

Ю.Г. Качан, д-р техн. наук

(Украина, Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия),

А.В. Николенко, канд. техн. наук, В.В. Кузнецов

(Украина, Днепрпетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

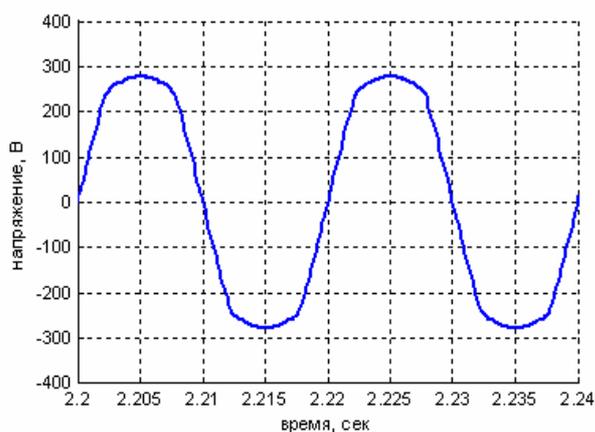
О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Введение

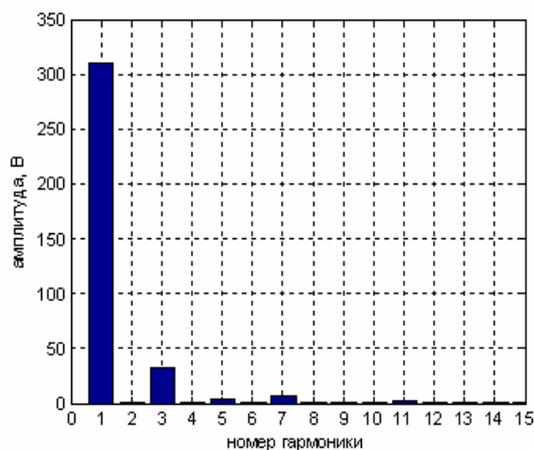
Известно, что при наличии искажений в питающем напряжении асинхронного двигателя (АД), появляются пульсации момента на его валу, повышаются потери и снижается коэффициент мощности [1, 2]. Последнее свойственно и для других потребителей электроэнергии на промышленных предприятиях, поэтому в настоящее время ГОСТом [3] нормируются показатели качества электроэнергии (ПКЭ), такие как коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения и т.д. Тем не менее, в цеховых сетях предприятий зачастую имеют место искажения, которые существенно снижают энергетические показатели производства.

Результаты исследований

Характер несинусоидальности, т.е. гармонический состав напряжения, определяется типом и техническим состоянием электроустановки, вызвавшей искажение. Частой причиной несинусоидальности, особенно в сетях малой мощности, является насыщение сердечников силовых трансформаторов цеховых подстанций. Этот случай характерен для небольших предприятий, а также технологических объектов сельского хозяйства. Насыщение магнитопровода силовых трансформаторов может быть обусловлено работой мощных нагревательных элементов и т.д. Типовая кривая питающего напряжения при этом имеет «усеченный» вид, а в его спектральном составе ярко выражена третья гармоника (рис. 1, а, б).



а



б

Рис. 1. Форма типовой кривой напряжения в случае насыщения сердечников силовых трансформаторов (а) и его спектральный состав (б)

Как известно, третьи гармоники вредны для АД и трансформаторов, первичные обмотки которых соединены в треугольник. Это связано с тем, что они образуют нулевую последовательность, сопротивление электрических обмоток на которой невелико (определяется индуктивностями рассеивания). Указанное соединение обмоток обеспечивает контур для протекания токов третьей гармоники. В результате повышаются потери, падает нагрузочная способность рассмотренного электрооборудования.

Другой распространенной причиной искажения синусоидальности является наличие в сети мощных полупроводниковых преобразователей [4, 5, 6]. В моменты коммутации таких устройств потребляемые ими токи имеют пиковые значения, в результате на входах остальных потребителей наблюдаются «провалы» напряжения (рис. 2, а).

Приведенная форма кривой характерна для цеховых сетей крупных промышленных предприятий, таких как металлургические, нефтеперерабатывающие, горно-обогатительные, где установлены мощные регулируемые электроприводы с выпрямителями или преобразователями частоты. Опыт свидетельствует, что, несмотря на принимаемые меры по повышению электромагнитной совместимости, показатели качества питающего напряжения в таких случаях все же превышают предельные уровни допустимых значений.

В спектральном составе напряжения, искаженного полупроводниковыми преобразователями, имеются практически все гармоники высшего порядка (рис. 2, б). Хотя они и слабо влияют на пульсации момента АД [7], однако вызывают дополнительные потери в стали указанных двигателей и трансформаторов, обуславливают их повышенный нагрев, что и приводит к снижению надежности электрооборудования.

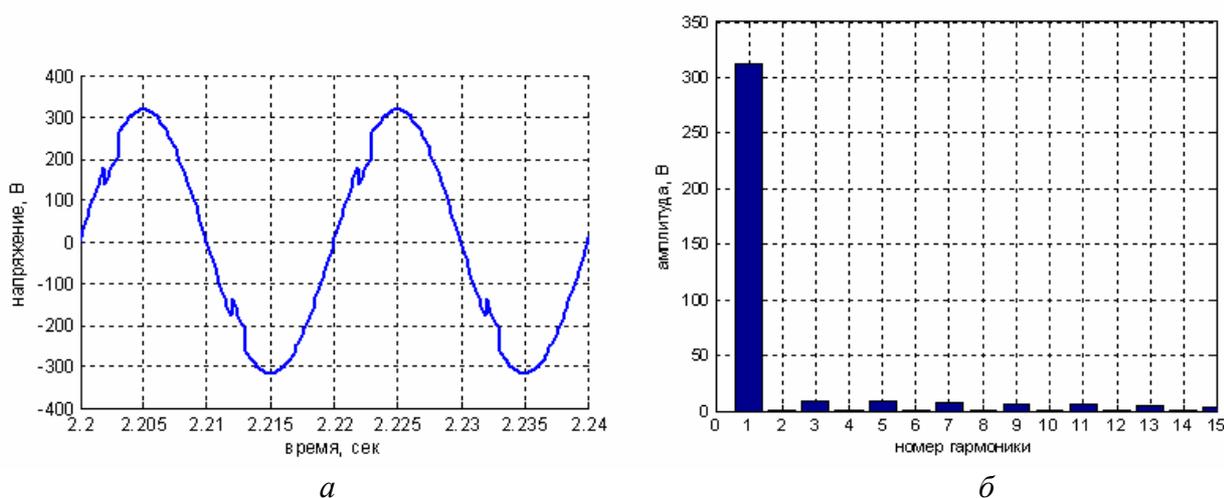


Рис. 2. Форма кривой напряжения при наличии коммутационных помех (а) и его спектральный состав (б)

При наличии в цеховой сети мощных потребителей, питаемых от полупроводниковых преобразователей с фазоимпульсным регулированием (гальванические ванны, дуговые печи), нарушается симметрия синусоиды напряжения, а в спектре появляется ярко выраженная вторая гармоника (рис. 3 а, б). Последняя же, как известно, обуславливает протекание токов обратной последовательности, снижая, таким образом, полезный момент на валу двигателя. Повышаются также вибрации в механической части, ускоряется износ и снижается надежность оборудования.

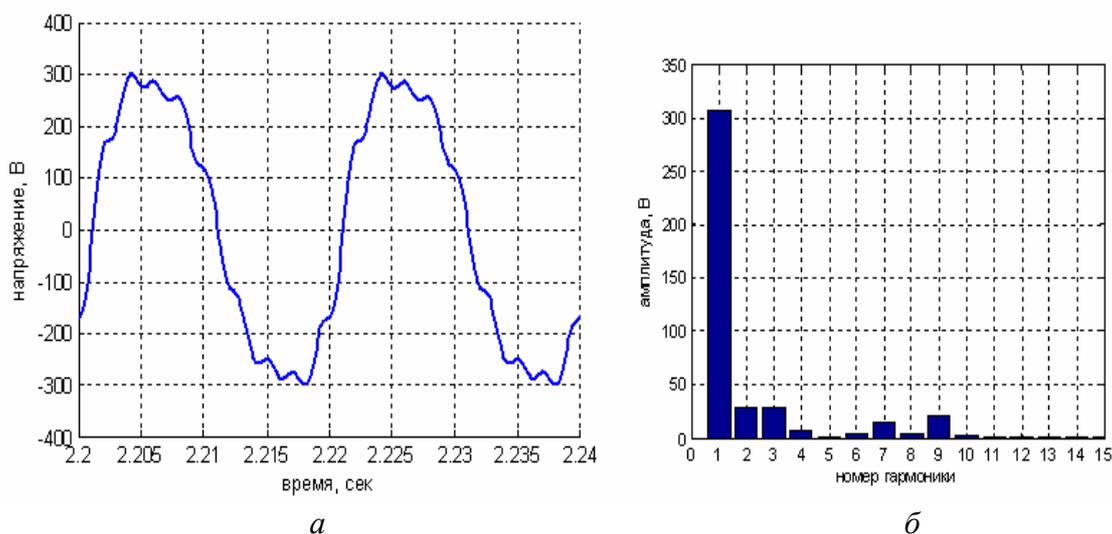


Рис. 3. Форма кривой напряжения с преобладающей второй гармоникой (а) и его спектральный состав (б)

Реально полученные осциллограммы напряжений в условиях конкретных промышленных предприятий подтверждают вышесказанное. Так, на рис. 4 показаны кривые линейных напряжений цеха крекинга одного из нефтеперерабатывающих предприятий Украины, в спектре которых (рис. 5) содержится большое количество высших гармоник. Для удобства отображения на этом рисунке амплитуда первой (основной) гармоники показана не полностью.

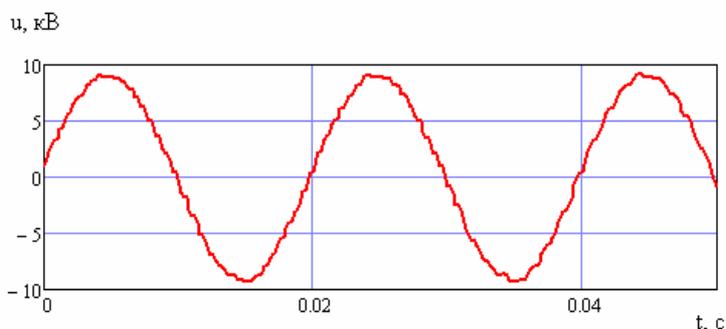


Рис. 4. Осциллограммы линейных напряжений цеховой подстанции крекингового цеха нефтеперерабатывающего завода

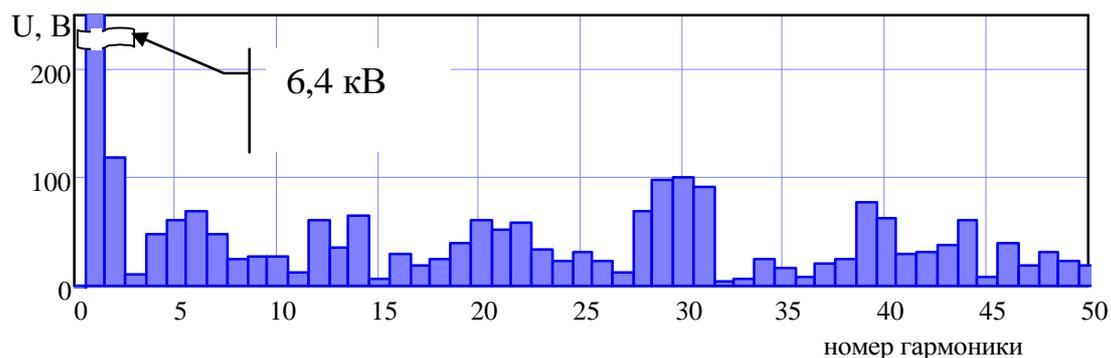


Рис. 5. Спектральный состав питающего напряжения цеховой подстанции крекингowego цеха нефтеперерабатывающего завода

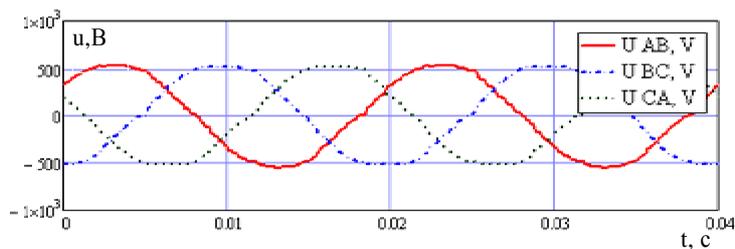
Показатели качества напряжения в рассматриваемом случае приведены в табл. 1, которая отображает нормально и предельно допустимые значения коэффициентов гармонических составляющих сетевого напряжения $k_{U(n)}$ и их реальные значения по фазам. Жирным шрифтом выделены показатели, превышающие допустимые величины этих показателей.

Таблица 1

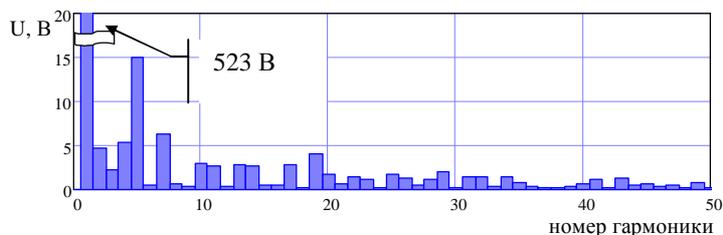
№ гармоники	Нормально допустимое значение коэффициента $k_{U(n)}$ для сети 6 кВ, %	Предельно допустимое значение коэффициента $k_{U(n)}$ для сети 6 кВ, %	Фаза «АВ» $k_{U(n)}$, %	Фаза «ВС» $k_{U(n)}$, %	Фаза «СА» $k_{U(n)}$, %
4	0,7	1,05	0,87	0,32	0,55
6	0,3	0,45	0,91	0,91	0,55
8	0,3	0,45	0,49	0,19	0,60
10	0,3	0,45	0,28	0,66	0,23
12	0,2	0,35	0,60	0,55	0,52
14	0,2	0,35	0,60	0,31	0,50
16	0,2	0,35	0,48	0,07	0,35

Тем не менее, просчитанное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения k_U в соответствии с [3] для всех трех фаз не превысило 3,6 %, что удовлетворяет требованиям качества электроэнергии. Итак, в исследуемом случае, несмотря на то, что k_U не превышает нормально допустимого значение (5 %), можно сделать вывод о несоответствии питающего напряжения требованиям качества по критерию коэффициентов гармонических составляющих (гармоники № 6, 8, 10, 12, 14, 16).

На рис. 6 показаны осциллограммы линейных напряжений и их спектральный состав подстанции цеха механической обработки завода монтажных изделий. Такая форма кривых обусловлена загруженностью цеховой подстанции и наличием мощной индукционной установки для закалки. В представленном случае, в отличие от предыдущего, отдельные гармоники находятся в допустимом диапазоне, однако коэффициент искажения синусоидальности составляет 8,4 %, т.е. превышает нормально допустимое значение.



а



б

Рис. 6. Осциллограммы и спектральный состав линейных напряжений подстанции цеха механической обработки завода монтажных изделий

В качестве следующего примера рассмотрим цеховые сети Запорожского трансформаторного завода. Электроснабжение его технологических потребителей осуществляется с помощью двух трансформаторных подстанций 6 кВ/0,4 кВ, через распределительную кабельную шинопроводную систему, протяженностью 124 км. Обработка статистических данных, набранных на входе предприятия, показала, что существенных отклонений по ПКЭ нет. Максимальное и минимальное значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения составило 0,75 % и 0,32 % соответственно. Указанные значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности (K_{2U}) оказались равными 0,9 % и 0,38 %.

В качестве цеховых сетей для рассмотрения были взяты те, где сконцентрировано наибольшее количество разнотипных потребителей, в том числе таких, которые ухудшают ПКЭ: механический цех, сварочный цех, деревообрабатывающий цех, литейный цех. В табл. 2 показан процент потребителей по установленной мощности в указанных цехах ОАО «ЗТЗ», из которой видно какие потребители в них являются виновниками отклонений ПКЭ.

Таблица 2

Наименование цеха	% от установленной мощности				
	Потребители, не влияющие на ПКЭ		Потребители, влияющие на ПКЭ		
	Станки с асинхронным приводом	Обжиговые печи	Сварочное оборудование	Ванны металлопокрытий	Индукционные печи
Механический	92,5	5	2,5	-	-
Сварочный	27,3	2,7	70	-	-

Деревообрабатывающий	98	-	-	-	-
Литейный	5,9	34,4	-	50	9,6

Анализ режима электропотребления этого предприятия показал, что в значительной степени влияют на показатели качества электроэнергии электроприемники сварочного цеха, в котором установлены выпрямители с мостовой схемой выпрямления; литейного цеха, в котором находятся ванны металлопокрытий с питанием от вентильных преобразователей постоянного тока, которые увеличивают коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения. Более подробно показатели качества питающего напряжения рассмотренных предприятий приведены в табл. 3. Здесь жирным шрифтом выделены показатели, превышающие нормально допустимые величины.

Таблица 3

Предприятие	Наименование цеха	Диапазон изменения ПКЭ						
		$k_U, \%$	Нормально допустимое значение $k_{U_{норм}}, \%$	Значения коэффициентов гармонических составляющих $k_{U(v)}, \%$	Величина отклонения напряжения $dU, \%$	Нормально допустимое значение $dU_n, \%$	Значения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности $K_{2U}, \%$	Нормально допустимое значение $K_{2Un}, \%$
ОАО «ЗТЗ»	Механический	2÷4	8	0,07÷0,14	-5÷+4	±5	1,7÷1,9	2
	Сварочный	8÷12	8	0,07÷0,15	-9 ÷+5	±5	1,5÷ 3,6	2
	Деревообрабатывающий	1,2÷2	8	0,08÷0,14	-5÷+6	±5	1,1÷2,2	2
	Литейный	7÷ 11	8	0,07÷0,15	-7 ÷+5	±5	2÷ 3,5	2
Нефтеперерабатывающий завод	Крекинг	2,6÷4,6	8	0,35 ÷ 0,91	-1÷+1	±5	0,5÷1,2	2
	Ректификации	2,3÷4,3	8	0,01÷0,021	-	±5	1÷1,5	2
	Цех фильтрации	0,1÷0,3	8	0,01÷0,02	-1÷+1	±5	0,2÷1,8	2
Завод монтажных изделий	Механической обработки	7,4÷ 9,4	8	0,01÷0,02	-	±5	1÷1,5	2
	Ремонтный	0,9÷2,9	8	0,01÷0,02	-1÷+1	±5	0,35÷1,7	2
	Инструментальный	1,8÷3,8	8	0,01÷0,02	-	±5	1÷2	2

Так, на предприятии ОАО «ЗТЗ» наибольшее отклонение ПКЭ от допустимых значений зафиксировано в сварочном и литейном цехах, что отрицательно влияет на работу потребителей, находящихся в них. Высокий процент искажения синусоидальности кривой напряжения негативно сказывается на техническом состоянии станков и механизмов, в которых используются АД, так как приводит к ухудшению изоляции обмоток последних. Возрастают также суммарные потери электрической энергии, снижается качество выпрямленного

тока преобразовательных установок, необходимого для гальванического производства. Несоответствие значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности нормально допустимому значению приводит к возникновению магнитных полей, вращающихся встречно ротору АД, вызывающих вибрации и разрушения подшипников.

Выводы

1. Качество электрической энергии многих промышленных предприятий Украины не соответствует ГОСТу. В цеховых сетях присутствуют искажения, обусловленные работой полупроводниковых преобразователей, насыщением магнитопроводов трансформаторов и т.д.

2. При соответствии требованиям ГОСТа коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, по отдельным гармоникам наблюдается существенное превышение коэффициентов гармонических составляющих сетевого напряжения, что свидетельствует о предпочтительности использования последних при анализе энергоэффективности АД работающих в условиях некачественного питания.

3. Экспериментально установлено, что качество электроэнергии на входе предприятия и по его цехам отличается. Таким образом, одни и те же потребители, находящиеся в разных цехах, работают с различной энергоэффективностью, обусловленной отклонениями ПКЭ и требуют индивидуального подхода при решении вопроса их защиты.

Список литературы

1. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией / Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 80. – С. 58–62.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат. – 2000. – 340 с.
3. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения». – ИПК Издательство стандартов. – 1998.
4. Жук А.К. Анализ влияния тиристорного преобразователя на питающую сеть с учетом коммутационных колебаний // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2003. – №60. – С. 39–47.
5. Спектральный анализ работы типовых полупроводниковых преобразователей в автономных электроэнергетических системах / Запальский В.Н. // Зб. наук. праць Дніпродзержинськ. держ. техн. ун-ту (техн. науки). Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 230–231.
6. Электропривод переменного тока с IGBT-транзисторным преобразователем: электромагнитная совместимость и качество электроэнергии / Полищук И.И. // Зб. наук. праць Дніпродзержинськ. держ. техн. ун-ту (техн. науки). Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 403–406.
7. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя / Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. // Гірн. електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 83. – С.113–118.