

Проблемы обеспечения качества электроэнергии в сетях коммерческих и офисных потребителей

М. О. Чернышов, В. П. Довгун, В. В. Новиков, С. В. Бруцкий

В статье рассмотрены результаты анализа качества электроэнергии в сетях крупных офисных и коммерческих потребителей. Проведенные исследования показывают, что в городских распределительных сетях наблюдаются значительные искажения формы кривых токов, вызванные нелинейными нагрузками. Рассмотрено негативное влияние высших гармоник на сети электропитания. Предложена новая конфигурация гибридного фильтра, осуществляющего ослабление тока третьей гармоники в нейтральном проводнике.

Ключевые слова: качество электроэнергии, нелинейная нагрузка, гибридный фильтр.

Широкое внедрение статических силовых преобразователей, частотно-регулируемых электроприводов, энергосберегающих систем освещения привело к значительному изменению характера электрических нагрузок многих потребителей. В последние годы наблюдаются значительные искажения синусоидальной формы токов в сетях электропитания большинства промышленных предприятий, а также в непромышленном секторе (коммерческие и офисные потребители, медицинские учреждения, жилой сектор). Особенность искажающих нагрузок коммерческих, офисных и бытовых потребителей заключается в том, что они, как правило, однофазные, имеют небольшую мощность и распределены по сети. У таких потребителей доля нелинейной нагрузки может значительно превышать линейную составляющую.

В статье приведены результаты измерений гармонического состава токов и напряжений ряда крупных городских потребителей, а также предложена схема гибридного си-

лового фильтра для трехфазных четырехпроводных сетей.

Измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения проводились при помощи анализатора качества электроэнергии PM175 SATEC. Методика проведения измерений подробно рассмотрена в [2].

Рассмотрим результаты измерений гармонического состава токов и напряжений у крупных муниципальных потребителей.

Учебно-административный корпус университета.

Корпус расположен в здании, построенном в конце XIX века. Основную нагрузку составляют энергосберегающие осветительные приборы, персональные компьютеры и офисное оборудование.

На рис. 1 показана зависимость доминирующих гармоник тока фазы А от времени. Преобладающими являются 3 и 5 гармоники, их значение достигает 25% от величины тока основной гармоники. Ночью относительное содержание высших гармоник в спектре тока выше, т.к. основной нагрузкой в это время является дежурное освещение. Днем доля потребителей с линейными характеристиками выше, поэтому коэффициент искажения синусоидальной кривой тока уменьшается.

Спектральный состав напряжения показан на рисунке 2. Преобладающими являются 5 и 7 гармоники.

Доля нагрузки с нелинейными характеристиками весьма велика, об этом свидетельствует большое значение суммарного коэффициента гармонических составляющих кривой тока (рис. 3).

М.О. Чернышов, В.П. Довгун, В.В. Новиков, С.В. Бруцкий, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия (e-mail: Chernyshov.m.o@gmail.com).

ТАБЛИЦА 1. УЧЕБНО-АДМИНИСТРАТИВНЫЙ КОРПУС. НЕЧЕТНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ФАЗЕ А

n	Токи			Напряжения		
	Мин	Сред	Макс	Мин	Сред	Макс
3	0,08	9,67	16,96	0,14	0,25	0,68
5	7,85	15,87	24,30	1,26	2,25	3,85
7	0,37	5,11	11,85	0,34	1,14	2,48
9	0,32	2,78	7,43	0,09	0,20	0,40
11	1,17	10,31	26,31	0,16	0,91	1,87
13	0,41	3,89	12,98	0,10	0,36	1,01
15	0,24	2,01	5,41	0,07	0,12	0,26

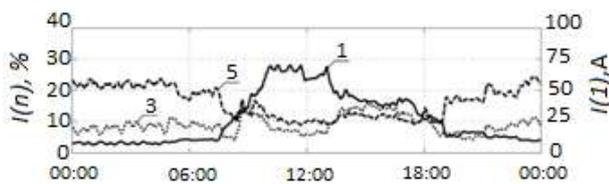


Рис. 1. Учебно-административный корпус. Гармоники тока в фазе А.

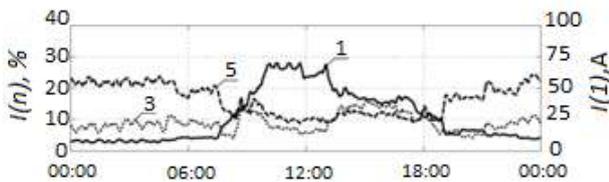


Рис. 2. Учебно-административный корпус. Гармоники напряжения.

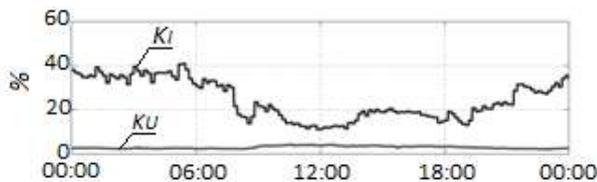


Рис. 3. Учебно-административный корпус. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока и напряжения.

Сеть наружного освещения торгово-развлекательного комплекса.

Освещение включается в 20:00, частично отключается в 01:00 и полностью отключается в 8:00.

На рис. 4 приведены графики доминирующих гармоник тока фазы А.

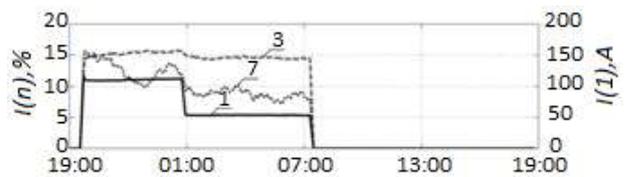


Рис. 4. Система наружного освещения. Гармоники тока в фазе А.

На рис. 5 показано, как изменялась величина тока в нейтральном проводе в течение суток. Отметим, что ток в нейтральном проводе значительно превышает фазные токи. Это вызвано большим уровнем токов третьей гармоники, суммирующихся в нейтральном проводе, а также несимметрией нагрузки.

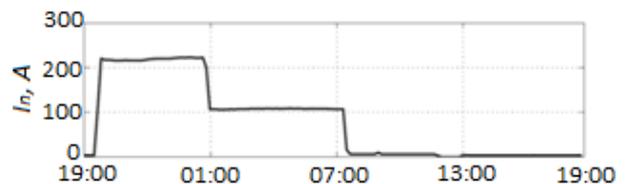


Рис. 5. Значение тока в нейтральном проводе.

График изменения коэффициента искажения синусоидальной формы кривой тока фазы А представлен на рис. 6.

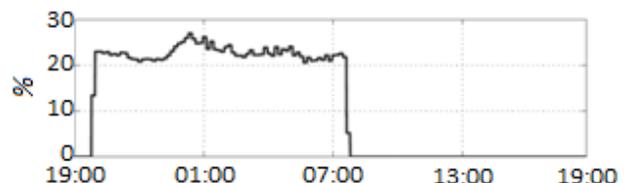


Рис. 6. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока в сети наружного освещения.

Результаты анализа показывают, что в сетях крупных коммерческих и офисных потребителей наблюдаются значительные искажения формы кривых токов. В ряде случаев суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой тока превышает 30 %. Отметим, что измерения проводились на кабельных вводах. Во внутренних сетях зданий искажения токов и напряжений гораздо выше. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока может превышать 100% [1]. В этом случае потери электроэнергии во внутренних сетях зданий увеличиваются в 2 – 2.5 раза по сравнению с синусоидальным режимом.

Для трехфазных четырехпроводных сетей серьезную проблему представляют токи третьей гармонической составляющей, суммирующиеся в нейтральных проводниках. Это приводит к увеличению потерь, а в ряде случаев – к авариям, вызванным повреждением нейтрального провода. В [3, 4] отмечается, что несинусоидальный характер токов коммерческих и офисных потребителей отрицательно влияет на режимы работы кабельных сетей напряжением 0,4 кВ. При оценке срока службы кабелей следует учитывать тепловое старение изоляции, вызванное дополнительным нагревом токами высших гармоник, а также электрическое старение вследствие искажения формы кривой напряжения. Согласно оценкам, приведенным в [3], большой уровень высших гармоник тока может привести к снижению срока службы кабеля на 25 %.

Увеличение падения напряжения между нейтральной точкой и землей приводит к неправильной работе чувствительного электронного оборудования. Кроме того, большие уровни токов третьей гармонической составляющей вызывают дополнительный нагрев обмоток трансформаторов, что может привести к повреждению изоляции.

Таким образом, для трехфазных четырехпроводных сетей необходимы устройства, обеспечивающие ослабление токов и напряжений нулевой последовательности.

Схема гибридного фильтра, осуществляющего ослабление третьих гармоник тока и напряжения в трехфазной четырехпроводной сети, показана на рис.7. Нелинейной нагрузкой являются мостовые выпрямители, включенные в каждую из фаз.

Гибридный фильтр образован последовательным соединением пассивного и активного фильтров. Ветви пассивного фильтра представляют последовательные резонансные контуры, настроенные на частоту третьей гармоники. Напряжение активного фильтра пропорционально току нейтрального провода $U_{a\phi} = R_{a\phi} I_N$.

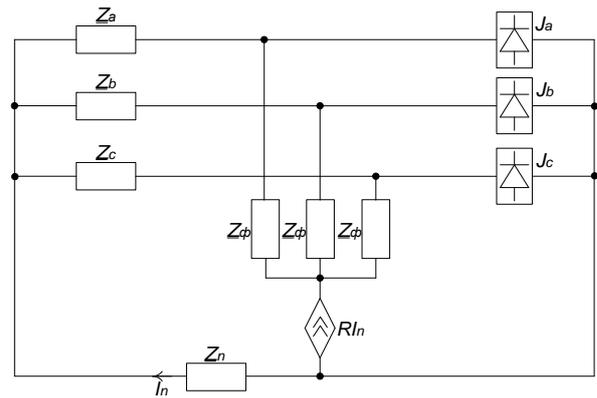


Рис. 7. Схема гибридного фильтра, ослабляющий третья гармонику тока и напряжения в трехфазной четырехпроводной сети.

Управляющий параметр АФ имеет частотную характеристику идеального режекторного фильтра, настроенного на частоту сети ω_c :

$$R(\omega) = R_{a\phi}, \quad \omega \neq \omega_c \quad (1)$$

$$R(\omega) = 0, \quad \omega = \omega_c. \quad (2)$$

При симметричном режиме напряжение между нейтральными точками

$$U_{nN} = \frac{3Z_N Z_{\phi\phi} J_3}{3Z_N + Z_c + Z_{\phi\phi} + R_{a\phi}}.$$

Здесь J_3 – ток третьей гармоники. Ток нейтрального провода

$$I_N = \frac{U_{nN}}{Z_N} = \frac{3Z_{\phi\phi} J_3}{3Z_N + Z_c + Z_{\phi\phi} + R_{a\phi}}.$$

Для токов высших гармоник действие активного фильтра эквивалентно включению резистора $R_{a\phi}$ последовательно с сопротивлением нейтрального провода Z_N .

Для исследования характеристик предложенного фильтра была использована модель, реализованная в среде Matlab. Параметры модели сети: сопротивление сети $R_c = 5$ Ом, индуктивность $L_c = 0.15$ мГн, параметры выпрямителей: сопротивление

нагрузки $R_H = 25$ Ом, емкость сглаживающего фильтра $C = 1500$ мкФ.

На рис. 8 показана кривая тока в нейтральном проводе. Пассивный фильтр включается в момент $t = 0.15$ с. При $t = 0.25$ с включается активный фильтр.

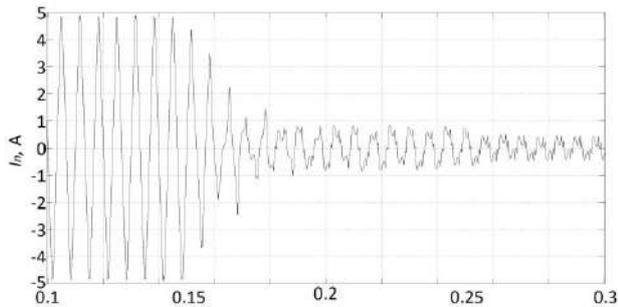


Рис. 8. Кривая тока в нейтральном проводе.

На рис. 9 показан спектр тока I_N для различных режимов работы.

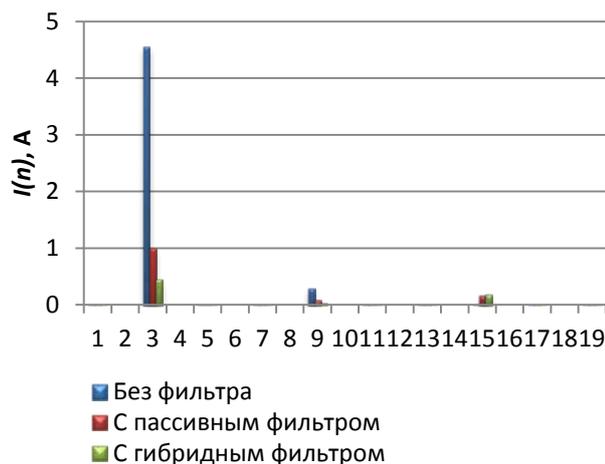


Рис. 9. Спектр тока I_N для различных режимов работы.

Моделирование показывает, что предлагаемый гибридный фильтр эффективно ослабляет ток нейтрального провода.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lai J.-S., Key T. Effectiveness of harmonic mitigation equipment for commercial office buildings. – IEEE trans. on Industry Applications, 1997, Vol. 33, No. 4, pp. 1104-1110.
- [2] Темербаев С. А., Боярская Н. П., Довгун В. П. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии. 2013, № 1, с. 107-120.

- [3] Тульский В. Н., Карташев И. И. и др. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В. Промышленная энергетика, № 5, 2013, с. 39-44.
- [4] Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Солнцев Е. Б., Терентьев П. В. К вопросу о выборе нулевых проводников в городских электрических сетях. – Промышленная энергетика, 2014, № 2, с. 22-25.

БИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Чернышов Максим Олегович окончил институт космических и информационных технологий сибирского федерального университета в 2014г. по специальности “Информационные системы и технологии в энергетике”. С 2014г. аспирант Сибирского федерального университета.



Довгун Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор Сибирского федерального университета. Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Основные научные интересы: синтез аналоговых и цифровых систем; проектирование фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения.

устройств для систем электроснабжения.



Новиков Виктор Валерьевич, кандидат технических наук, доцент Сибирского федерального университета. Основные научные интересы: оптимальное проектирование частотно-селективных устройств.



Бруцкий Сергей Викторович, окончил институт космических и информационных технологий сибирского федерального университета в 2014г. по специальности “Информационные системы и технологии в энергетике”. С 2014г. обучается в магистратуре сибирского федерального университета.