

УДК 621.311

Р. ПАВЕЛЕК (ЛОДЗИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, ПОЛЬША),  
Ю. Л.САЕНКО (ПГТУ, УКРАИНА)

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет»,  
ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, эл. почта: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК НА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### Введение

К электроэнергетическим сетям, как правило, подключаются различные группы потребителей энергии. Часть из них – это потребители, которые вносят в электрическую сеть электромагнитные помехи в виде: провалов напряжения, колебаний напряжения, переходных процессов, гармоник и т.д. Типичным источником помех является электрическая тяга. Основными устройствами, которые используются для преобразования энергии на тяговых подстанциях, являются выпрямители, которые для электрической сети представляют собой нелинейную нагрузку. Сетевой ток таких нагрузок несинусоидален, что является причиной искажения напряжения [1-3]. Тяговые нагрузки (польские железные дороги РКР) питаются часто от подстанций с высшим напряжением 110 кВ. От шин среднего напряжения тяговых подстанций питаются также и другие потребители. Они получают электроэнергию более низкого качества, особенно это относится к искажению напряжения и появлению высших гармоник. Примерная схема тяговой подстанции представлена на рис. 1.

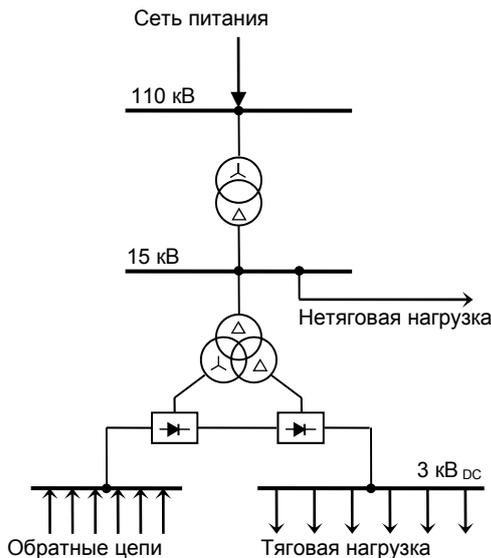


Рис. 1. Схема тяговой подстанции

Выпрямители, используемые в электрической тяге, выполняются все чаще по 12-пульсной схеме. В этом случае необходимо использование трехобмоточного выпрямительно-трансформатора (рис. 1).

С целью определения потенциального влияния тяговых подстанций на работу электрической сети были выполнены исследования нагрузки, а также параметров, которые характеризуют качество электроэнергии выбранной подстанции 110/15 кВ, питающей 3 тяговые подстанции в районе с большим трафиком железнодорожного движения. На подстанции установлены 2 трансформатора 110/15 кВ номинальной мощностью 25 МВА. Распределительная сеть 15 кВ позволяет разделить тяговую нагрузку и остальных потребителей, запитав их от отдельных трансформаторов.

Измерения проводились синхронно двумя анализаторами качества электрической энергии типа Fluke 1760 (устройство класса А) [4], подключенными к обмоткам трансформатора, питающего отдельную тяговую нагрузку, со стороны 110 и 15 кВ. Измерения проведены в период 1 недели с 19.11.10 (0:0 часов) до 26.11.10 (0:0 часов).

### Изменение тяговой нагрузки в период измерений

Изменения активной и реактивной мощности тяговой нагрузки в измерительный период со стороны 110 кВ, показаны на рис. 2 и 3.

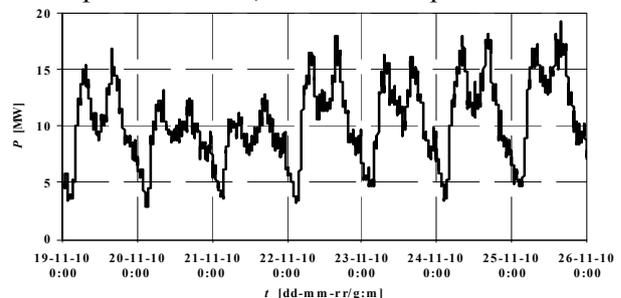


Рис. 2. Изменение активной мощности тяговой нагрузки в измерительный период

Потребление активной мощности изменяется в пределах от 2,85 МВт (минимальная

нагрузка) до 19,23 МВт (максимальная нагрузка), реактивной мощности от 0,1 до 4,7 Мвар при коэффициенте мощности  $\cos\phi = 0,96 \div 0,98$  (рис. 4). Такой широкий диапазон изменений позволяет провести оценку влияния тяговой нагрузки на значения параметров, характеризующих качество электрической энергии в точке подключения к сети. Следует также отметить повторяющийся суточный характер изменения нагрузки с меньшими значениями, появляющимися в период выходных.

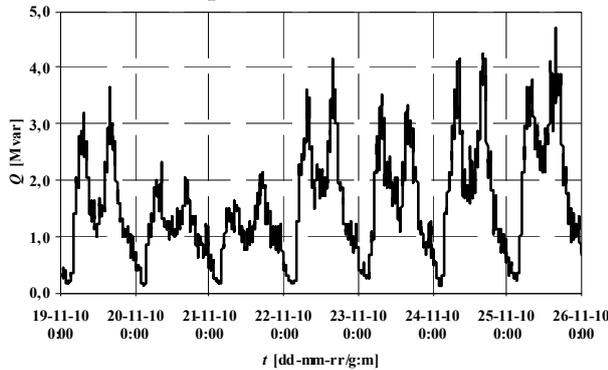


Рис. 3. Изменение реактивной мощности тяговой нагрузки в измерительный период

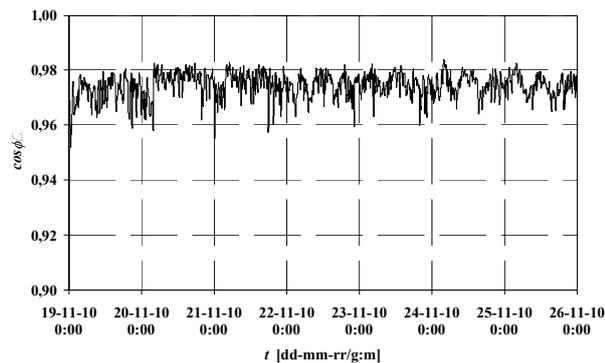


Рис. 4. Изменение коэффициента мощности тяговой нагрузки в измерительный период

### Показатели качества электрической энергии

Анализаторы качества электрической энергии типа Fluke 1760 предназначены для измерений и оценки качества электрической энергии согласно требований нормы PN-EN 50160 [5]. На основе этого стандарта базируется также существующее в Польше правило, касающееся качества электрической энергии в соответствии с системным распоряжением [6].

Согласно существующим правилам [5-7] оценку качества электрической энергии необходимо проводить в период не меньше 1 недели. Показатели качества измеряются постоянно (каждый полупериод кривой напряжения со средним 10-минутным интервалом). 95% ре-

зультатов измерений, полученных на протяжении недели должны соответствовать нормативным требованиям. Согласно с требованиями качество электроэнергии определяется параметрами напряжения в точке подключения (соединения) потребителя к общественной сети, описываемые следующими соотношениями.

Значение напряжения

$$U_L\% = \frac{U_L}{U_c} 100\%, \quad (1)$$

где  $U_c$  – заявленное напряжение в месте соединения с электрической сетью (как правило, равно номинальному напряжению сети);

$U_L$  – среднее напряжение в измерительном интервале.

Значение напряжения в сетях 15 кВ согласно нормы PN-EN 50160 [5], а в сети 110 кВ согласно системного распоряжения [5] должны быть в пределах  $\pm 10\%$  декларированного напряжения.

Коэффициент несимметрии:

$$K_{2U} = \frac{U_{2s}}{U_{1s}} 100\%, \quad (2)$$

где  $U_{1s}$  – среднее напряжение обратной последовательности в измерительном интервале,

$U_{2s}$  – среднее напряжение обратной последовательности в измерительном интервале.

Допустимое значение несимметрии напряжения в сети 15 кВ согласно нормы [5] составляет 2%, а в сети 110 кВ, согласно распоряжения [6] равняется 1%. Относительные значения высших гармоник напряжения

$$U_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} 100\%, \quad (3)$$

где  $U_h$  – среднее значение  $h$ -й гармоники ( $h = 1, \dots, 40$ ) напряжения в измерительном интервале;

$U_1$  – среднее значение основной гармоники напряжения в измерительном интервале.

Допустимые относительные показатели высших гармоник напряжения для сетей 15 кВ согласно нормы [5] указаны в табл. 1, а для сети 110 кВ в соответствии с постановлением [6] – в табл. 2.

Коэффициент искажения напряжения

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} 100\%. \quad (4)$$

Допустимое значение коэффициента искажения напряжения в сети 15 кВ согласно [5] составляет 8%, в сети 110 кВ в соответствии с [6] 3%.

Длительная доза фликера

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3}{12}}, \quad (5)$$

где  $P_{st}$  является средней в диапазоне измерения кратковременной дозой фликера.

Допустимые значения длительной дозы фликера в сети 15 кВ согласно [5] составляет 1, а в сети 110 кВ согласно [6] составляет 0,8.

**Оценка качества электрической энергии**

Сводные результаты измерений показателей качества электрической энергии в измерительном периоде в узлах сети 15 и 110 кВ представлены в табл.3.

Таблица 1

**Допустимые значения высших гармоник напряжения в сети 15 кВ**

Нечетные гармоники				Четные гармоники	
некратные 3		кратные 3			
h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 ÷ 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Таблица 2

**Допустимые значения высших гармоник напряжения в сети 110 кВ**

Нечетные гармоники				Четные гармоники	
некратные 3		кратные 3		некратные 3	
h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]
5	2,0	3	2,0	2	1,5
7	2,0	9	1,0	4	1,0
11	1,5	15	0,5	>4	0,5
13	1,0	>21	0,5		
17	1,0				
19	1,0				
23	0,7				
25	0,7				
>25	$0,2 + 0,5 \frac{25}{h}$				

Таблица 3

**Результаты измерений показателей качества электрической энергии в сетях 15 и 110 кВ**

Параметры	Сеть 15 кВ				Сеть 110 кВ			
	L1	L2	L3	Доп. знач.	L1	L2	L3	Доп. знач.
$U$ [%]	106,72	106,46	106,47	110,0	<b>110,47</b>	<b>110,55</b>	<b>110,30</b>	110,0
$THD_U$ [%]	<b>11,06</b>	<b>11,37</b>	<b>11,35</b>	8,0	1,41	1,39	1,40	3,0
$P_{lt}$ [-]	0,30	0,30	0,30	1,0	0,31	0,31	0,29	0,8
$K_{2U}$ [%]	0,22			2,0	0,25			1,0

Во время периода измерения было установлено периодичное превышение допустимых показателей в сети 110 кВ в ночной период нагрузки. В свою очередь в сети 15 кВ появляется превышение допустимых значений коэффициента искажения фазного напряжения  $THD_U$ .

В свою очередь, значения остальных параметров, которые характеризуют качество электрической энергии, то есть кратковременной ( $P_{st}$ ) и длительной ( $P_{lt}$ ) дозы фликера, а также коэффициента несимметрии напряжений ( $K_{2U}$ ) для обеих рассматриваемых сетей (15 и 110 кВТ)

за весь период измерения не превысил допустимого показателя определенного в нормах [5,6].

В связи с этим последующий материал будет посвящен анализу причин превышения допустимых значений (выделенных в таблице 3 жирным шрифтом) напряжения в сети 110 кВ и коэффициентов искажения напряжения в сети 15 кВ.

### Уровни напряжения

На рис. 5 приведены изменения усредненных в пределах 10-минутных интервалов значений фазных напряжений и токов на шинах 110 кВ. На этом рисунке можно заметить четкую корреляцию между изменениями напряжения и тока нагрузки. Изменения напряжения вызваны суточными изменениями нагрузки. Увеличение тока нагрузки сопровождается уменьшением напряжения и наоборот, при уменьшении тока нагрузки напряжения возрастает.

Используя данные, представленные на рис. 5, были обработаны характеристики напряжения и тока рассматриваемого узла сети 110 кВ. Такая зависимость для фазы L1 показана на рис. 6. С целью определения значения напряжения, которое появилось бы на шинах питания без нагрузки, была начерчена линия тренда.

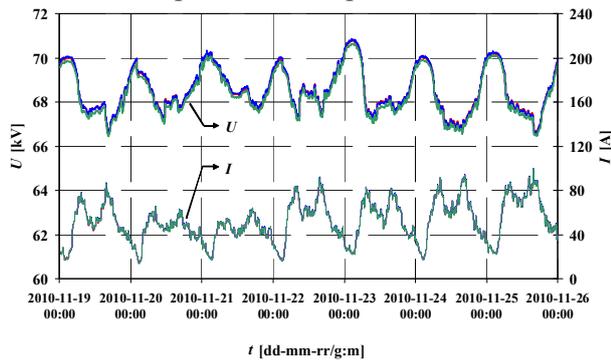


Рис. 5. Сравнение изменений фазовых напряжений на шинах 110 кВ и токов нагрузки в период измерения

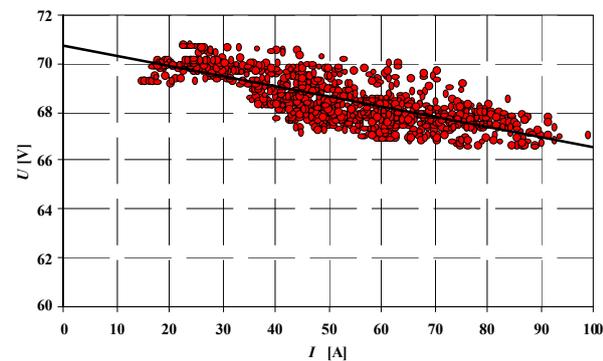


Рис. 6. Зависимость напряжения от тока в сети 110 кВ

Эти явления в сети 15 кВ протекают по другому. На рис. 7, который представляет сравнение изменений значений фазных напряжений в сети 15 кВ с изменениями значений тока

трансформатора со стороны 15 кВ. Так четко видно отсутствие корреляции между изменениями напряжения и тока нагрузки. В свою очередь, можно наблюдать частые изменения напряжения, которые возникают в результате действия регулятора напряжения (РПН), установленного на трансформаторе.

Действие автоматики РПН трансформатора видно на рис. 8, на котором показана зависимость показателей фазного напряжения от тока для фазы L1 в сети 15 кВ. Практически плоские линии тренда, показанные на этих рисунках, свидетельствуют о правильной работе контролера, управляющего работой РПН трансформатора.

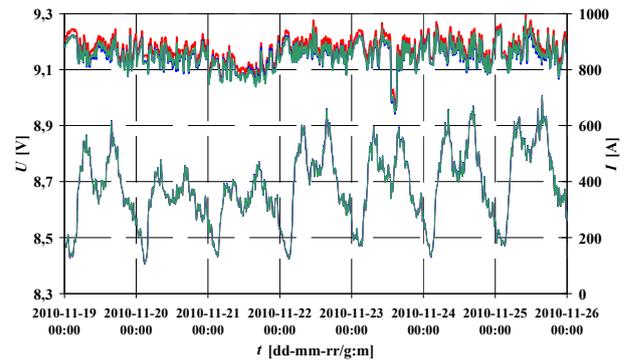


Рис. 7. Сравнение изменений фазных напряжений в сети 15 кВ и токов нагрузки в период измерения

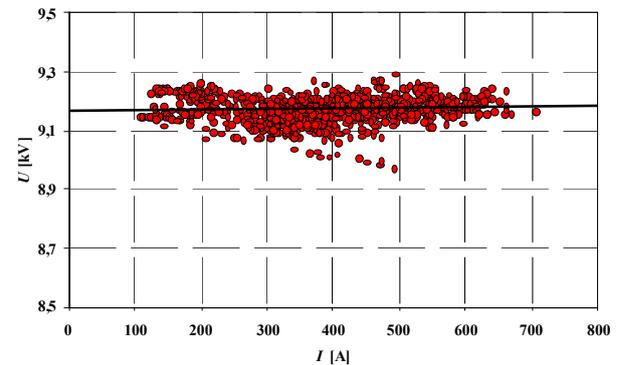


Рис. 8. Зависимость напряжения от тока в сети 15 кВ при работе РПН трансформатора

### Высшие гармоники напряжений и токов

Основной нагрузкой трансформатора, подключенного к исследуемой распределительной подстанции на стороне 15 кВ, являются 3 тяговые подстанции, оборудованные 12-пульсными диодными преобразователями. Эта нагрузка характеризуется высокой изменчивостью в течение суток (рис. 2 и 3). Сетевые токи преобразователей сильно искажены (рис. 9) с преобладающей долей 11-й и 13-й гармоник (рис. 10) [8].

Эти преобразователи являются источником высших гармонических токов, частотные спектры которых содержат, прежде всего, гармоники с номерами  $h = 12n \pm 1$ . Наличие высших

гармоник тока других порядков возникает в основном из-за несимметрической нагрузки отдельных трехфазных 6-пульсных выпрямительных мостов, которые в паре образуют 12-пульсную систему. Из сравнения характера протекания фазных токов с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ, показанных на рис. 9, а также из сравнения относительных значений высших гармоник этих токов, представленных на рис. 10, можно сделать вывод, что искаженные токи практически точно трансформируются из сети 15 кВ в сеть 110 кВ.

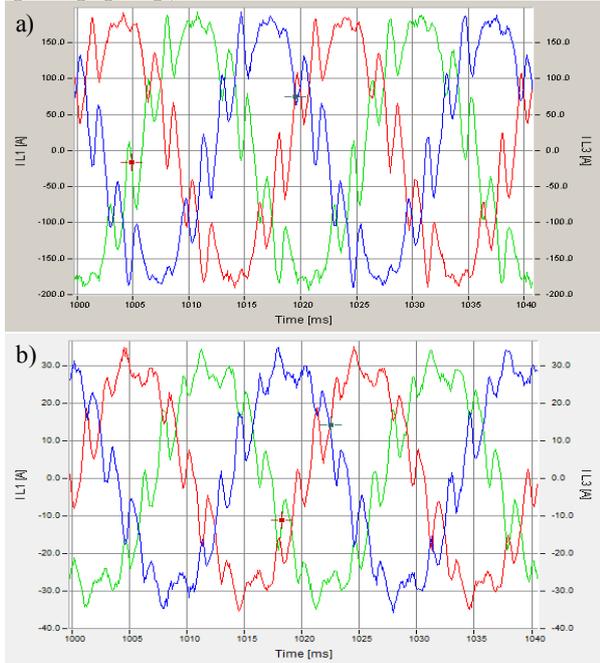


Рис. 9. Мгновенные токи трансформатора со стороны 15 кВ (a) и со стороны 110 кВ (b)

Конечно, гармоники токов и, как следствие, коэффициент искажения тока, являются значительно меньшими со стороны 110 кВ, чем со стороны 15 кВ. В связи с этим их влияние на питающую сеть, а особенно на искажение напряжения в сети 110 кВ будет меньше.

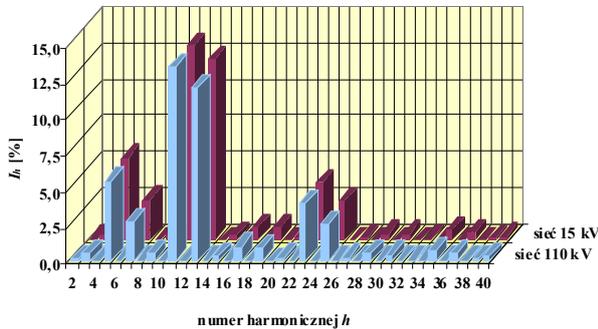


Рис. 10. Сравнение относительных значений высших гармоник тока с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ

На рис. 11 показано изменение коэффициента искажения напряжения в сети 15 кВ. Пре-

вышение допустимого значения  $THD_U$  (8%), имеет место практически на протяжении всего периода измерения во всех фазах.

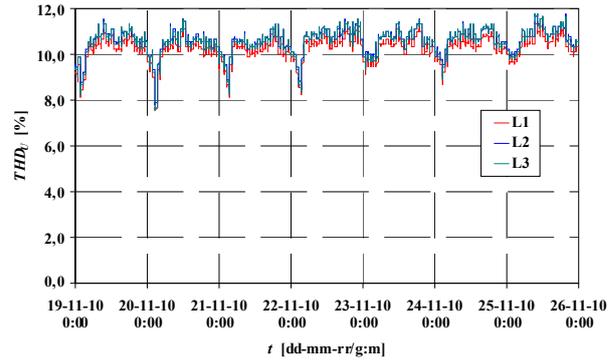


Рис. 11. Изменение  $THD_U$  трех фазных напряжений со стороны 15 кВ в период измерения

Из сравнения изменения фазных напряжений с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ, показанного на рис. 12, а также из сравнения относительных значений высших гармоник этих напряжений (рис. 13) можно сделать однозначный вывод, что фазные напряжения в сетях 15 кВ и 110 кВ отличаются как уровнем искажения, так и составом частотного спектра высших гармоник.

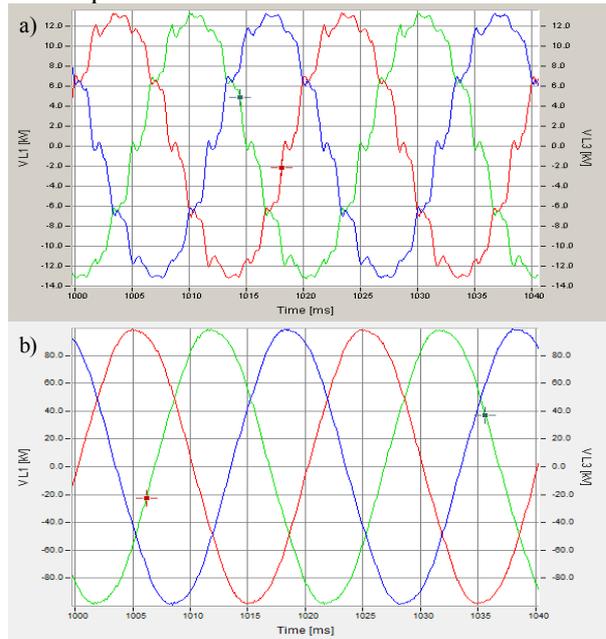


Рис. 12. Изменения фазных напряжений со стороны 15 кВ (a) и со стороны 110 кВ (b) трансформатора

Из сравнения рис. 10 и 13 можно сделать вывод, что искажение напряжения со стороны 15 кВ, вызвано тяговой нагрузкой, поскольку напряжения и токи имеет идентичный состав высших гармоник и в обеих величинах (токов и напряжений) доминируют те же высшие гармоники, характерные для 12-импульсных преобразователей. Совсем другая ситуация возникает в сети 110 кВ. Доля высших гармоник, вызван-

ных тяговой нагрузкой, является почти незаметной в частотном спектре напряжения, в свою очередь существенное значение имеют 3-я, 5-я и 7-я гармоники, которые являются так называемым фоном искажения, вызванного влиянием многих различных потребителей сети 110 кВ.

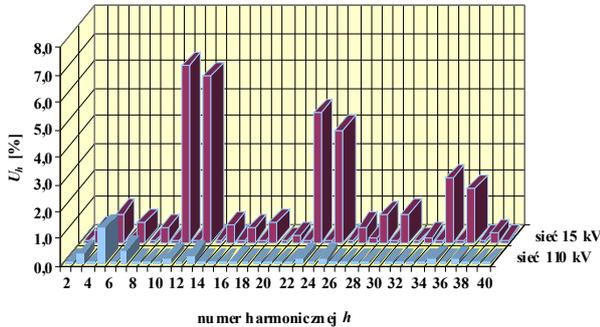


Рис. 13. Сравнение высших гармоник напряжения с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ

**Выводы**

Из проведенных измерений следует, что в рассматриваемом случае искажение напряжения на шинах распределительной подстанции 15 кВ (которое характеризуется коэффициентом искажения фазных напряжений  $THD_U$ ) на протяжении всего периода измерений превышает показатели, допускаемые [1, 2] (табл. 3, а также рис. 11). В связи с этим не допускается питание от этой сети других потребителей.

Кроме того, на основе представленных выше исследований можно утверждать, что:

1. Высшие гармоники тока передаются через трансформатор из сети 15 кВ в сеть 110 кВ с сохранением практически таких же соотношений между отдельными гармониками и основной гармоникой. Это обеспечивает сохранение формы мгновенных токов с обеих сторон трансформатора.

2. В сети 15 кВ существует четкая корреляция между высшими гармониками напряжения и тока, где в напряжении доминируют 11-я, 13-я, 23-я и 25-я гармоники, которые характерны для 12-пульсных тяговых преобразователей. Следо-

вательно, тяговая нагрузка является основной причиной искажения напряжения в сети 15 кВ.

В сети 110 кВ отсутствует корреляция между высшими гармониками напряжения и тока. В токе доминируют 11-я, 13-я, 23-я и 25-я гармоники, в свою очередь, в напряжении наибольшие значения имеют 3-я, 5-я и 7-я гармоники, причиной которых являются потребители, которые находятся вне исследуемой подстанции.

**REFERENCES**

1. Brociek W., Wilanowicz R., Higher harmonics and voltage flickers estimation In transformer station supplying nonlinear load with 12-pulse converter, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 78 (2005), nr 2, s. 29-32.
2. Dzienis W., Badanie jakości energii elektrycznej na szynach zbiorczych SN w podstacjach trakcyjnych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2010, nr 27, s. 49-54.
3. Skliński R., Dzienis W., Obliczanie odkształcenia prądu i napięcia na szynach zbiorczych SN podstacji trakcyjnych z 12-pulsowymi zespołami prostownikowymi, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2010. nr 8, s. 3-9.
4. EN 61000-4-30: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and Measuring Techniques - Power Quality Measurement Methods.
5. EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
6. Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku, w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw nr 93 z dnia 29 maja 2007 r., poz. 623.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 1997. – 60 с.
8. Zhezhelenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Sayenko Y.L. Electromagnetic compatibility in electric power supply systems. – Textbook for institution of higher education. 2nd edition. – D.: National Mining University, 2013. – 239 p.

Поступила в печать 17.09.2014.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

Электрическая тяга является типичным потребителем, который создает помехи в питающей сети в виде искажений токов и напряжений. В статье представлен анализ результатов измерений высших гармоник тока и напряжения, выполненных на шинах 110 кВ и 15 кВ распределительной подстанции. Проведено исследование распределения высших гармоник между сетями 15 и 110 кВ, после выполнения которого можно сделать вывод, что искажения напряжения со стороны 15 кВ вызвано тяговой нагрузкой, а конкретно высшими гармониками, характерными для 12-импульсных преобразователей. В свою очередь, в сети 110 кВ токи и напряжения не имеют идентичный состав высших гармоник, что говорит о искажениях, связанных с потребителями, которые находятся вне исследуемой подстанции. Справедливость полученных выводов аргументируется графиком сравнения высших гармоник тока и напряжения с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ, на котором отображается доминирование высших гармоник определенного порядка в зависимости от фактора, влияющего на ток и напряжение.

**Ключевые слова:** тяговая нагрузка, качество электрической энергии, ток, напряжение, высшие гармоники.

УДК 621.311

Р. ПАВЕЛЕК (ЛОДЗИНСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, ПОЛЬЩА),  
Ю. Л. САЄНКО(ПДТУ, УКРАЇНА)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»,  
вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, ел. пошта: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru)

## ВПЛИВ ТЯГОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Електрична тяга є типовим споживачем, який створює перешкоди в мережі живлення у вигляді спотворень струмів і напруг. У статті представлено аналіз результатів вимірювань вищих гармонік струму і напруги, виконаних на шинах 110 кВ і 15 кВ розподільчої підстанції. Проведено дослідження розподілу вищих гармонік між мережами 15 і 110 кВ, після виконання якого можна зробити висновок, що спотворення напруги з боку 15 кВ викликано тяговим навантаженням, а конкретно вищими гармоніками, характерними для 12-імпульсних перетворювачів. У свою чергу, в мережі 110 кВ струми і напруги не мають ідентичний склад вищих гармонік, що говорить про спотворення, пов'язані з споживачами, які знаходяться поза досліджуваною підстанцією. Справедливість отриманих висновків аргументується графіком порівняння вищих гармонік струму і напруги з обох сторін трансформатора 110/15 кВ, на якому відображується домінування вищих гармонік певного порядку в залежності від фактора, що впливає на струм і напругу.

**Ключові слова:** тягове навантаження, якість електричної енергії, струм, напруга, вищі гармоніки.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.311

R. PAVELEK (LODZ TECHNICAL UNIVERSITY, POLAND),  
YU. L. SAENKO (ASTU, UKRAINE)

State higher education institution «Azov State Technical University», 7 Universitetskaya Street, Mariupol, Ukraine, 87500, tel.: (0629) 44-65-51, e-mail: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru)

## THE INFLUENCE OF TRACTION LOADS ON THE POWER SUPPLY SYSTEMS

Electric traction is typical consumer who creates obstacles in the power supply in the form of distortion of currents and voltages. The paper presents the analysis of the results of measurements of higher harmonics of current and voltage performed on 110 kV and 15 kV distribution substation. A study of the distribution networks of higher harmonics between 15 and 110 kV, after executing it can be concluded that the distortion of the voltage 15 kV traction caused by stress, specifically higher harmonics characteristic of 12-pulse converters. In turn, the network 110 kV voltage and currents have identical composition of higher harmonics, which indicates the distortion associated with consumers beyond the investigated stations. The validity of these findings and discusses the schedule comparison of higher harmonics of current and voltage on both sides of the transformer 110/15 kV, which displayed the dominance of higher harmonics particular order, depending on the factors affecting the current and voltage.

**Keywords:** traction load, power quality, current, voltage, higher harmonics.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*