

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ГОРОДСКИХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.В. Кобелев^{1, 2}, А.А. Зыбин¹

*Кафедра «Электрооборудование и автоматизация» (1);
НОЦ «Региональных проблем энергетики и энергосбережения» (2),
ГОУ ВПО «ТГТУ»; nos_energo.tamb@mail.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: гармоники в системах электроснабжения; источники гармоник; качество электрической энергии; коэффициент искажения синусоидальности.

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования и рассмотрен анализ причин возникновения высших гармоник напряжения и тока в городских системах электроснабжения и их влияние на надежность работы электроприемников.

Электрическая энергия как товар используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует при создании других видов продукции, влияя на их качество. Понятие качества электрической энергии (**КЭ**) отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальной частоте, напряжении, токе и тому подобное, поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое КЭ [1].

Постоянно увеличивающиеся требования промышленности и народного хозяйства к стабильности, приспособляемости и точности контроля в электрическом оборудовании привело к появлению относительно дешевых силовых диодов, тиристоров, SCR (Silicon Controlled Rectifier) и других силовых полупроводников. Сейчас, широко используемые в выпрямительных цепях UPS полупроводники, статические преобразователи переменного напряжения в постоянное, устройства плавного пуска, пришедшие на смену устаревшим устройствам, системы зажигания современных люминесцентных ламп изменили картину формы тока и напряжения в электросетях. Хотя твердотельные реле, такие как тиристоры, привнесли существенные изменения в схемотехнику систем контроля, они также создали проблему генерации гармоник тока.

Гармоники – это синусоидальные волны, суммирующиеся с фундаментальной (основной) частотой 50 Гц (то есть первая гармоника – 50 Гц, пятая гармоника – 250 Гц). Любая комплексная форма синусоиды может быть разложена на составляющие частоты, таким образом комплексная синусоида есть сумма определенного числа четных или нечетных гармоник с меньшими или большими величинами

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=0}^n I_{km} \sin(k\omega + \varphi_k), \quad (1)$$

где I_0 – постоянная составляющая; $I_{km} \sin(k\omega + \varphi_k)$ – гармоники или гармонические составляющие k -го порядка с амплитудой I_{km} и начальной фазой φ_k ; n – номер последней из учитываемых высших гармоник.

Можно выделить следующие источники гармоник в системах электроснабжения:

- *силовое электронное оборудование*: частотные приводы переменного тока; приводы постоянного тока; источники бесперебойного питания UPS; выпрямители (шестифазные, по схеме Ларионова); конвертеры; тиристорные системы; диодные мосты; плавильные печи высокой частоты;

- *сварочное, дуговое оборудование*: дуговые плавильные печи; сварочные автоматы; освещение (ДРЛ-ртутные и люминесцентные лампы);

- *насыщаемые устройства*: трансформаторы; двигатели; генераторы и т.д.

Гармонические амплитуды на этих устройствах обычно незначительны по сравнению с элементами силовой электроники и сварочным оборудованием, при условии, что насыщение не происходит.

Технология возникновения гармонических составляющих заключается в следующем. Ток, потребляемый приемниками электрической энергии, имеющими нелинейную нагрузку, имеет ярко выраженный импульсный характер, что объясняется их схемными особенностями. К примеру, у импульсных источников питания, при наличии сетевого выпрямителя (диодного моста) и сглаживающего емкостного фильтра при приближении кривой питающего напряжения к максимальному значению электронные вентили диодного моста скачкообразно меняют свое сопротивление от бесконечности до определенного малого значения. Подобный характер изменения сопротивления вентили равносителен включению или отключению им нагрузки. Таким образом, периодическое включение и отключение приводят к появлению коротких импульсов потребляемого тока и искажению формы кривой синусоидального тока. Синусоида напряжения становится «плоской», так как в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети [2]

$$U_n(t) = U_c(t) - i(t)Z_c, \quad (2)$$

где $U_n(t)$ – деформированная синусоида напряжения на зажимах нагрузки; $U_c(t)$ – синусоидальное напряжение питающей сети; $i(t)$ – импульсный ток нагрузки; Z_c – полное сопротивление сети со стороны зажимов нагрузки.

Исследования, проведенные в Центре электромагнитной безопасности (г. Москва) при подключении компактных люминесцентных ламп (CFL – Compact Fluorescent Lamps) показали следующую осциллограмму тока (рис. 1).

Не меньшее искажение наблюдается и при подключении компьютерной нагрузки [2] (рис. 2).

Проведенные исследования Испытательной лабораторией по качеству электрической энергии при ТГТУ на одной из подстанций города с помощью прибора Ресурс UF-2М показали характер изменения коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения K_U , % (рис. 3),

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}{U_{(1)}^2}}, \quad (3)$$

где $U_{(n)}^2$ – действующее значение n -ой гармонической составляющей напряжения, В; $U_{(1)}$ – действующее значение напряжения основной частоты, В; n – порядок гармонической составляющей напряжения; N – порядок последней из учитываемых гармонических составляющих напряжения.



Рис. 1. Осциллограмма тока при подключении трех CFL

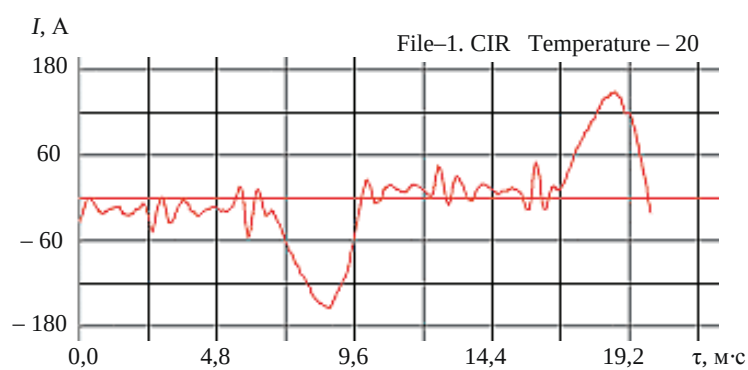


Рис. 2. Изменение тока на одной из фаз в фидере питания компьютерных нагрузок

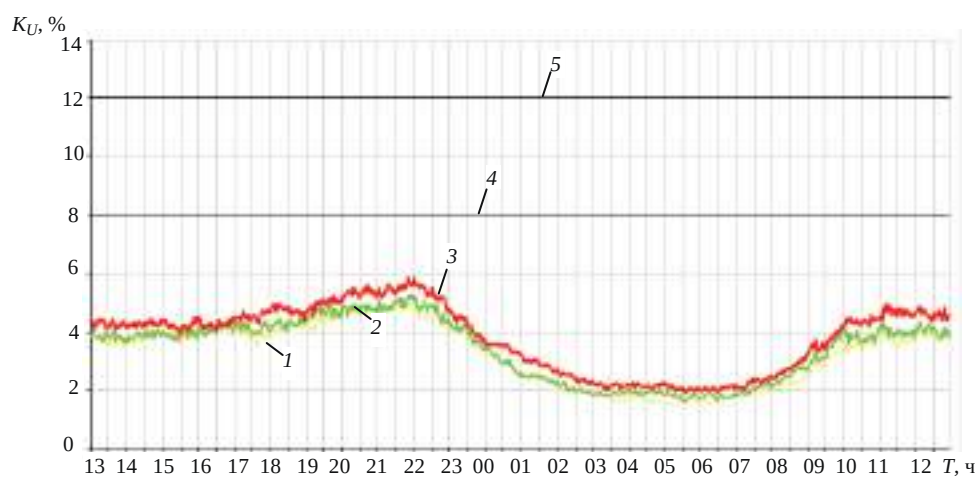


Рис. 3. Коэффициент искажения синусоидальности фазных напряжений:

1 – K_{Ua} ; 2 – K_{Ub} ; 3 – K_{Uc} ; 4 – $K_{Uнд}$; 5 – $K_{Uнд}$

Согласно полученным данным K_U увеличивается с приходом вечернего времени суток и достигает максимального значения в период с 20:00 – 23:00. Это связано с приходом домой жителей города и включением бытовой техники: телевизоров, компьютеров и т.д. Далее, в ночное время наблюдается спад искажения до минимального значения и начиная с 10:00 увеличение K_U (см. рис. 3).

Нужно отметить, что высшие гармоники тока кратные трем (то есть 3, 9, 15, 21 и т.д.), определяющие высокое значение коэффициента амплитуды и генерируемые однофазными нагрузками, имеют специфическое результирующее воздействие в трехфазных системах. В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические (синусоидальные) токи во всех трех фазах сдвинуты на 120° по отношению друг к другу, и, в результате, сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю. Следовательно, не возникает и падения напряжения на проводнике нейтрали в кабеле. Это утверждение остается справедливым для большинства гармоник. Однако некоторые из них имеют направление вращения вектора тока в ту же сторону, что и основная гармоника (первая «фундаментальная» 50 Гц), то есть они имеют прямую последовательность. Другие же вращаются в обратном направлении и, таким образом, имеют обратную последовательность. Это не относится к гармоникам, кратным третьей

$$n = 3(2k + 1), \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

В трехфазных цепях они сдвинуты на 360° друг к другу, совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные третьей, суммируются в проводнике нейтрали

$$I_n = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \quad (5)$$

В результате, с учетом того, что они составляют большую долю в действующем значении фазных токов, общий ток в нейтрали может превышать фазные токи. Это может привести к повреждению нулевого проводника, а вследствие этого вызовет перекося фаз и выход из строя бытовой аппаратуры потребителей.

К последствиям гармоник тока для электроустановок 0,4 кВ можно отнести [3, 4]:

- перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий;
- дополнительные потери в силовых трансформаторах (вплоть до выхода из строя);
- ложное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей;
- повышенный износ, вспучивание и преждевременное разрушение конденсаторов установок компенсации реактивной мощности;
- ускоренное старение изоляции проводов и кабелей;
- ухудшение качества (несинусоидальность) питающего напряжения;
- сбои в работе и физический выход из строя компьютерного оборудования;
- преждевременный выход из строя электродвигателей;
- резонансные явления в электроустановках 0,4 кВ;
- снижение коэффициента мощности электроустановок.

Таким образом, проблема высших гармоник напряжений и токов в распределительных сетях электроснабжения города является крайне актуальной и требует пристального внимания со стороны научно-исследовательских структур, электротехнических служб и электроизмерительных лабораторий, занимающихся анализом и измерениями показателей качества электрической энергии.

Список литературы

1. Суднова, В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. – М. : Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2000. – 80 с.

2. Григорьев, О. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О. Григорьев // Новости электротехники. – 2002. – № 6. – С. 18–19.
3. Григорьев, О. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О. Григорьев // Новости электротехники. – 2003. – № 1. – С. 18–19.
4. Петухов, В. Энергосберегающие лампы как источник гармоник тока / В. Петухов // Новости электротехники. – 2009. – № 5. – С. 59.
-

Current Issues of Higher Harmonics in the Power Urban Systems

A.V. Kobelev, A.A. Zybin

*Department “Electrical Equipment and Automation” (1);
REC “Regional Problems of Energy and Energy Efficiency” (2),
TSTU; noc_energo.tamb@mail.ru*

Key words and phrases: harmonics in the power supply systems; quality of electric energy; sources of harmonics; waveform distortion factor.

Abstract: The paper presents the experimental studies and the analysis of the causes of the higher harmonics of voltage and current in the urban systems of power supply and their impact on the reliability of the electrical receivers.

Moderne Probleme der höchsten Harmoniken in den Stadtssystemen der Energieversorgung

Zusammenfassung: Es sind die experimentellen Untersuchungen und die Analyse der Ursachen der Entstehung der höchsten Harmoniken der Spannung und des Stroms in den Stadtssystemen der Energieversorgung und ihre Einwirkung auf die Sicherheit des Funktionierens des Verbrauchsgerätes durchgeführt.

Problèmes contemporains des plus hauts plis dans les systèmes urbains de l'électricité

Résumé: Sont effectuées les études expérimentales et l'analyse des causes de l'apparition des plus hauts plis de la tension et du courant dans les systèmes urbains de l'électricité ainsi que leur influence sur la sécurité du fonctionnement des récepteurs électriques.

Авторы: Кобелев Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и автоматизация», директор НОЦ «Региональных проблем энергетики и энергосбережения»; Зыбин Артем Алексеевич – магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматизация», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: Сазонов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-технологический институт по использованию техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», г. Тамбов.