

Р. Х. Тукшаитов, Р. К. Зарипов

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОСЦИЛЛОГРАММЫ ИМПУЛЬСНОГО ВХОДНОГО ТОКА НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

R. H. Tukshaitov, R. K. Zaripov

Разработана методика графического построения осциллограмм напряжения электросети и импульсного тока нелинейных нагрузок. Сфотографированные осциллограммы напряжения и тока с экрана анализатора AR-5 переносятся на компьютер, масштабируются и обрабатываются в приложении Excel. В качестве физической модели нагрузок использованы светодиодные лампы. Предложенная методика построения осциллограмм предназначена для повышения точности определения основных параметров импульсного входного тока разных нагрузок при разработке способов снижения уровня эмиссии высших гармоник.

Ключевые слова: методика, осциллограмма, импульсный ток, коэффициент нелинейных искажений, нелинейная нагрузка, светодиодная лампа, емкость конденсатора

A Technique for Nonlinear Loads Pulsed Input Current Plotting for Its Basic Parameters Determining

The authors developed a technique for graphical plotting waveforms of electric power grid voltage and pulsed current of nonlinear loads. The photographed voltage and current oscilloscope patterns from the screen of the AR-5 analyzer are being transferred to the computer scaled and processed with Excel application. LED lamps were employed as physical models of loads. The proposed technique for oscilloscope patterns plotting is intended for accuracy increasing of the pulsed input current of nonlinear loads basic parameters determining while developing methods for the high-order harmonics emission level reduction.

Key words: technique, oscilloscope pattern, pulsed current, total harmonic distortion, nonlinear load, LED lamp, capacitor capacity

Коэффициент нелинейных искажений напряжения является одним из важных показателей качества электроэнергии электросетей и подключаемых нагрузок [1–5]. Основные источники эмиссии высших гармоник напряжения промышленной частоты в электросеть — преобразователи напряжения различных устройств [6–9], в том числе светодиодных осветительных приборов [10]. Во многих светодиодных светильниках на входе их электрической схемы устанавливают корректор коэффициента мощности, в силу чего коэффициент нелинейных искажений (K_i) у них не превышает 10–20% [11]. Сравнительно небольшие величины коэффициента (2–10%) имеют также силовые трансформаторы при работе лишь в номинальном режиме [12]. Вместе с тем, светодиодные лампы, в отличие от трансформаторов, электродвигателей и персональных компьютеров, обладают значительно большим значением K_i (125–200%) [11]. В тяговой сети подстанций “Зима” и “Головинская” Сибирской железной дороги в отдельные кратковременные моменты работы нагрузок он даже был зафиксирован соответственно на уровне 296 и 335% [13]. Это обусловлено достаточно малой длительностью импульсного входного тока нагрузок. Характеристики нагрузки с такими уровнями коэффициента нелинейных искажения требуют более детального их изучения.

Графическое отображение осциллограммы тока светодиодных ламп обычно приводится на миниатюрном дисплее анализатора качества электроэнергии и, при этом, мало контрастном, что не позволяет оценить его параметры с необходимой точностью. В связи с этим, в работе поставлена задача разработки ме-

тодики графического отображения осциллограмм импульсного входного тока с точностью, достаточной для последующего определения основных его параметров.

Методика построения осциллограмм

Для регистрации осциллограмм напряжения электросети и тока светодиодных ламп использован анализатор сети CIRCUTOR AR-5 [14]. В силу малых размеров его экрана, отсчет параметров осуществляется с большой погрешностью, особенно это касается формы импульса тока. Для получения фотографий осциллограмм с экрана и удобства их анализа, следует зафиксировать график напряжения в момент прохождения напряжения через нулевую точку. В тех случаях, когда это трудно осуществимо, совмещение начала осциллограмм тока и напряжения можно обеспечить смещением осциллограммы тока относительно осциллограммы напряжения, что предусмотрено в приборе AR-5. Это допустимо по той причине, что при импульсном характере входного тока $\cos\varphi$ близок к единице.

Фотографии необходимо открыть на компьютере при помощи графических программ и увеличить их размеры до обеспечения отличимости всех деталей осциллограмм на экране. Для оцифровки осциллограмм в приложении Excel, составляется таблица значений $U = f(t)$ и $I = f(t)$. Поскольку графики полупериодов токов и напряжений симметричны относительно изолинии, то достаточно составить таблицу только для одной половины периода. Значения U и I для второй половины периода составляются умножением соответствующих значений ординат первой половины периода

на “–1”. Учитывая, что при частоте 50 Гц, длительность полупериода равна 10 мс, то шаг квантования выбирается равным 0,2 мс. При этом получим таблицу, состоящую из пятидесяти столбцов и трех строк соответственно со значениями текущего времени (t), а также ординат U и I .

Для удобства обработки осциллограмм и обеспечения достаточной точности их построения размер отображения длины полупериода тока и напряжения по шкале абсцисс выбирается на экране равным 100 мм, при этом ориентировочный размер рабочих точек будет равен 1,5 мм. Сначала измеряются и вносятся в таблицу значения узловых ординат 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 10 мс. Затем эта процедура осуществляется с шагом 0,2 мс, а далее вносятся значения ординат для импульса с еще меньшим шагом, равным 0,1 мс.

По результатам квантования строятся осциллограммы напряжения и тока для каждой СДЛ. Размерность оси ординат приводится в относительных единицах (о. е.) от –100 до +100 с основным шагом 20 о. е.

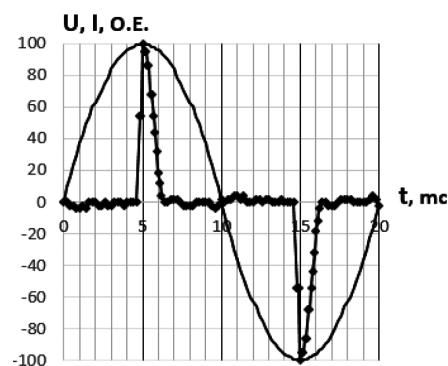
Пример представления осциллограммы входного тока СДЛ приведен на рис. 1а. Для повышения качества восприятия осциллограмм маркеры целесообразно убрать после ее построения (рис. 1б).

При подобной методике построения осциллограмм погрешность их графического представления не превышает $\pm(2-3)\%$, и поэтому при совмещении вновь построенной осциллограммы с экспериментальной, различие между ними визуально практически незаметно.

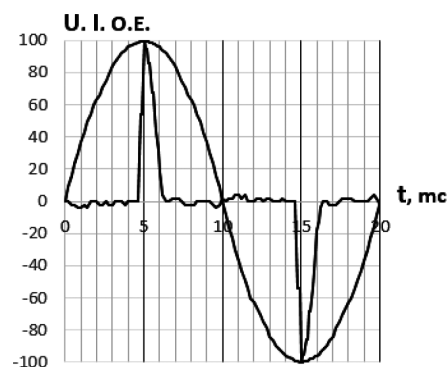
На основе описанной методики, были построены осциллограммы напряжения и тока для восьми типов СДЛ мощностью 7–10 Вт и изучены основные их характеристики, а также уровень снижения коэффициента K_i СДЛ при параллельном подключении к их входу конденсаторов разной емкости.

Результаты практического применения методики

Как следует из табл. 1 длительность переднего фронта импульса тока СДЛ равна $0,95 \pm 0,10/10,5$ мс, что приблизительно на 35% меньше длительности среза. Ширину энергетического спектра тока в несколько большей степени формирует длительность фронта импульса тока, поскольку она достоверно коррелирует с K_i



а



б

Рис. 1. Вид осциллограмм построенных по предложенной методике при $C = 0$ мкФ и K_i изм. = 183% (U – синусоидальное напряжение, I – импульсный ток): а – с маркерами; б – без маркеров

($r = -0,64$, $P > 0,95$) и недостоверно с длительностью заднего фронта ($r = -0,56$, $P < -0,95$).

Эти данные следует в дальнейшем использовать для уточнения значений коэффициентов нелинейных искажений, ранее полученных для разных длительностей импульсного тока прямоугольной формы на основе моделирования его спектра [16].

На рис. 2 показан характер уменьшения коэффициента K_i СДЛ по мере увеличения емкости подключаемого к нему конденсатора. Подключение к СДЛ мощностью 10 Вт конденсатора емкостью 20 мкФ позволяет уменьшить K_i в 12 раз [16, 17]. При подключении к электросети восьми СДЛ с суммарной мощностью 83 Вт значение емкости конденсатора

Таблица 2. Параметры импульсного входного тока светодиодных ламп

№	Тип светодиодной лампы	Длительность импульса тока, мс	Длительность фронта импульса тока, мс	Длительность среза импульса тока, мс
1	Belligt 10 Вт	2,0	0,8	1,2
2	ASD 11 Вт	2,2	0,9	1,3
3	Эра 12 Вт	2,5	1,0	1,5
4	Camelion 10 Вт	2,3	0,9	1,4
5	Rexant 11,5 Вт	2,6	1,0	1,6
6	Volta 9 Вт	2,7	1,1	1,6
7	Онлайт 10 Вт	2,7	1,1	1,6
8	Gauss 10 Вт	2,3	0,9	1,4
Среднее значение ($S \pm \sigma/Cv$)		$2,4 \pm 0,23/9,6\%$	$0,95 \pm 0,10/10,5\%$	$1,45 \pm 0,14/9,6\%$

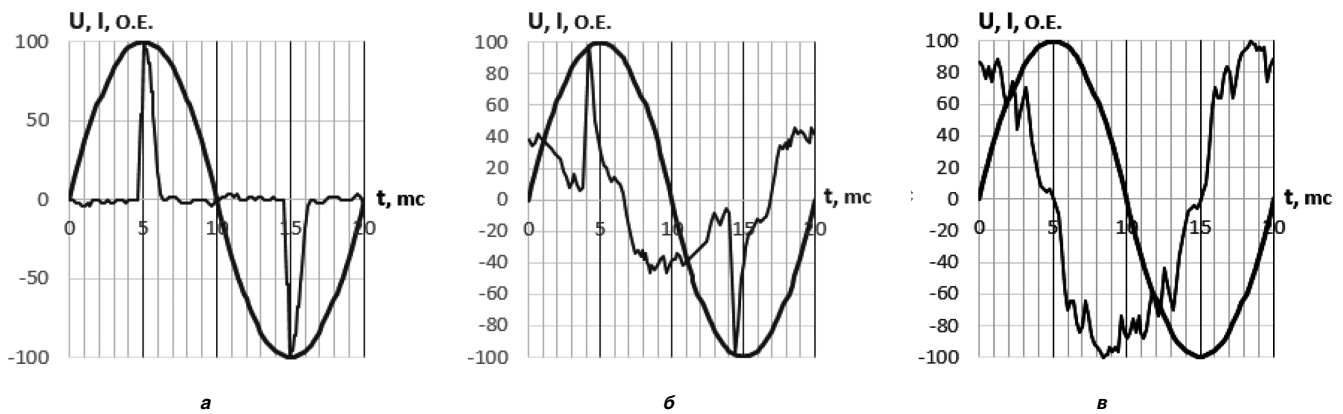


Рис. 2. Совмещенные графики тока и напряжения, построенные по предложенной методике, для СДЛ типа Camelion с параллельным подключением конденсаторов разной их емкости (U – синусоидальное, I – импульсный):
 а – $C = 0$ мкФ, $K_{\text{изм}} = 183\%$; б – $C = 2$ мкФ, $K_{\text{изм}} = 49\%$; в – $C = 20$ мкФ, $K_{\text{изм}} = 15\%$

необходимо повысить в 4–5 раз для обеспечения необходимой ее реактивной мощности.

Литература

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электропитания промпредприятий // 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 2004. – 358 с.
2. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва, 2013.
3. Хруслов Л. Л., Ростовников М. В., Шишов В. А., Киреев С. И. Высшие гармоники в сетях низкого напряжения с элементами силовой электроники. Опыт непрерывного мониторинга. Сб. трудов Международной научно-практической конференции “Управление качеством электрической энергии”. М.: Центр полиграфических услуг “Радуга”, 2018. С. 181–186.
4. Мустафа Г. М., Гусев С. И. Особенности использования многоуровневых преобразователей для нормализации показателей качества напряжения электрической сети. Специальный выпуск. ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2018. № 4. С. 58–65.
5. Тукшаитов Р. Х., Нигматуллин Р. М., Айхайти Исыхакефу, Салимуллин М. Ф. Оценка качества электрической энергии по уровню коэффициента искажения напряжения электросети. – Успехи современной науки. 2016. № 10. Т. 2. С. 105–107.
6. Шклярский Я. Э., Брагин А. А., Добуш В. С. Влияние гармонического состава тока и напряжения на мощность искажения. – Электронный журнал “Нефтяное дело”. 2012. № 4. С. 26–32.
7. Зырянов В. М., Митрофанов Н. А., Соколовский Ю. Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты. – Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1. С. 1–7.
8. Карев А. О коэффициенте мощности светодиодных светильников // Современная светотехника. 2020. № 2 (64). С. 16–17.
9. Тукшаитов Р. Х. О коэффициенте мощности и cos выпрямительного устройства при разных активно-емкостных нагрузках и уровне эмиссии в электросеть высших гармоник. – Практическая силовая электроника. 2019. № 3. С. 9–11.
10. Айхайти Исыхакефу. Метод комплексного контроля качества светодиодных осветительных приборов на основе исследования их характеристик. Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. технич. наук. – Казань: КГЭУ, 2018. 16 с.
11. Тукшаитов Р. Х., Шириев Р. Р. Определение уровня нелинейных искажений входного тока разных типов нагрузок на основе измерения коэффициента мощности и его сомножителя $\cos\phi$. – Практическая силовая электроника. 2018. № 4(72). С. 30–36.
12. Тукшаитов Р. Х., Семенова О. Д. О характере зависимости коэффициентов мощности и нелинейных искажений тока от уровня потребляемой мощности трансформаторами. Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2022. Передовые технологии и современные тенденции: материалы Международной научно-методической конференции. – Уфа: УНПЦ Изд-во УГНТУ, 2022. 722 с.
13. Смирнов С. С. Свойства активных мощностей гармоник искажающих нагрузок. – Электричество. 2010. № 9. С. 45–49.
14. Руководство пользователя прибора “Анализатор электропотребления AR5 и AR5-L”. – Электронная версия. gkovodstvo.ru/exspl/32928/index.html С. 1–10.
15. Тукшаитов Р. Х., Семенова О. Д., Новокрещенов В. В. Оценка уровня нелинейных искажений электроустановок на основе моделирования длительности импульса их входного тока. – ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2022. № 3. С. 23–26.
16. Тукшаитов Р. Х., Зарипов Р. К. Об одном эффективном способе снижения уровня эмиссии светодиодными лампами в электросеть высших гармоник промышленной частоты. – ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2023. № 1(76). С. 70–74.
17. Тукшаитов Р. Х., Зарипов Р. К. Светодиодная лампа. Заявка на полезную модель № 20221664/09(058149) от 13.10.2022.

Тукшаитов Рафаил Хасьянович, Заслуженный профессор КГЭУ, профессор кафедры “Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений” Казанского государственного энергетического университета, академик РАЕ. тел.: +7 (987) 184-03-15; e-mail: trh_08@mail.ru;

Зарипов Рустем Котдусович, аспирант кафедры “Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений” Казанского государственного энергетического университета, тел. 8-987-27-69-888; e-mail: rust@mail.ru.