

УДК 658.26

Л.И. Коверникова<sup>1</sup>, В.Ч. Льюнг<sup>2</sup>, В.К. Нго<sup>2</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ГАРМОНИК В УЗЛЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА К ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

<sup>1</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет

В связи с увеличением количества и мощности нелинейных нагрузок, для современных электротехнических комплексов актуальными являются вопросы снижения несинусоидальности токов и напряжений. Статья посвящена анализу гармоник активных мощностей, токов и напряжений в точке присоединения к питающей сети целлюлозно-бумажного комбината, представляющего мощную нелинейную нагрузку. Представлена характеристика целлюлозно-бумажного комбината, описан график нагрузки, построены графики фазных напряжений. Для режимов максимальных и минимальных нагрузок получены осциллограммы напряжений и токов. Установлено, что суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает нормативное значение только в одной фазе. Формы кривых фазных токов сильно искажены в ночное время. Фазовые углы гармоник напряжений и токов лежат в диапазоне от 0 до 360°, но по квадрантам комплексной плоскости распределены неравномерно. Форма распределения большинства гармоник напряжения и тока представляет собой смесь различных законов распределения. Выполнен анализ активных мощностей гармоник. Результаты показали, что наибольшие значения имеют активные мощности гармоник, соответствующие каноническим гармоникам нелинейного оборудования.

**Ключевые слова:** гармоники напряжения, гармоники тока, несимметрия, несинусоидальные режимы, фазовый угол.

### 1. Введение

Нелинейные нагрузки являются причиной несинусоидальных режимов в электрических сетях. Несинусоидальные токи и напряжения, содержащие синусоидальные составляющие частот, кратных основной частоте 50 Гц (гармоники), вызывают ущерб, как у потребителей электрической энергии, так и у энергоснабжающих организаций, что отражено в большом количестве публикаций. Например, в [1] речь идет о дополнительных потерях активной мощности на гармониках в электрических сетях и оборудовании. Активная энергия гармоник не выполняет полезной работы, поэтому происходит бесполезная трата электрической энергии, что противостоит

речит поставленной задаче энергосбережения [2]. В [3] ставятся вопросы финансовых потерь потребителей и энергоснабжающих организаций при оплате счетов за электрическую энергию, поскольку счетчики электрической энергии измеряют активную энергию не только первой гармоники, но и других, в том числе, активную энергию гармоник, источниками которых они не являются. Результаты измерений в сетях низкого и среднего напряжения представлены в хорошо известных публикациях [4-8]. Их авторы представляют результаты исследований режимов гармоник в сетях с различными типами нагрузок.

В последнее десятилетие продолжают интенсивные измерения параметров гармоник, что объясняется широким использованием нелинейного электронного оборудования и увеличением величин гармоник напряжений и токов в сетях. Например, авторы представляют: в [9] результаты измерений в узлах сети, питающей нагрузки ретрансляционной станции телевидения; в [10] результаты измерений параметров гармоник, которые генерируют энергосберегающие лампы; в [11] гармоники, измеренные в медицинском центре, и их влияние на медицинское оборудование; в [12] результаты масштабных измерений показателей качества электрической энергии в сетях 110 кВ Сибири, которая охватывает 23% территории России; в [13] результаты исследований измеренных параметров гармоник сложных нагрузок, присоединенных к узлам сетей 110-220 кВ; в [14] результаты анализа активных и реактивных мощностей гармоник нелинейных нагрузок, присоединенных к узлам сетей 110-220 кВ. Во многих случаях уровни гармоник напряжения превышают нормы, установленные в стандарте [15]. В [16] указывается, что 5,4% стоимости потерь из-за низкого качества электрической энергии приходится на потери, вызываемые гармониками тока и напряжения.

Хотя исследования параметров режимов гармоник в электрических сетях проводят много лет, интерес к этой проблеме не уменьшается из-за увеличивающегося количества нелинейных нагрузок в сетях различных напряжений и особенностей их режимов. Главная особенность состоит в вероятностном характере параметров режимов гармоник.

В данной статье представлены результаты анализа гармоник токов, напряжений и активных мощностей в узле присоединения к питающей сети 220 кВ мощной нелинейной нагрузки – целлюлозно-бумажного комбината. Измерения параметров режима были выполнены в фазах *A*, *B*, *C* сети в течение 24 час с интервалом времени 1 мин. После обработки измеренной информации получены ряды напряжений, токов и их фазовых углов для гармоник от 1 до 40, имеющие по 1440 элементов.

Гармоники токов, которые генерирует комбинат, текут в питающую сеть и становятся причиной искажения напряжений в узлах сети.

Комбинат расположен в регионе, в котором к сети 220 кВ присоединено большое количество других предприятий большой мощности, являющихся источниками гармоник – тяговые подстанции, алюминиевые заводы и т.д. Их гармоники токов также распространяются по сети 220 кВ и участвуют в формировании параметров режимов гармоник. Следовательно, напряжения в узлах электрической сети являются результатом влияния множества нелинейных нагрузок. В каждом узле сети несинусоидальное напряжение является уникальным, поскольку определяется гармониками токов, притекающих в узел от всех нелинейных нагрузок сети, и сопротивлением узла сети.

## II. Характеристика целлюлозно-бумажного комбината

Комбинат получает электрическую энергию из сети 220 кВ. На комбинате используются электродвигатели постоянного тока с системой автоматического регулирования скорости, которые приводят в действие основное технологическое оборудование. Мощности двигателей достигают 300 кВт. Для их питания постоянным током применяют тиристорные преобразователи, имеющие нелинейные вольт-амперные характеристики.

На рис. 1 представлены графики токов 1-ой гармоники нагрузки комбината для трех фаз. Предприятие имеет сменный график работы, поэтому режим максимальных нагрузок бывает в дневное время, а режим минимальных нагрузок в ночное, что хорошо видно из графиков.

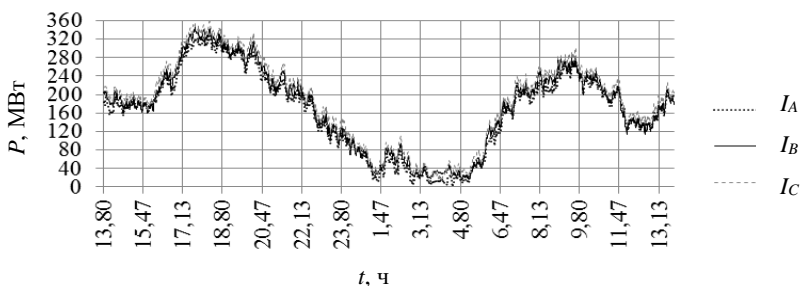


Рис. 1. Фазные токи в узле присоединения комбината

На рис. 2 приведены графики фазных напряжений в узле присоединения комбината к питающей сети. Величины напряжений находятся в допустимых пределах. Имеется несимметрия фазных напряжений.

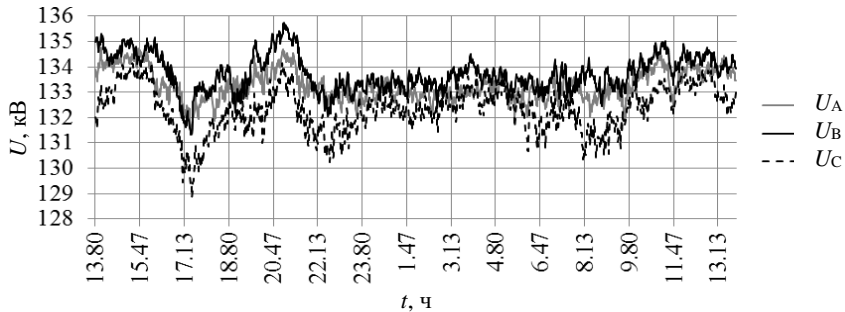


Рис. 2. Фазные напряжения в узле присоединения комбината

### III. Анализ напряжений в узле присоединения комбината к питающей сети

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжений трех фаз в режимах максимальных и минимальных нагрузок. Формы кривых напряжений в обоих режимах незначительно отличаются от синусоидальных, что подтверждают величины суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения.

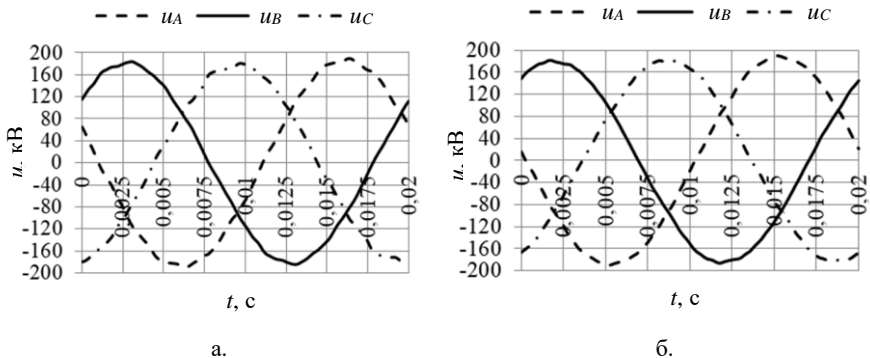


Рис. 3. Осциллограммы напряжений в режимах:  
а) максимальных; б) минимальных нагрузок

В режиме максимальных нагрузок в фазах *A*, *B* и *C* для 95% времени измерений они соответственно равны – 1,76%, 1,31%, 2,13%; в режиме минимальных нагрузок – 1,23%, 1,10%, 1,25%. Нормативное значение 2%, установленное в [15], превышено в фазе *C* в режиме максимальных нагрузок. Имеется также несимметрия фазных напряжений. Максимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной

последовательности, зафиксированное за время измерений, оказалось равным равно 1,3% при норме 2% [15].

Анализ величин гармоник напряжений показал, что некоторые из них достигают больших значений. На рис. 4 представлена диаграмма действующих значений гармоник напряжений, имеющих наибольшие значения, в режимах максимальных ( $U_{\max}$ ) и минимальных ( $U_{\min}$ ) нагрузок.

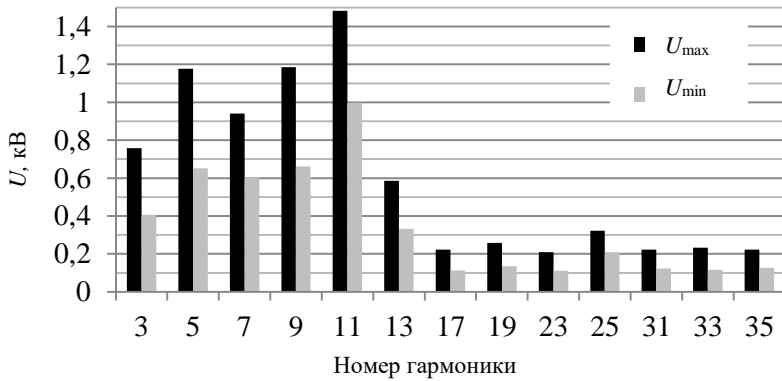


Рис. 4. Диаграмма величин гармоник напряжений

В процессе анализа измеренной информации выполнен анализ фазовых углов для десяти гармоник напряжения. Получено, что фазовые углы располагаются в диапазоне от 0 до 360°, но распределены неравномерно. Особенности распределения имеют фазовые углы 5 и 11-ой гармоник напряжения, приведенные на рис. 5. Подавляющее число фазовых углов 5-ой гармоники напряжения имеют величины от 90 до 270°.

При анализе рядов измеренных величин гармоник напряжений были вычислены статистические параметры [17]: максимальное значение (макс), минимальное значение (мин), математическое ожидание (сред), стандартное отклонение (ст. откл.) Результаты статистического анализа для десяти нечетных гармоник напряжения одной фазы, на которых чаще всего в узлах сети превышены нормы [15], приведены в табл. 1. Из приведенных данных видно, что величины гармоник напряжения изменяются в диапазоне от нескольких вольт до нескольких киловольт.

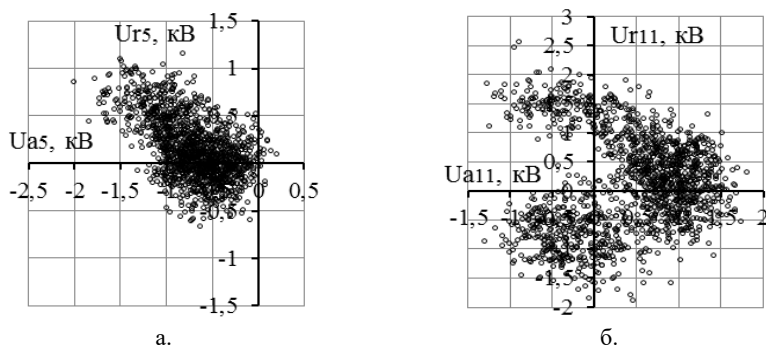


Рис. 5. Диаграммы фазовых углов гармоник напряжения:  
а) 5-ой; б) 11-ой

Таблица 1.  
Статистические оценки гармоник напряжения фазы А, кВ

Параметр	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
макс	1,18	2,18	1,61	1,94	2,73	1,08	0,45	0,48	0,50	0,57
мин	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
сред	0,49	0,79	0,68	0,79	1,09	0,39	0,14	0,17	0,14	0,23
ст. откл	0,24	0,38	0,25	0,37	0,38	0,18	0,08	0,09	0,07	0,09

Для измеренных рядов величин десяти гармоник напряжения, приведенных в табл. 1, были построены гистограммы. Затем с помощью критерия Пирсона сделана их проверка на соответствие законам распределения Гаусса и Рэлея. Цель проверки состояла в том, чтобы подтвердить или опровергнуть утверждение авторов [7] о распределениях параметров режимов гармоник в большинстве случаев в соответствии с законами Гаусса или Рэлея. Проверка показала, что из десяти гармоник распределение Гаусса имеют 11-я и 25-я гармоники напряжения. Распределению Рэлея подчиняются измеренные напряжения 19-ой гармоники. Гистограммы остальных семи гармоник имеют формы, представляющие смеси известных распределений [17, 19, 20]. На рис. 6 приведены гистограммы и теоретические кривые распределений 11-ой гармоники напряжения по закону Гаусса и 19-ой по закону Рэлея.

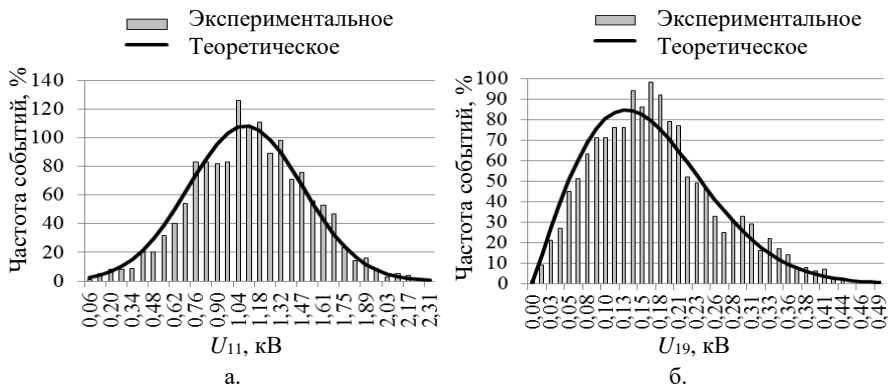


Рис. 6. Распределения величин гармоник напряжения:  
а) 11-ой по закону Гаусса; б) 19-ой по закону Рэля

#### IV. Анализ токов в узле присоединения комбината к питающей сети

На рис. 7 приведены осциллограммы токов для режимов максимальной и минимальной нагрузок предприятия. В минимальном режиме кривые токов очень сильно искажены.

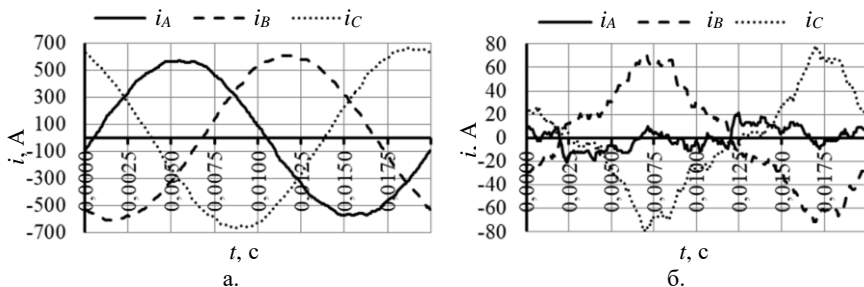


Рис. 7. Осциллограммы токов в режимах:  
а) максимальных; б) минимальных нагрузок

Изменения величин суммарного коэффициента гармонических составляющих тока:

$$K_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2} / I_1 \cdot 100\%, \quad (1)$$

приведены на рис. 8. Значения  $K_I$  при минимальных нагрузках в ночное время достигают нескольких сотен процентов. В дневное время в режиме

максимальных нагрузок, когда работает основное технологическое оборудование, величина  $K_I$  не превышает 6%.

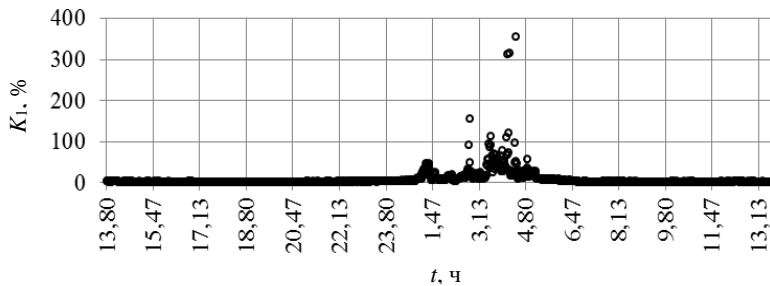


Рис. 8. Точечная диаграмма  $K_I$

На графике хорошо видна группа коэффициентов, значительно превышающая по величине остальные. Это так называемые выбросы или аномальные элементы [17, 18], которые нарушают стационарность рядов. Аномальные элементы не всегда и не везде можно определить визуально. Для их поиска в ряду измеренных параметров применяют специальные тесты и методы: метод Ирвина [21], тест фон Нейманна [22], критерий Дарлинга [23] и др. Проверка 3-ей гармоники тока с помощью метода Ирвина показала, что в массиве 3-ей гармоники тока имеется 4 элемента, а именно, 862, 865, 867 и 881, которые по величине значительно превышают остальные элементы. На рис. 9 приведен точечный график 3-ей гармоники тока, на котором видны аномальные элементы.

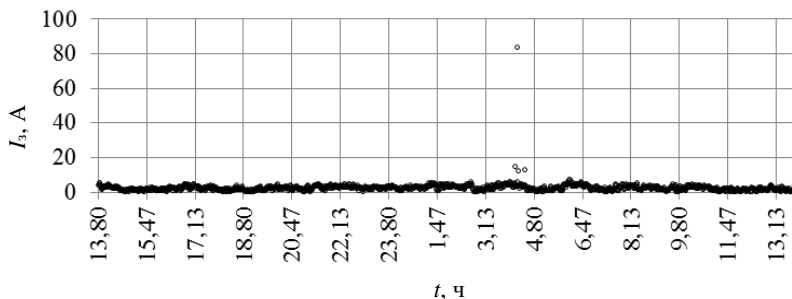


Рис. 9. Аномальные элементы 3-ей гармоники тока

На других гармониках также имеются аномальные величины токов. Анализ показал, что ток 1-ой гармоники с аномальными элементами имел величины менее 6,5 А. В момент времени,



соответствующий замеру 865, величина тока 1-ой гармоники составляла 5,2 А. Анормальные элементы искажают реальную картину режима, поэтому во многих случаях они должны быть исключены.

При анализе была выполнена статистическая оценка величин гармоник тока фазы А десяти нечетных гармоник, величины напряжений которых чаще всего превышают установленные в [15] нормы. Результаты вычислений приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что величины гармоник тока изменяются в широком диапазоне. Сравнение максимальных и минимальных значений и стандартных отклонений свидетельствует об их большом разбросе.

Таблица 2.  
Статистические оценки гармоник тока фазы А, А

Параметр	Гармоника									
	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
макс	15,12	3,11	4,65	1,94	6,01	4,37	2,34	1,75	2,14	4,68
мин	0,07	0,02	0,07	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01
сред	2,56	1,00	1,17	0,73	2,13	1,18	0,36	0,39	0,70	1,06
ст. откл.	2,51	0,78	0,95	0,43	1,17	0,67	0,27	0,35	0,40	0,63

Для анализа величин фазовых углов гармоник тока на комплексной плоскости были построены точечные диаграммы (рис. 10). Из анализа диаграмм можно сделать вывод, что фазовые узлы лежат в диапазоне от 0 до 360°, но распределены по квадрантам комплексной плоскости неравномерно, как, например, на диаграммах рис. 10, б и 10, в.

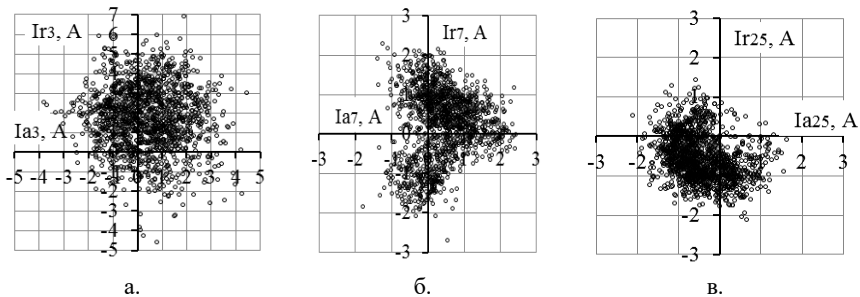


Рис. 10. Диаграммы фазовых углов гармоник токов:  
а) 3-ей; б) 7-ой; в) 25-ой

Активные и реактивные составляющие гармоник тока были вычислены по выражениям  $I_{an} = I_n \cdot \cos\varphi_n$ ,  $I_{rn} = I_n \cdot \sin\varphi_n$  для всех 1440 замеров. Затем были построены гистограммы распределения величин активных и реактивных составляющих гармоник токов и выполнена их проверка по критерию Пирсона на соответствие распределений законам Гаусса и Рэля. Оказалось, что активная составляющая 3-ей гармоники тока распределена по закону Гаусса (рис. 11, а), а для реактивной составляющей распределение закону Гаусса проверкой по критерию Пирсона не подтвердилось (рис. 11, б).

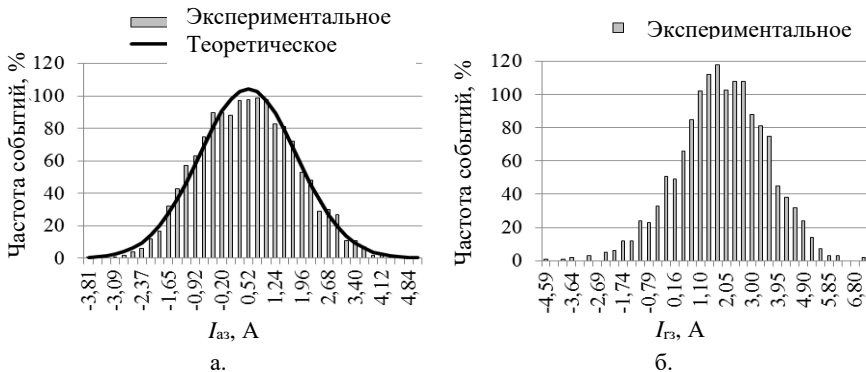


Рис. 11. Распределения величин 3-ей гармоники токов:  
а) активного; б) реактивного

В табл. 3 приведены результаты анализа законов распределения для десяти нечетных гармоник: модуля тока, активной и реактивной составляющих. В таблице обозначено: Г – закон распределения Гаусса, С – смесь нескольких законов распределения. Только на 7-й и 13-ой гармониках все три величины анализируемых токов распределены по закону Гаусса. На 5, 17 и 23-ей гармониках все три тока имеют смеси различных законов распределения. На 3, 9, 11, 19 и 25-ой гармониках одна или две из трех величин распределены по закону Гаусса, а остальные имеют смеси различных законов распределения.

Таблица 3.  
Законы распределения гармоник токов

$n$	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
$I_n$	С	С	Г	С	Г	Г	С	С	С	Г
$I_{an}$	Г	С	Г	Г	С	Г	С	Г	С	С
$I_{rn}$	С	С	Г	Г	С	Г	С	С	С	С

Для оценки влияния гармоник токов, протекающих через узел присоединения, на гармоники напряжения были вычислены коэффициенты линейной корреляции ( $r_{Un}, I_n$ ) для одной фазы [17]. Они приведены в табл. 4.

Таблица 4.  
Коэффициенты  $r_{Un}, I_n$  для фазы А

$n$	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
$r_{Un}, I_n$	0,29	0,34	- 0,07	0,51	0,43	0,43	0,16	0,22	0,55	0,31

Для оценки тесноты линейной связи между гармониками тока и напряжения использовалась шкала Чеддока [24]. В результате анализа установлены следующие степени силы корреляции: отсутствует ( $r_{Un}, I_{nc} = 0 - 0,1$ ) на 7-ой гармонике, слабая ( $r_{Un}, I_{nc} = 0,1 - 0,3$ ) на 3, 17 и 19-ой гармониках, умеренная ( $r_{Un}, I_{nc} = 0,3 - 0,5$ ) – на 5, 11, 13, 25 – ой гармониках. Сильной связи, соответствующей шкале Чеддока, не выявлено, поэтому можно сделать вывод, что в формирование гармоник напряжений в узле сети, к которой присоединен комбинат, большой вклад делают также нелинейные нагрузки, присоединенные к другим узлам этой же сети.

#### V. Анализ активных мощностей гармоник в узле присоединения комбината к питающей сети

Активные мощности на любой гармонике вычислялись как:

$$P_{nt} = U_{nt} \cdot I_{nt} \cdot \cos \varphi_{nt}, \quad (2)$$

где  $U_{nt}, I_{nt}$  – действующие значения напряжения и тока  $n$ -ой гармоники, измеренные на интервале 1 минута,  $t$  – номер интервала измерения,  $\varphi_{nt}$  – фазовый угол между векторами напряжения и тока  $n$ -ой гармоники на интервале измерения  $t$ , который вычисляется как  $\varphi_{nt} = \varphi_{U_{nt}} - \varphi_{I_{nt}}$ .

На рис. 12 приведен график активной мощности 1-ой гармоники. Максимальное значение мощности достигало 42.91 МВт, минимальное – 0,2 МВт. Величины углов  $\varphi_{nt}$  позволяют сделать вывод о направлениях потоков активных мощностей относительно узла, в котором произведены измерения. Если углы  $\varphi_{nt}$  лежат в диапазонах от 0 до  $\pi/2$  или от  $3\pi/2$  до  $2\pi$ , то активные мощности гармоник текут из сети в нагрузку, а узел для  $n$ -ой гармоники является нагрузочным. Если углы  $\varphi_{nt}$  лежат в диапазоне от  $\pi/2$  до  $3\pi/2$ , то активные мощности направлены из нагрузки в сеть, а узел для  $n$ -ой гармоники является генерирующим. Углы  $\varphi_{nt}$  чаще всего лежат в диапазоне от 0 до  $2\pi$ , но для некоторых гармоник они распределены на ком-

плексной плоскости очень неравномерно. На рис. 13 приведен пример диаграммы распределения углов  $\varphi_{n1}$  3-ей гармоники. Одну часть времени измерения активные мощности 3-ей гармоники текли из сети в нагрузку комбината, а другую часть времени из нагрузки комбината в сеть.

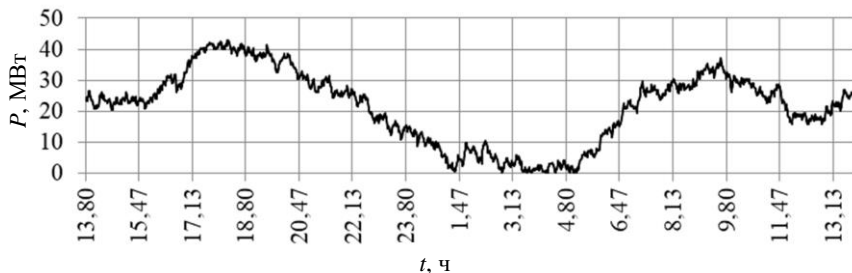


Рис. 12. График активной мощности 1-ой гармоники комбината

С помощью измеренных токов, напряжений и углов сдвига фаз между ними были вычислены активные мощности гармоник от 2 до 40. Установлено, что направления потоков активных мощностей для всех гармоник в течение времени измерений изменяются. Но, для одних гармоник преобладающим, т.е. более 50% времени измерений, является направление из нагрузки в сеть, для других – из сети в нагрузку.

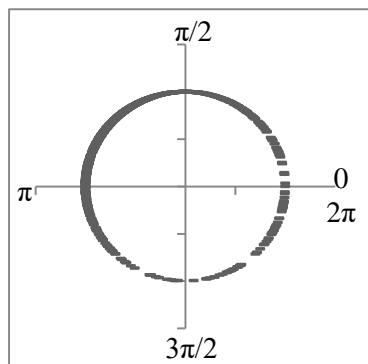


Рис. 13. Распределение углов  $\varphi_{n1}$  3-ей гармоники

На рис. 14 приведена диаграмма, показывающая количество времени протекания потоков активных мощностей гармоник через узел присоединения комбината к питающей сети из сети в нагрузку и наоборот. На диаграмме активные мощности гармоник со знаком «минус» ( $P_{n(-)}$ ) направ-

лены из нагрузки в сеть, а со знаком «плюс» ( $P_{n(+)}$ ) – из сети в нагрузку. Из диаграммы хорошо видно, что преобладают направления мощностей из сети в нагрузку.



Рис. 14. Диаграмма направлений активных мощностей гармоник

Величины активных мощностей четных гармоник в обоих направлениях очень малы и не превышают 0,1 кВт. Значительные потоки активных мощностей в обоих направлениях имеют место на некоторых нечетных гармониках. Статистические характеристики активных мощностей гармоник приведены в табл. 5. В узле присоединения комбината имеет большую величину активная мощность 3-ей гармоники, направленная в сеть. А из сети в нагрузку комбината течет большая по величине активная мощность 11-ой гармоники. Величины мощностей нечетных гармоник, которые не приведены в табл. 5, не превышают 0,2 кВт.

Таблица 5  
Статистические оценки  $P_{n(-)}$  и  $P_{n(+)}$ , кВт

$n$	$P_{n(-)}$				$P_{n(+)}$			
	макс	мин	сред	ст.откл	макс	мин	сред	ст.откл
3	11,5	0,0	0,8	0,7	1,7	0,0	0,2	0,2
5	1,0	0,0	0,2	0,1	17,3	0,0	0,4	0,7
7	1,9	0,0	0,4	0,4	1,8	0,0	0,6	0,3
9	1,0	0,0	0,2	0,1	2,2	0,0	0,3	0,2
11	0,2	0,0	0,1	0,1	25,2	0,0	22,0	1,5
23	0,2	0,0	0,0	0,0	8,7	0,0	0,5	0,4

При питании от источника с синусоидальным напряжением в нагрузку комбината поступает поток активной мощности 1-ой гармоники  $P_{1(+)}$ . Большая часть этой мощности потребляется электрооборудованием для выполнения полезной работы  $P_w$ . Остальная преобразуется нелиней-

ным оборудованием в активные мощности гармоник порядков  $n > 1$ . Обозначим эти мощности как  $P_{n(-)}$ . Активная мощность 1-ой гармоники может быть представлена как:

$$P_{1(+)} = P_W + P_{n(-)}. \quad (3)$$

Вместе с активной мощностью 1-ой гармоники из сети в нагрузку комбината поступают активные мощности порядков  $n > 1 - P_{n(+)}$ , которые создаются нелинейными нагрузками, присоединенными к другим узлам питающей сети. Номера гармоник  $P_{n(-)}$  и  $P_{n(+)}$  могут быть разными. Таким образом, через узел присоединения комбината в нагрузку течет поток активных мощностей:

$$P = P_{1(+)} + P_{n(+)}. \quad (4)$$

Суммарная активная мощность гармоник порядков  $n > 1$ , т.е. вредная мощность, как она названа в [3], определяется как:

$$P_{dn} = P_{n(-)} + P_{n(+)}. \quad (5)$$

По полученному выражению были вычислены суммарные значения  $P_{dt}$  с учетом гармоник от 2 до 40 для всех 1440 замеров. В табл. 6 приведены статистические оценки  $P_{dt}$  в единицах измерения активной мощности и в процентах от полезной мощности  $P_{Wt}$ . Максимальные величины очень сильно отличаются от средних значений. Анализ массивов  $P_{dt}$ , состоящих из 1440 элементов, показал, что среди них имеется несколько аномальных элементов, которые по величине в разы превосходят остальные элементы массива. Они дают максимальные значения мощностей. Аномальные элементы не были исключены, так как учитываются счетчиками при измерении электрической энергии. Из приведенных данных также следует, что доля вредной активной мощности, протекающей через узел присоединения комбината к сети, не велика по сравнению с полезной активной мощностью. Вместе с тем, необходимо обратить внимание, что здесь представлены результаты расчетов только для 24 часов одной фазы электрической сети комбината.

Таблица 6  
Статистические оценки  $P_{dt}$

Параметр	$P_{dt}$ , кВт	$P_{dt}$ , % $P_{Wt}$
макс	17,25	6,59
ст. откл	4,92	0,08

## VI. Выводы

1. Величины фазных напряжений в узле присоединения комбината в процессе измерений находились в допустимых пределах, имеют незначительные несимметрию и искажение форм кривой фазных напряжений. Суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает нормативное значение только в фазе С. Величины гармоник напряжения находятся в диапазоне от нескольких вольт до нескольких киловольт. Для большинства гармоник они имеют распределения, представляющие собой смеси различных законов распределения. Только напряжения 11 и 25-ой гармоник распределены по закону Гаусса, а 19-ой по закону Рэлея. Фазовые углы гармоник напряжений и токов лежат в диапазоне от 0 до  $360^\circ$ , но по квадратам комплексной плоскости распределены неравномерно.

2. Фазные токи, потребляемые нагрузкой целлюлозно-бумажного комбината, в течение суток изменяются. Они имеют наибольшие значения в дневные часы и наименьшие – в ночные, когда формы кривых фазных токов сильно искажены. Величины суммарного коэффициента гармоник фазных токов в период работы основного технологического оборудования не превышают 6%. В массивах гармоник токов имеются аномальные элементы, значительно превосходящие по величине остальные элементы. Фазовые углы гармоник токов лежат в диапазоне от 0 до  $360^\circ$ , но распределены не равномерно. Незначительное количество модулей действующих значений гармоник токов и их активных и реактивных составляющих распределены по закону Гаусса. Подавляющее большинство имеют форму распределения, представляющую собой смеси различных законов распределения.

3. Величины коэффициентов линейной корреляции между гармониками напряжений узла и токов нагрузки целлюлозно-бумажного комбината свидетельствуют о том, что на формирование гармоник напряжений оказывают влияние нелинейные нагрузки, присоединенные к другим узлам сети.

4. Активные мощности гармоник, протекающие через узел присоединения целлюлозно-бумажного комбината к питающей сети, в течение 24 часов времени измерений меняют направление протекания. Одну часть времени они направлены из нагрузки комбината в питающую сеть, а другую – из сети в нагрузку. Величины активных мощностей гармоник лежат в диапазоне от нескольких ватт до нескольких десятков киловатт. Наибольшие значения имеют активные мощности гармоник, являющиеся каноническими гармоникам нелинейного оборудования.

**Библиографический список**

- [1] Zhezhenlenko I.V., Sayenko Y.L. Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems // X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, June 15-18, 2010, Łagów, Poland. С. 98-105.
- [2] Федеральный закон Российской Федерации от 32.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
- [3] Czarnecki L.S. Working, reflected and detrimental active powers // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. № 1. С. 1-7.
- [4] Тимофеев Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. М.: Энергия, 1972.
- [5] Emanuel A.E., Orr J.A., Cyganski D., Gulachenski E.M. A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus // IEEE Trans. on Power Delivery. 1993. № 8 (1). С. 411-421.
- [6] Chung-Hsing H., Chi-Jui W., Shih-Shong Y., Yu-Wu C., Bor-An W., Jan-San H. Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in Northern Taiwan // IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, № 12 (3), С. 1275-1284.
- [7] Probabilistic Aspects Task Force of the Harmonics Working Group Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee. Time-varying harmonics: Part I – Characterizing measured data // IEEE Trans. on Power Delivery. 1998. № 13 (3). С. 938-944.
- [8] Nejdawi I.M., Emanuel A.E., Pileggi D.J., Corridori M.J., Archambeault R.D. Harmonics trend in USA: a preliminary survey // IEEE Trans. on Power Delivery. 1999. № 14 (4). С. 1488-1494.
- [9] Vasconcellos A.B., T.I. R. de C. Malheiro, Castillo B.C., A.T. da Silva, Festa A.V., Gomes F.L. Analysis of power quality in a system of relay TV // Proceedings of the 14-th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Sept. 26-29, 2010, Bergamo, Italy.
- [10] Фардиев И.Ш., Васильев Ю.А., Меер В.М. Энергосберегающие лампы и их влияние на электрическую сеть // Энергетика Татарстана. 2009. № 4 (16). С. 8-12.
- [11] Hartungi R., Jiang L. Investigation of power quality in health care facility // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2010. № 1 (8). С. 996-1004.
- [12] Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В., Литвак В.В., Мельников В.А., Погонин А.И., Харлов Н.Н. Опыт корпоративного обследования электрических сетей 110 кВ Сибири. Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 228 с.
- [13] Kovernikova L.I. Results of the research into the harmonics of loads connected to the nodes of high – voltage network // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2014. № 12. С. 553-558.
- [14] Kovernikova L.I. Research into harmonic power in the high-voltage networks // Renewable Energy & Power Quality Journal. 2016. № 1 (14). С. 696-701.



- [15] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
- [16] Targosz R., Chapman D. Application Note. Cost of poor power Quality. 2012. [Электронный ресурс]. URL: [www.leonardo-energy.org/node/141781/](http://www.leonardo-energy.org/node/141781/) (дата обращения 01.05.2018).
- [17] Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 816 с.
- [18] Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. – 598 с.
- [19] Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности: Справ. изд. М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
- [20] Королев В.Ю. EM – алгоритм, его модификации и их применение к задаче разделения смесей вероятностных распределений: Теоретический обзор. М.: ИРИ РАН, 2007. – 94 с.
- [21] Irwin J.O. On a criterion for the rejection of outlying observations // *Biometrika*, 1925. № 17 (3-4). С. 238-250.
- [22] Von Neumann J. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance // *Annals of mathematical statistics*. 1941. №. 13 (4). С. 367-395.
- [23] Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Новосибирск, 2011. – 888 с.
- [24] Сизова Т.М. Статистика: учебное пособие. С.-Пб.: СПб НИУ ИТМО, 2013. – 176 с.

**L.I. Kovernikova<sup>1</sup>, Liong Van Ching<sup>2</sup>, Ngo Van Kyong<sup>2</sup>**

## **FEATURES OF HARMONIC MODE PARAMETERS IN CONNECTION POINT OF PULP AND PAPER MILL TO ELECTRICAL NETWORK**

<sup>1</sup> Melentiev Energy Systems Institute

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** In connection with the increase in the number and power of non-linear loads for modern electrical systems, the issues of reducing the non-sinusoidality of currents and voltages are relevant. The article is devoted to the analysis of the harmonics of active power, currents and voltages at the point of connection to the power supply network of a pulp and paper mill, which represents a powerful non-linear load. A characteristic of a pulp and paper mill is presented, a load graph is described, and phase voltage plots are given. Oscillograms of voltages and currents were obtained for the modes of maximum and minimum loads. It is established that the total voltage harmonic coeffi-

cient exceeds the standard value in only one phase. The shapes of the phase current curves are strongly distorted at night. The phase angles of the harmonics of voltages and currents are in the range from 0 to 360 °, but unevenly distributed across the quadrants of the complex plane. The distribution form of most voltage and current harmonics is a mixture of different distribution laws. The analysis of active power harmonics is performed. The results of the analysis showed that the highest values of active harmonic powers correspond to the canonical harmonics of nonlinear equipment.

**Keywords:** asymmetry, current harmonics, non-sinusoidal modes, phase angle, voltage harmonics.

### References

- [1] I.V. Zhezhelenko and Y.L. Sayenko, «Electric losses, caused by high harmonics in electric power supply systems», in proc. X International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, June 15-18, 2010, Łagów, Poland. P. 98-105.
- [2] Federal Law of the Russian Federation No. 261-FZ of November 32, 2009 «On Energy Saving and Improving Energy Efficiency and Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation».
- [3] L.S. Czarnecki, «Working, reflected and detrimental active powers», IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, pp. 1-7, 2012.
- [4] D.V. Timofeev, Modes in electrical systems with traction loads. Second edition, revised and updated. Moscow: Energy, 1972.
- [5] A.E. Emanuel, J.A. Orr, D. Cyganski and E.M. Gulachenski, «A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp. 411-421, Jan. 1993.
- [6] H. Chung-Hsing, W. Chi-Jui, Y. Shih-Shong, C. Yu-Wu, W. Bor-An and H. Jan-San, «Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in Northern Taiwan», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 3, pp. 1275-1284, July 1997.
- [7] «Probabilistic aspects task force of the Harmonics working group subcommittee of the Transmission and Distribution Committee. Time – varying harmonics: Part I – Characterizing measured data», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 3, pp. 938-944, July 1998.
- [8] I.M. Nejdawi, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori and R.D. Archambeault, «Harmonics trend in USA: a preliminary survey», IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1488-1494, Oct. 1999.
- [9] A.B. Vasconcellos, T.I. R. de C. Malheiro, B.C. Castillo, A.T. da Silva and A.V. Festa, F.L. Gomes, «Analysis of power quality in a system of relay TV», in proc. 14 – th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Sept. 26-29, 2010, Bergamo, Italy.
- [10] I.Sh. Fardiev, Yu.A. Vasiliev and V.M. Meer, «Energy saving lamps and their impact on power quality of the supply network», Power industry of Tatarstan, vol. 4, pp. 8-12, 2009.
- [11] R. Hartungi and L. Jiang, «Investigation of power quality in health care facility», Renewable Energy and Power Quality Journal, no. 12, pp. 553-558, Apr. 2014.
- [12] V.S. Borovikov, M.V. Volkov, V.V. Ivanov, V.V. Litvak, V.A. Melnikov, A.I. Pogonin and N.N. Kharlov, Experience in corporate survey of 110 kV electrical

- networks in Siberia, Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2010.
- [13] L.I. Kovernikova, «Results of the research into the harmonics of loads connected to the nodes of high – voltage network», *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 8, pp. 996-1004, Apr. 2010.
- [14] L.I. Kovernikova, «Research into harmonic power in the high-voltage networks», *Renewable Energy & Power Quality Journal*, vol. 1, no. 14, pp. 696-701, May 2016.
- [15] *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, EN 50160 – 2010 ed3.0, July 2010.
- [16] R. Targosz and D. Chapman, Application Note. Cost of poor power Quality. [Online]. Available at: [www.leonardo-energy.org/node/141781/](http://www.leonardo-energy.org/node/141781/) [Accessed: May 1, 2018].
- [17] A.I. Kobzar, *Applied mathematical statistics. For engineers and scientists*. Moscow: FIZMATLIT, 2012.
- [18] L. Zaks, *Statistical Evaluation*. Moscow: Statistics, 1976.
- [19] S.A. Aivazyan, V.M. Buchstaber, I.S. Enyukov and L.D. Meshalkin, *Applied statistics: Classifications and reduction of dimension*. Moscow: Finance and Statistics, 1989.
- [20] V.Yu. Korolev, EM-algorithm, its modifications and their application to the problem of separation of mixtures of probability distributions: Theoretical review. Moscow: IRH RAS, 2007.
- [21] J.O. Irwin, «On a criterion for the rejection of outlying observations», *Biometrika*, vol. 17, no. 3-4, pp. 238-250, 1925.
- [22] J. Von Neumann, «Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance», *Annals of mathematical statistics*, vol. 13, pp. 367-395, 1941.
- [23] B.Yu. Lemesheko, S.B. Lemesheko, S.N. Postovalov and E.V. Chimitova, *Statistical analysis of data, modeling and investigation of probability laws. Computer approach*. Novosibirsk, 2011.
- [24] T.M. Sizov *Statistics: Tutorial*. St. Petersburg: ITMO University, 2013.