы изоляции кабельных линий напряжением до 3 кВ принято, что при длительно допустимой температуре нагрева (80 °С) происходит ее нормальный тепловой износ. При этом не должна превышать максимально допустимая температура нагрева изоляции (105 °С).

В несинусоидальном режиме срок службы кабельной линии изменяется по экспоненциальной зависимости [4]

$$V_{\text{НС}} = V_{\text{НОМ}} \exp \left[-K_a \left(\frac{1}{T_{\text{НОМ}}} - \frac{1}{T_{\text{НС}}} \right) \right],$$

где $T_{\text{НОМ}}$ — температура изоляции в номинальном режиме, К; $T_{\text{НС}}$ — температура изоляции при наличии высших гармоник, К; K_a — коэффициент, пропорциональный энергии активации, К.

В диапазоне рабочих температур с достаточной степенью точности эту зависимость можно аппроксимировать уравнением

$$V_{\text{НС}} = V_{\text{НОМ}} e^{-\beta \Delta \tau},$$

где $\Delta \tau = \vartheta - \vartheta_{\text{длит. доп}}$ — дополнительный нагрев изоляции; $\beta = \ln 2 / \Delta \vartheta$ — коэффициент старения изоляции (повышение температуры, вызывающее сокращение в 2 раза срока службы изоляции при термическом старении), который для бумажно-масляной изоляции равен 0,0693 °С⁻¹.

Срок службы изоляции уменьшается, если средняя температура превышает длительно допустимую, при этом его сокращение тем

больше, чем больше разность указанных температур. Таким образом, если рассчитать дополнительный нагрев изоляции кабельной линии в несинусоидальном режиме относительно длительно допустимой температуры, то можно определить срок службы кабелей с различными типами изоляции.

Более практичным показателем, характеризующим снижение срока службы кабеля, является относительное сокращение срока службы изоляции

$$\Delta V_* = \frac{V_{\text{ном}} - V_{\text{нс}}}{V_{\text{ном}}} = 1 - e^{-\beta \Delta \tau} \approx \\ \approx \beta \Delta \tau - \frac{1}{2} \beta^2 \Delta \tau^2 + \frac{1}{6} \beta^3 \Delta \tau^3.$$

В качестве примера рассмотрим силовой кабель марки АСБ 4 × 95, по которому осуществляется энергоснабжение жилого дома от трансформатора ТМ-400/10. Действующее значение тока в фазе равно табличному значению длительно допустимого тока ($I_{\text{д}} = 219 \text{ А}$) без учета типа нелинейной нагрузки. Спектр гармоник тока в фазной жиле примем по таблице. При этом ток основной частоты I_1 составит 198,2 А. Будем считать, что нагрузка распределена симметрично по фазам.

Рассчитаем (в программном комплексе Elcut) температуру изоляции в наиболее нагретой точке при протекании данного тока. Полученное значение (83,3 °С) превосходит длительно допустимую температуру нагрева (80 °С) для кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией на 3,3 °С, т. е. перегрев небольшой, однако он приведет к увеличению интенсивности старения электрической изоляции кабеля.

При заявленном заводом-изготовителем сроке службы кабеля не менее 30 лет учет высших гармоник тока при его выборе для электроснабжения жилого здания может повлечь за собой снижение гарантированного срока службы на 25 %. Для других типов нелинейных нагрузок снижение будет еще существеннее из-за более широкого и большего по значению спектра гармоник тока.

При оценке отрицательного воздействия несинусоидальности напряжения на срок службы оборудования электрическое старение изоляции (на интенсивность которого оказывают совместное воздействие дополнительный нагрев от высших гармоник и повышенная ионизация вследствие усиления электрического поля), как правило, не учитывают. Однако установлено [6], что его влияние весьма

значительно и подлежит обязательному учету. Для этого можно воспользоваться формулой [7]

$$V_{\text{нс}} = V_{\text{ном}} K_m^{-n_m} e^{-K_a \Delta C_T} = V_{\text{ном}} K_m^{-n_m} e^{-\beta \Delta \tau},$$

где $K_m^{-n_m} = U_m / U_{1m}$; для кабелей низкого напряжения коэффициент $n_m = 14,8$ (получено по результатам ускоренных испытаний электрооборудования на срок службы [4]); U_m и U_{1m} — амплитуды несинусоидального напряжения и напряжения основной частоты.

В зависимости от типа нелинейного потребителя при наличии высших гармоник кривые напряжения принимают более заостренную форму по сравнению с синусоидальной, что приводит к ускоренному старению изоляции. В случае же образования “плоской синусоиды” этого не происходит.

Приведенный выше расчет снижения срока службы изоляции кабеля дополним учетом формы кривой напряжения. Примем, что на шинах трансформатора 0,4 кВ напряжение основной частоты равно номинальному напряжению сети 380 В, а гармоники напряжения, создаваемые несинусоидальным током от нелинейных электроприемников жилого дома, накладываются так, что образуют “заостренную” синусоиду. Максимальное амплитудное значение фазного напряжения на основной частоте равно 311,13 В, а при искаженной кривой — 329,52 В. При питании нелинейной нагрузки (жилого дома) срок службы силового кабеля с учетом электрического и теплового старения снизится на 68 % от заявленного изготовителем.

Однако в эксплуатации в большинстве случаев кабели работают в режимах с более низким коэффициентом загрузки по сравнению с его номинальным значением. Кроме того, температура изоляции редко превышает нормально допустимое значение, что обусловлено заложенным при строительстве запасом по сечению. Тем не менее с увеличением доли нелинейных электроприемников в распределительной сети можно ожидать еще большего снижения срока службы кабельных линий.

По результатам исследований влияния высших гармоник тока на режимы работы кабелей в распределительной сети 380 В сделаны следующие выводы:

1) высшие гармоники тока, кратные трем, существенно влияют на пропускную способность кабельных линий 380 В;

2) с целью учета влияния токов высших гармоник на этапе проектирования и эксплуатации предлагается вводить понижающий коэффициент для длительно допустимых токов, протекающих в фазных жилах кабеля;

3) полученные двумя предложенными методами (аналитическим и методом простого перебора) значения понижающих коэффициентов для различных типов нагрузки кабелей марки АСБ не зависят от сечения фазной жилы, а определяются спектром тока, питающего нелинейную нагрузку, и сечением нулевой жилы;

4) при оценке сокращения срока службы изоляции кабеля следует учитывать процессы не только его теплового старения (из-за дополнительной теплоты от токов высших гармоник), но и электрического старения изоляции (вследствие искажения формы кривой напряжения, обусловленного протеканием этих токов).

Список литературы

1. **Качество** электрической электроэнергии в муниципальных сетях Московской области / И. И. Карташев, И. С. Пономаренко, В. Н. Тульский и др. — Промышленная энергетика, 2002, № 8.

2. **Оценка** теплового режима кабеля, питающего нелинейную нагрузку / В. Н. Тульский, И. И. Карташев, М. Г. Симуткин, Р. Р. Насыров. — Промышленная энергетика, 2012, № 7.
3. **Шидловский А. К., Жаркин А. Ф.** Высшие гармоники в низковольтных сетях. — Киев: Наукова думка, 2005.
4. **Избранные** вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко и др. Под ред. И. В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2007.
5. **Основы** кабельной техники / Под ред. И. Б. Пешкова. — М.: ACADEMIA, 2006.
6. **An approach** to life estimation of electrical plant components in the presence of harmonic distortion / P. Caramia, G. Carpinelli, P. Verde and other. — Proc. 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando (Florida, USA), 2000.
7. **Voltage** endurance of electrical components supplied by distorted voltage waveforms / A. Cavallini, D. Fabiani, G. Mazzanti and other. — IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim (CA, USA), 2000.

simutkinmg@yandex.ru