

УДК 332.1

ПРИЧИНЫ ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И МОЩНОСТЬ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Сергей Викторович Кириллов

кандидат технических наук

kirill_mich@mail.ru

Мичуринская дистанция электроснабжения ОАО «РЖД»

Мичуринский государственный аграрный университет

Мичуринск, Россия

Аннотация. С появлением новой техники и развитием технологий в электротехнике и светотехнике, значительно увеличилось количество нелинейных электроприемников в электрических сетях. В этой связи наблюдается значительный рост гармонических составляющих токов и напряжений, в данных сетях циркулируют несинусоидальные токи и возникают искажения функции напряжения. Эти факторы заставляют использовать другие методы для расчета мощности тока, отличающиеся от классических методов расчета синусоидальных цепей.

Ключевые слова: нелинейный потребитель, нелинейная вольтамперная характеристика, гармонический состав, гармоники, мощность искажений.

С появлением новой техники и развитием технологий в электротехнике и светотехнике, значительно увеличилось количество электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками в электрических сетях, в том числе, питающих коммунально-бытовую нагрузку (импульсные блоки питания, частотные преобразователи и др.). В этой связи, наблюдается рост гармонических составляющих токов и напряжений в данных сетях. Эти составляющие электрических функций, как показывают исследования, не только влияют на качество электрической энергии, увеличивают потери в сетях, но и влияют на эксплуатационные режимы работы оборудования и приборов – вызывают нагрев, увеличивают погрешность учета и др. К тому же мощные нелинейные электроприемники могут оказывать значительное влияние на искажение синусоидальности напряжения, которое подается другим потребителям [1, 2, 3, 4, 5].

В классической электротехнике силовых цепей используются методы расчёта, исходя из предположения, что напряжение определяется синусоидальной функцией, частотой 50 Гц. Этим также определяются режимы работы практически всех электроприемников и приборов учета. Однако в современных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой имеются несинусоидальные токи и возникают искажения функции напряжения, и эти особенности заставляют использовать другие методы для расчета мощности тока, а также мощности искажений, отличных от классических методов расчета синусоидальных цепей [5, 6, 7].

Материалы и методы

Возникновение высших гармонических составляющих в спектре питающего напряжения обусловлено применением электропотребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой. На рисунке 1 изображена схема, поясняющая возникновение искажений функции питающего напряжения в электрических сетях [2, 4, 5].

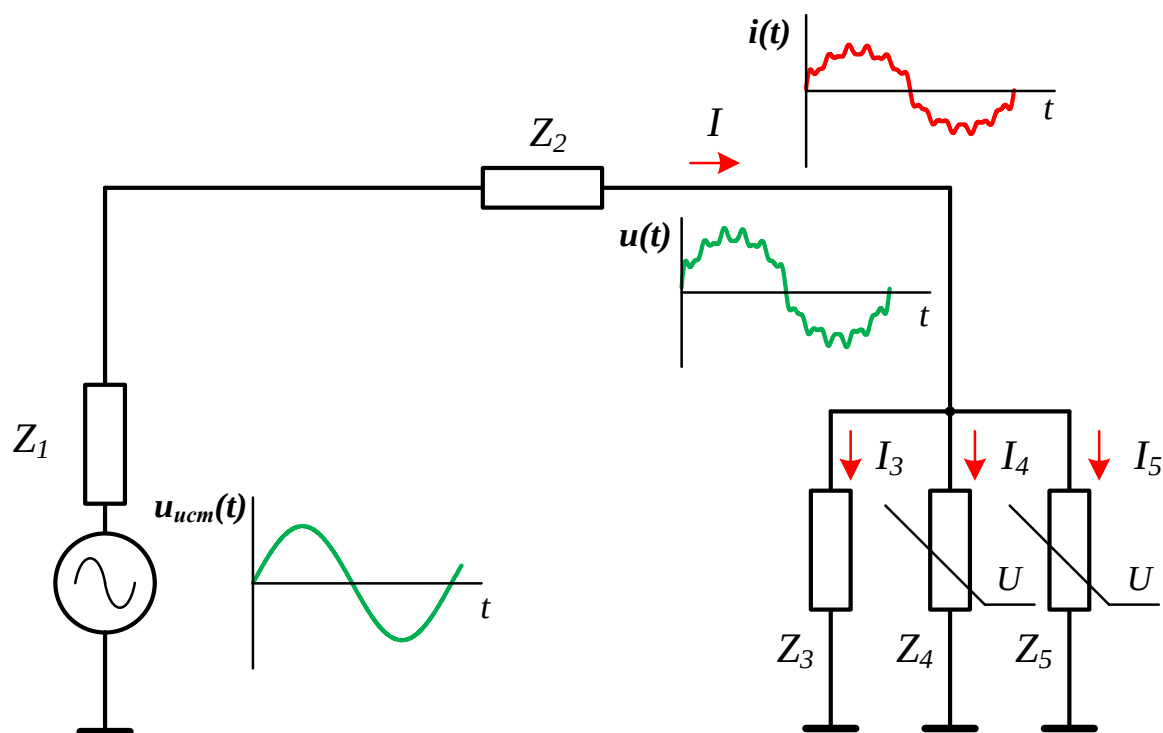


Рисунок 1 – Схема, поясняющая возникновение искажений формы питающего напряжения

Если предположить, что сопротивление сети относительно зажимов каждого отдельного электропотребителя было бы равно нулю, то искажений синусоидальности напряжения не существовало. В реальности сеть для любого электропотребителя представляет собой сопротивление - $Z_1 + Z_2$. Несинусоидальные токи нелинейных потребителей I_4 и I_5 , протекая по этому сопротивлению, вызывают пропорциональное падение напряжения на нем. В результате на зажимах нелинейных электропотребителей - Z_4 и Z_5 , а также на зажимах всех остальных электропотребителей - Z_3 , включенных параллельно им, появляются искажения функции напряжения. И соответственно, наибольшие искажения функции напряжения будут в местах подключения одного или нескольких мощных нелинейных электропотребителей при наибольшем сопротивлении источника питания и линий электропередачи. Таким образом, возникает ситуация, когда отдельные нелинейные потребители, потребляя несинусоидальный ток, также могут вносить искажения в функцию напряжения, которое подается для питания других электроприемников [2, 4, 5].

В существующих постулатах электротехники, при синусоидальном напряжении, активная мощность электрического ток P определяется только

первой (основной) гармоникой тока. Данная мощность идет на создание полезной работы и связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии, большей частью в тепловую. Дополнительно в сетях имеются другие виды мощностей, которые отличаются от активной мощности, и оказывают свое влияние на работу электрических сетей, электрического оборудования и приборов [5, 6]. Реактивная мощность Q при синусоидальном напряжении, также определяется первой (основной) гармоникой тока, но в отличие от активной мощности, реактивная мощность Q не выполняет никакой полезной работы, она служит для создания магнитных полей в элементах системы, циркулируя между источником электроэнергии и электроприемниками. Также, при синусоидальном напряжении, мощности P и Q определяют полную мощностью первой гармоники тока - $S_{(1)}$.

Однако, в электрических сетях с нелинейной нагрузкой, где присутствуют искажения синусоидальности функций тока возникают высшие гармонические составляющие тока электроприемника. Данные гармоники не соотносятся с синусоидальным напряжением, имеющей частоту первой гармоники – 50 Гц, и поэтому не являются активной и реактивной мощностями электрического тока. При синусоидальном напряжении и наличии высших гармоник тока вводится понятие - мощность искажений T [1, 2, 3, 4, 6]. Таким образом, активная мощность - P , реактивная мощность - Q и мощность искажений - T являются составляющими полной мощности - S . Реактивная мощность Q и мощность искажений T , протекая по сетям и оборудованию энергосистемы, вызывают в них дополнительные потери активной мощности (ΔP), тем самым снижая коэффициент полезного действия. Кроме того, перетоки указанных мощностей - Q и T , снижают пропускную способность линий электропередач, трансформаторов и других элементов системы, вынуждают увеличивать сечение проводников и мощность трансформаторов [4, 6, 8].

Результаты и обсуждение

При расчете энергетических показателей в большинстве случаев, предполагается, что напряжение питающей сети является синусоидальным, а ток в сети может быть несинусоидальным и содержит гармоники не равные основной. В этом случае активная мощность периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период [6, 7, 8]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt . \quad (1)$$

При синусоидальном напряжении, имеется следующее соотношение для активной мощности:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = U \cdot I_{(1)} \cos \varphi , \quad (2)$$

где

U - действующее значение напряжения;

$I_{(1)}$ - действующее значение первой гармоники тока;

φ - сдвиг фазы первой гармоники тока относительно фазы напряжения.

Таким образом, при синусоидальном напряжении и несинусоидальном токе сети активная мощность определяется только первой гармоникой тока питающей сети и сдвигом фазы между напряжением и первой гармоникой тока. Реактивная мощность Q при синусоидальном напряжении равна:

$$Q = U \cdot I_{(1)} \sin \varphi , \quad (3)$$

т.е. реактивная мощность также определяется только первой гармоникой тока питающей сети.

Полная мощность S электроприёмника определяется:

$$S = U \cdot I , \quad (4)$$

Активная P и реактивная Q мощности определяют полную мощность передаваемой на частоте первой гармоники тока:

$$S_{(1)} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2} . \quad (5)$$

Очевидно, если напряжение имеет синусоидальную форму, а ток является несинусоидальным, то имеем следующее неравенство:

$$S > S_{(1)} . \quad (6)$$

Причина такого соотношения – наличие в полной мощности S третьей составляющей, которая определяется как мощность искажений - T .

Несинусоидальную функцию тока можно представить в виде разложения в ряд Фурье на первую гармонику и гармоники с более высокими частотами, кратными первой (основной) [6, 7, 8]. В этом случае, действующее значение несинусоидального тока определяется:

$$I = \sqrt{I_{(1)}^2 + \sum_{k=2} I_{(k)}^2} , \quad (7)$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока;

$I_{(k)}$ – действующее значение k -й гармоники, начиная со второй.

При несинусоидальном токе, его полная мощность определяется:

$$S = U \cdot I = \sqrt{S_{(1)}^2 + T^2} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} , \quad (8)$$

где T – мощность искажений:

$$T = U \sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2} . \quad (9)$$

Гармонические составляющие тока представляют собой гармоники с частотами, кратными основной частоте источника питания, и обуславливают наличие мощности искажений, которая определяется коэффициентом искажений, измеряемым в %:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100 . \quad (10)$$

где $I_{(k)}$ и $I_{(1)}$ – действующие значения k -й и первой гармоник тока.

В зарубежной и некоторой отечественной литературе вместо коэффициента искажения K_I используется понятие *THD - Total Harmonic Distortion*.

Таким образом, в сетях с нелинейными электроприемниками и где присутствуют высшие гармонические составляющие в функции тока, также присутствует мощность искажений, которая определяется коэффициентом искажений.

Были проведены исследования искажений функций тока фидера питания сельских потребителей напряжением 0,4 кВ от тяговой подстанции переменного тока железной дороги [5].

Ниже приведены осциллограммы напряжения 0,4 кВ и тока питающей линии сельскохозяйственных потребителей – рисунок 2, также спектр гармоник тока данной линии до 20 гармоники включительно – рисунок 3.

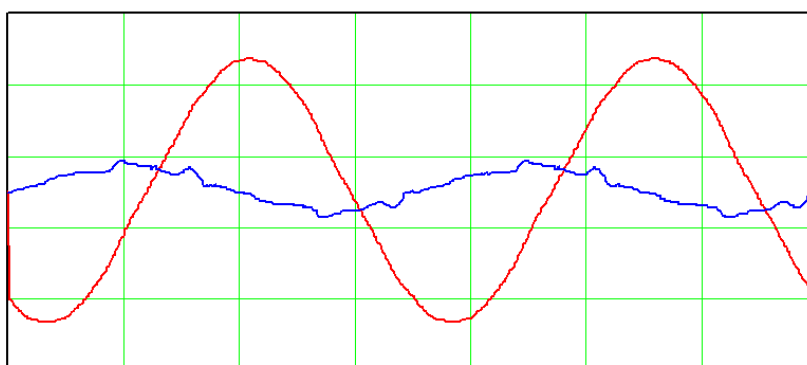


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжения 0,4 кВ и тока линии электропитания сельских потребителей, подключённой к сетям железной дороги.

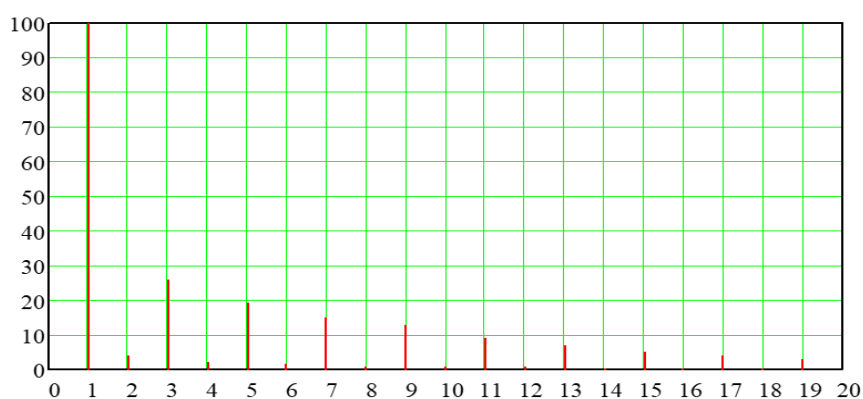


Рисунок 3 – Спектр гармоник тока (до 20 гармоники) линии электропитания сельских потребителей, подключённой к сетям железной дороги (в %).

На рисунках 2 и 3 видно, что из-за нелинейных электроприемников имеется значительное искажение функции тока. Причем преобладающими являются нечётные гармоники – 3, 5, 7 и т. д., а значения четных гармоник тока являются незначительными.

Так же был проведён расчет коэффициента искажения функции тока согласно выражения (10). Рассчитанное значение коэффициента искажения для представленных на рисунке 2 осциллограммы тока и представленного на рисунке 3 спектра тока питающей линии сельскохозяйственных потребителей от тяговой подстанции переменного тока железной дороги составило **39,2 %**.

Выводы

- в современных системах электроснабжения имеются электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой, которые потребляют несинусоидальный ток с гармоническими составляющими различных частот;
- мощные электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой потребляя несинусоидальный ток, вызывают падение напряжения на элементах системы электроснабжения, гармонический состав которого, соответствует гармоническому составу потребляемого тока;
- наличие в системе электроснабжения гармоник не равных основной, означает, что в сети имеется мощность искажений T , которая, как и реактивная мощность Q , не выполняет полезной работы, а только нагружает сеть гармониками тока.

Список литературы:

1. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника. Науч.-техн.сб. Вып. 5 / Под ред. Малышкова Г.М., Лукина А.В. М.: АОЗТ "ММП-Ирбис", 2002.
2. Кудряшев Г.С., Третьяков А.Н. Влияние высших гармоник на работу электрооборудования в сельских распределительных сетях // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 4(49). С. 137-143. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-4-137-143. EDN RLKSBA.
3. Тюрин А.А. Обеспечение качества электроэнергии при электроснабжении сельскохозяйственных потребителей // Точная наука. 2017. – № 10. С. 121-123. EDN ZBMPRT.

4. Григорьев О., Петухов В., Соколов В., Красилов И. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники, 2002. №6.
5. Кириллов С.В. Снижение погрешности учета электроэнергии в системах электроснабжения с преобладающей нелинейной нагрузкой: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кириллов Сергей Викторович. Мичуринск, 2006. 154 с. EDN NOCDFH.
6. Агунов М.В., Агунов А.В., Вербова Н.М. Новый подход к измерению электрической мощности // Промышленная энергетика, 2004. № 2. С. 30-33.
7. Баков Ю.В. Мощность переменного тока // Ивановский государственный энергетический университет, 1999. 200 с.
8. Тихомиров В.А. Методика расчета энергетических показателей преобразовательных устройств // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 3(122). С. 92-106. DOI 10.46960/1816-210X_2018_3_92. EDN YKKDRR.

UDC 332.1

**CAUSES OF DISTORTION OF CURRENT AND VOLTAGE
SINUSOIDALITY IN ELECTRIC NETWORKS AND THE POWER OF NON-
SINUSOIDAL CURRENT**

Sergey V. Kirillov

candidate of technical sciences

kirill_mich@mail.ru

Michurinskaya power supply division of JSC Russian Railways

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Abstract. With the advent of new equipment and the development of technologies in electrical engineering and lighting engineering, the number of non-linear electrical receivers in electrical networks has increased significantly. In this regard, there is a significant increase in harmonic components of currents and voltages, non-sinusoidal currents circulate in these networks and distortions of the voltage function occur. These factors force the use of other methods for calculating current power, different from the classical methods for calculating sinusoidal circuits

Key words: nonlinear consumer, nonlinear volt-ampere characteristic, harmonic composition, harmonics, distortion power.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 30.06.2025.

The article was submitted 10.05.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 30.06.2025.