

## Активные мощности гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к сети высокого напряжения

КОВЕРНИКОВА Л.И.

*Представлены результаты анализа активных мощностей гармоник в узлах присоединения к питающей сети 220 кВ трех нелинейных нагрузок большой мощности: блока алюминиевого завода, целлюлозно-бумажного комбината и подстанции железной дороги. Основное технологическое электрооборудование предприятий является источником гармоник. Анализ выполнен на основе результатов измерений. По измеренным токам и напряжениям вычислены активные мощности гармоник от 2-й до 40-й. В результате анализа активных мощностей гармоник установлено, что их потоки направлены не только из нагрузки предприятий в питающую сеть, но и из сети в нагрузку. Значения активных мощностей гармоник в обоих направлениях изменяются от нескольких десятков ватт до нескольких десятков киловатт.*

**Ключевые слова:** питающая сеть, нелинейная нагрузка, качество электроэнергии, гармоники, измерения

Традиционные электроэнергетические системы проектируются для работы с синусоидальной формой кривой напряжения. Если в сети имеется нагрузка с нелинейной вольт-амперной характеристикой (нелинейная нагрузка), то она получает активную мощность на основной частоте или на первой гармонике ( $n=1$ ). Часть этой мощности нагрузка потребляет, а часть преобразует в активные мощности на других частотах или гармониках ( $n>1$ , активные мощности гармоник) [1]. Активные мощности гармоник нелинейной нагрузки направлены в питающую сеть, где рассеиваются в сопротивлениях оборудования, нагревают его и сокращают срок службы. Активные мощности гармоник из питающей сети поступают в нагрузки вместе с мощностью первой гармоники, оказывая неблагоприятные воздействия на электрооборудование потребителей.

Активные мощности гармоник, кроме проблем, вызываемых рассеиванием, создают множество других, описанных в большом числе отечественных и зарубежных публикаций, например в [1–7]. В [2] ставится вопрос о дополнительных финансовых потерях питающей сети и потребителей. Вопрос учета электрической энергии при несинусоидальных режимах рассматривается в [3], где указывается на возникающие недоразумения между энерго-снабжающими организациями и потребителями при расчетах за электрическую энергию. Счетчики электрической энергии измеряют активную энергию не только первой, но и других гармоник. А так как активная энергия гармоник порядка  $n>1$  не выполняет полезной работы, если только ее специально не используют, то сеть и потребители несут дополнительные расходы при оплате счетов за

электрическую энергию. В [7] экономические потери в странах Европы, вызываемые гармониками, оценены в 5,4% всех потерь, обусловленных низким качеством электрической энергии. В связи с этим представляется полезным анализ активных мощностей и энергий гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к питающей сети.

Анализ активных мощностей гармоник от 2-й до 40-й был проведен в соответствии с [8] в узлах присоединения к сети 220 кВ блока алюминиевого завода (БАЗ), целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) и подстанции железной дороги (ПЖД). Перечисленные предприятия имеют электрооборудование большой мощности, являющееся источником гармоник тока. Активные мощности гармоник в узлах присоединения предприятий к сети вычислены по измеренным токам и напряжениям. Измерения выполнялись в трех фазах в течение 24 ч с интервалом 1 мин. В результате были получены массивы измеренных параметров, состоящие из 1440 элементов.

**Теоретические основы анализа активных мощностей гармоник.** При анализе режимов гармоник питающая сеть и нелинейная нагрузка на  $n$ -й гармонике относительно узла присоединения представляются схемой замещения, приведенной на рис. 1. Схема замещения является традиционной для анализа несинусоидальных режимов [1, 2, 9]. Для рассматриваемых предприятий узлом присоединения являются шины 220 кВ, которые являются также точкой измерений (ТИ).

Вектор тока  $I_{nc}$  является результирующим вектором тока  $n$ -й гармоники всех нелинейных нагрузок, присоединенных к сети, относительно точки измерений, за исключением вектора тока  $I_{nn}$  на-

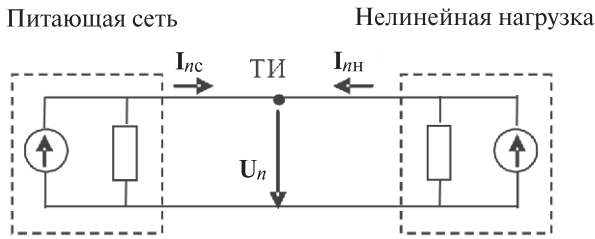


Рис. 1. Схема питающей сети и нелинейной нагрузки на  $n$ -й гармонике:  $I_{nc}$  — вектор тока  $n$ -й гармонике питающей сети;  $I_{nn}$  — то же нелинейной нагрузки;  $U_n$  — вектор напряжения  $n$ -й гармонике в точке измерений

грузки, присоединенной непосредственно к узлу, в котором проводились измерения. Значение и фаза тока  $I_{nc}$  зависят от большого числа факторов: волнового эффекта, проявляющегося в длинных линиях электропередачи на частотах гармоник [9], резонансов, возникающих в сети на некоторых гармониках [1], величин фазовых углов гармоник токов нелинейных нагрузок, распределенных в сети, с которыми они подтекают в рассматриваемый узел [10], изменений нагрузки и схемы сети и других. Результирующий вектор тока  $n$ -й гармонике в точке измерений определяется векторной суммой:

$$I_n = I_{nc} + I_{nn}. \quad (1)$$

В результате измерений получены значения токов ( $I_n$ ), напряжений ( $U_n$ ) и их фазовых углов ( $\varphi_{U_n}$ ,  $\varphi_{I_n}$ ). Они используются для вычисления активных мощностей гармоник по [9]:

$$P_n = U_n I_n \cos \varphi_n, \quad (2)$$

где  $\varphi_n$  — фазовый угол между напряжением и током  $n$ -й гармонике:

$$\varphi_n = \varphi_{U_n} - \varphi_{I_n}. \quad (3)$$

Фазовый угол  $\varphi_n$  позволяет определить направление активной мощности  $n$ -й гармонике относительно точки измерений. В [11] представлено соглашение о направлениях активных мощностей основной частоты в зависимости от фазового угла. В [9] оно распространено на мощности гармоник. Авторы [12] применили его для определения направлений активных мощностей гармоник. В соответствии с соглашением, если фазовый угол  $\varphi_n$  находится в интервале от 0 до  $\pi/2$  или от  $3\pi/2$  до  $2\pi$ , поток активной мощности  $n$ -ой гармонике направлен из сети в нагрузку, присоединенную к узлу. В таком случае узел для  $n$ -й гармонике является нагрузочным, т.е. потребляет активную мощность  $n$ -й гармонике из сети. Если фазовый угол  $\varphi_n$  — в интервале от  $\pi/2$  до  $3\pi/2$ , поток активной мощности  $n$ -й гармонике направлен из нагрузки в сеть. В этом случае узел для  $n$ -й гармонике является генерирующим, т.е. генерирует активную мощность  $n$ -й гармонике в сеть.

При питании от источника с синусоидальным напряжением в нелинейную нагрузку направлен поток активной мощности первой гармонике  $P_{1(+)}$ . Большая часть этой мощности потребляется нагрузкой для выполнения полезной работы. В [2] предложено называть ее «работающей мощностью» и обозначать  $P_w$ . Часть активной мощности первой гармонике преобразуется нелинейной нагрузкой в активные мощности гармоник порядка  $n > 1$ . Они направлены из нагрузки в сеть ( $P_{n(-)}$ ). Активная мощность первой гармонике из сети в нагрузку может быть представлена как

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

Если в сети имеются другие нелинейные нагрузки, то их активные мощности гармоник могут быть также направлены из сети в нагрузку. Обозначим их  $P_{n(+)}$ . Номера гармоник активных мощностей  $P_{n(-)}$  и  $P_{n(+)}$  могут быть разными. Таким образом, через узел течет поток активных мощностей

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

Сумму активных мощностей гармоник в обоих направлениях в [2] предложено называть «вредной мощностью» и обозначать  $P_d$ , значение которой для гармоник от 2-й до 40-й определяется выражением

$$P_d = \sum_{n=2}^{40} (|P_{n(-)}| + P_{n(+)}). \quad (6)$$

Приведенные теоретические положения были использованы для анализа активных мощностей гармоник, протекающих через узлы присоединения блока алюминиевого завода, целлюлозно-бумажного комбината и подстанции железной дороги к сети 220 кВ.

**Результаты анализа активных мощностей гармоник.** Активные мощности гармоник анализировались с целью определения значений, направлений потоков, времени протекания активных мощностей гармоник в сеть и в нагрузку, а также значений вредной мощности гармоник и соответствующих им значений вредной энергии.

**Направления потоков активных мощностей гармоник.** Анализ углов  $\varphi_n$  показал, что в течение измерений для подавляющего числа гармоник их значения находятся в интервале от 0 до  $2\pi$  (рис. 2,а). Подобное распределение свидетельствует о том, что активные мощности гармоник, протекающие через узел присоединения нелинейной нагрузки к питающей сети, могут быть направлены как в сеть, так и в нагрузку в течение примерно одинакового времени.

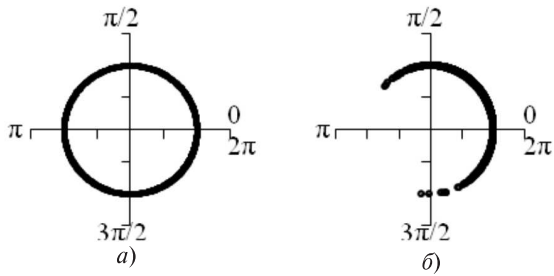


Рис. 2. Диаграммы углов  $\varphi_n$ : а — для большинства гармоник; б — для 11-й гармоники фазы А блока алюминиевого завода

Для некоторых гармоник распределение углов  $\varphi_n$  в интервале от 0 до  $2\pi$  неравномерное. Оно характерно, как правило, для канонических гармоник нелинейной нагрузки. В качестве примера на рис. 2,б показано распределение углов  $\varphi_{11}$  для узла присоединения блока алюминиевого завода, соответствующее преимущественному направлению активной мощности 11-й гармоники из сети в нагрузку.

По результатам анализа углов  $\varphi_n$  канонических гармоник для оборудования с однофазными 2-пульсными, трехфазными 6- и 12-пульсными схемами выпрямления, применяющимися на рассматриваемых предприятиях, построены диаграммы времени направлений активных мощностей (рис. 3). На диаграммах обозначено:  $t_{n(-)}$  — время протекания активной мощности  $n$ -й гармоники из нагрузки в сеть и  $t_{n(+)}$  — время протекания активной мощности  $n$ -й гармоники из сети в нагрузку. Время приведено в процентах от времени измерений, равного 24 ч. Из диаграмм видно, что через узлы присоединения рассматриваемых предприятий одну часть времени активные мощности гармоник направлены из нагрузки в сеть, а другую — из сети в нагрузку.

Анализ углов  $\varphi_n$  показал также, что в один и тот же момент времени активные мощности разных гармоник могут иметь противоположные направления. На рис. 4 для 20-минутного интервала времени показаны активные мощности 11-й и 13-й гармоник. Значения мощности, находящиеся

выше оси времени в области положительных значений, направлены из сети в нагрузку, а ниже оси времени — в обратном направлении. В первую минуту обе мощности направлены из сети в нагрузку, на что указывают маркеры обеих мощностей, расположенные выше оси времени. Во вторую минуту активная мощность 11-й гармоники направлена из сети в нагрузку, а 13-й гармоники — в сеть, так как маркеры находятся по разные стороны оси времени. В третью минуту обе мощности направлены в сеть. Маркеры обеих мощностей расположены ниже оси времени.

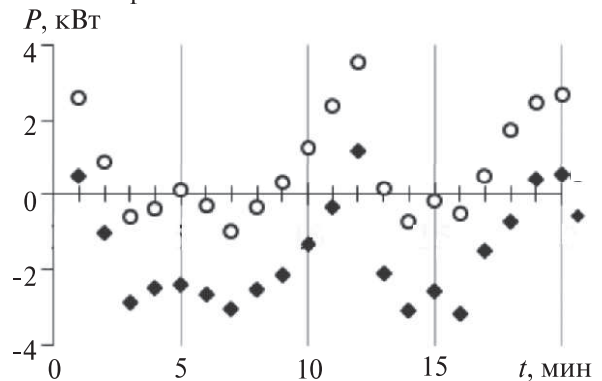


Рис. 4. Направления потоков активных мощностей 11-й (○) и 13-й (◆) гармоник блока алюминиевого завода на 20-минутном интервале

Далее приведены данные по числу гармоник из 39 по фазам А, В, С, потоки активных мощностей которых были направлены в сеть и в нагрузку:

Узел	Число гармоник по фазам*		
	А	В	С
БАЗ	10/29	14/25	19/20
ЦБК	16/23	15/24	18/21
ПЖД	25/14	19/20	31/8

\*В числителе — при потоках  $P_n$  в сеть; в знаменателе — в нагрузку.

Из приведенных данных следует, что в фазе А через узел присоединения блока алюминиевого завода в течение 24 ч измерений потоки активных мощностей 10 гармоник были направлены в сеть, а 29 гармоник — в нагрузку.

**Оценка времени протекания активных мощностей гармоник в обоих направлениях.** Оценки времени протекания активных мощностей некоторых гармоник в нагрузку и в сеть приведены в табл. 1. Например, активные мощности 11-й гармоники через узел присоединения блока алюминиевого завода большую часть времени направлены из сети в нагрузку узла, так как их время протекания по фазам А, В, С составляет 92,8, 91,3, 88,2%. Активные мощности 13-й гармоники, наоборот, большую часть времени направлены из нагрузки в сеть. Их время по фазам равно 75,3, 81,9, 51,9% соответственно (выделены в табл. 1 жирным шрифтом). Че-

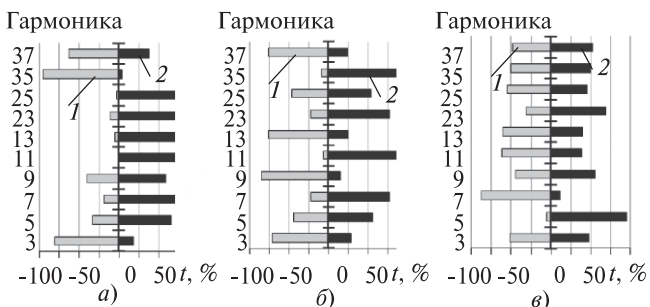


Рис. 3. Диаграммы времени направлений активных мощностей гармоник: а — через узлы присоединения блока алюминиевого завода; б — целлюлозно-бумажного комбината; в — подстанции железной дороги: 1 — в сеть; 2 — в нагрузку

Таблица 1

Узел	Фаза	Пара-метр	Номер гармоники									
			3	5	7	9	11	13	23	25	35	37
БАЗ	А	$t_{n(-)}$	71,8	44,2	22,3	84,7	7,2	<b>75,3</b>	22,2	46,7	9,1	76,3
		$P_{n(-)}$	367	344	193	77	5487	<b>10897</b>	686	587	665	987
		$t_{n(+)}$	28,2	55,8	77,7	15,3	<b>92,8</b>	24,7	77,8	53,3	90,9	23,8
		$P_{n(+)}$	215	373	275	28	17020	5588	1020	558	2192	448
	В	$t_{n(-)}$	96,7	21,0	49,4	77,4	8,8	<b>81,9</b>	23,6	44,4	10,7	65,6
		$P_{n(-)}$	648	372	278	78	5856	19326	540	693	1162	1049
		$t_{n(+)}$	3,3	79,0	50,6	22,6	<b>91,3</b>	18,1	76,4	55,6	89,3	34,4
		$P_{n(+)}$	165	581	268	32	17520	7487	748	774	3231	757
	С	$t_{n(-)}$	70,2	14,4	77,4	93	11,8	<b>51,9</b>	24,7	33,2	11,5	87,2
		$P_{n(-)}$	172	213	330	144	7857	8817	766	678	953	1558
		$t_{n(+)}$	29,8	85,6	22,6	7,0	<b>88,2</b>	48,1	75,3	66,8	88,5	12,8
		$P_{n(+)}$	94	626	161	33	<b>19940</b>	7950	765	892	2662	524
ЦБК	А	$t_{n(-)}$	<b>81,2</b>	34,1	19,0	40,8	1,1	5,3	11,0	2,8	96,0	62,4
		$P_{n(-)}$	800	161	445	151	58	43	13	22	31	3
		$t_{n(+)}$	18,8	<b>65,9</b>	81,0	59,2	98,9	94,7	89,0	97,2	4,0	37,6
		$P_{n(+)}$	214	419	556	256	<b>2238</b>	468	107	253	2	2
	В	$t_{n(-)}$	<b>55,1</b>	31,9	30,8	30,6	11,7	7,6	6,7	7,8	92,9	70,3
		$P_{n(-)}$	514	339	328	113	135	44	11	24	25	22
		$t_{n(+)}$	44,9	<b>68,1</b>	69,2	69,4	88,3	92,4	93,3	92,2	7,1	29,7
		$P_{n(+)}$	626	620	478	331	721	467	87	198	2	1
	С	$t_{n(-)}$	<b>82,8</b>	18,5	31,3	67,9	2,9	14,6	10,4	8,0	96,6	94,3
		$P_{n(-)}$	<b>1587</b>	295	403	135	147	56	20	40	44	6
		$t_{n(+)}$	17,2	<b>81,5</b>	68,8	32,1	97,1	85,4	89,6	92,0	3,4	5,7
		$P_{n(+)}$	856	<b>1102</b>	444	102	<b>1697</b>	388	129	289	3	1
ПЖД	А	$t_{n(-)}$	<b>51,9</b>	5,4	88,1	44,3	61,5	60,6	31,3	34,1	50,4	48,2
		$P_{n(-)}$	<b>1170</b>	<b>1079</b>	348	108	95	56	7	6	4	2
		$t_{n(+)}$	48,1	<b>94,6</b>	11,9	55,7	38,5	39,4	68,7	65,9	49,6	51,8
		$P_{n(+)}$	<b>1066</b>	<b>1158</b>	115	100	68	34	16	16	7	7
	В	$t_{n(-)}$	<b>53,6</b>	10,7	39,9	45,4	56,3	66,0	46,8	44,2	42,0	47,4
		$P_{n(-)}$	<b>1419</b>	405	187	110	93	41	6	5	2	2
		$t_{n(+)}$	46,4	<b>89,3</b>	60,1	54,6	43,8	34,0	53,2	55,8	58,0	52,6
		$P_{n(+)}$	755	<b>1156</b>	282	71	74	18	6	6	2	2
	С	$t_{n(-)}$	2,4	29,3	84,8	60,3	58,8	54,9	48,1	52,2	50,6	43,6
		$P_{n(-)}$	369	559	220	94	53	28	19	13	10	17
		$t_{n(+)}$	<b>97,6</b>	<b>70,7</b>	15,2	39,7	41,2	45,1	51,9	47,8	49,4	56,4
		$P_{n(+)}$	<b>3432</b>	609	109	70	48	25	14	6	3	2

рез узел присоединения целлюлозно-бумажного комбината активные мощности 3-й гармоники большую часть времени направлены в сеть. Их время протекания по фазам А, В, С составляют 81,2, 55,1 и 82,8%. Активные мощности 5-й гармоники, наоборот, большую часть времени направлены из сети в нагрузку со временем 65,9, 68,1 и 81,5% по

фазам. В результате измерений на одной из подстанций железной дороги установлено, что активные мощности 3-й гармоники в фазах А и В большую часть времени направлены из нагрузки в сеть, т.е. 51,9 и 53,6%, а в фазе С — 97,6 % из сети в нагрузку. Активные мощности 5-й гармоники в трех

фазах направлены из сети в нагрузку — 94,6, 89,3 и 70,7% соответственно.

Чтобы определить преобладающие направления потоков активных мощностей гармоник через узлы присоединения предприятий с точки зрения времен протекания, было вычислено суммарное время для 39 значений активных мощностей гармоник для каждой фазы в обоих направлениях (табл. 2). Из приведенных данных следует, что через узел присоединения блока алюминиевого завода большую часть времени потоки активной мощности гармоник направлены в сеть — 1577,7 ч, а через узлы присоединения целлюлозно-бумажного комбината и подстанции железной дороги — в нагрузку: 1563,1 и 1499,3 ч соответственно.

Таблица 2

Узел	Время протекания мощности $P_{n(-)}$ и $P_{n(+)}$	Фазы			Суммарное время
		A	B	C	
БАЗ	$t_{n(-)}$	528,6	499,9	549,2	<b>1577,7</b>
	$t_{n(+)}$	407,4	436,1	386,8	1230,3
ЦБК	$t_{n(-)}$	414,0	406,7	424,2	1244,9
	$t_{n(+)}$	522,0	529,3	511,8	<b>1563,1</b>
ПЖД	$t_{n(-)}$	407,0	442,8	458,9	1308,7
	$t_{n(+)}$	529,0	493,2	477,1	<b>1499,3</b>

#### Оценка значений активных мощностей гармоник.

Значения активных мощностей четных гармоник не превышают 100 Вт, достигают десятков кВт. Средние значения активных мощностей нечетных гармоник в обоих направлениях, на которых чаще всего нарушаются требования по качеству напряжения, установленные в [8], приведены в табл. 1, из которой видно, что наибольшие значения имеют активные мощности блока алюминиевого завода на 11-й и 13-й гармониках. Максимальное среднее

значение активной мощности 11-ой гармоники в фазе C из сети в нагрузку составляет 19,9 кВт, 13-й гармоники в фазе A из нагрузки в сеть — 10,9 кВт. В узле присоединения бумажного комбината наибольшие значения имеют мощности с 3-й по 11-ю гармоники. В фазах A и C активные мощности 11-й гармоники из сети в нагрузку превышают 1 кВт. В узле присоединения подстанции железной дороги средние значения активных мощностей значительно меньше, чем в узле присоединения блока алюминиевого завода. Наибольшее значение имеют активные мощности 3-й и 5-й гармоник. В фазах A и B их максимальные средние значения в обоих направлениях превышают 1 кВт. Начиная с 11-й гармоники значения мощности резко уменьшаются.

**Оценка значений вредных мощностей.** Значения вредной мощности для одного измерения, выполненного на интервале времени 1 мин, для 39 гармоник определяются выражением (6). Для каждого из 1440 интервалов времени измерений для каждой фазы вредная мощность вычисляется аналогично. В результате получено по три массива для каждого узла присоединения. Статистические оценки значений вредной мощности для этих массивов приведены в табл. 3. Вредная мощность со знаком «-» направлена в сеть, со знаком «+» — в нагрузку.

Максимальные значения вредной мощности ( $P_{d \max(-)}$ ,  $P_{d \min(+)}$ ), приведенные табл. 3, достигают нескольких десятков киловатт в обоих направлениях. В узлах присоединения целлюлозно-бумажного комбината и подстанции железной дороги максимальные значения (выделены жирным шрифтом) очень сильно отличаются от средних значений. Анализ массивов  $P_d$  обоих предприятий показал, что среди них имеется несколько элементов, которые по значению очень сильно отличаются от остальных. Они и дают максимальные значения мощностей. Подобные элементы в литературе называются аномальными и иногда их за-

Таблица 3

Узел	Фаза	Значение вредной мощности, кВт								
		$P_{d \max(-)}$	$P_{d \min(-)}$	$P_{dcp(-)}$	$P_{d \max(+)}$	$P_{d \min(+)}$	$P_{dcp(+)}$	$P_{d \max \Sigma}$	$P_{d \min \Sigma}$	$P_{dcp \Sigma}$
БАЗ	A	<b>55,0</b>	0,1	<b>11,4</b>	<b>59,4</b>	1,5	<b>21,2</b>	<b>61,5</b>	11,9	<b>32,5</b>
	B	<b>71,4</b>	0,4	<b>19,5</b>	<b>62,8</b>	1,1	<b>22,4</b>	<b>75,5</b>	15,1	<b>42,0</b>
	C	<b>61,2</b>	0,6	<b>9,0</b>	<b>72,9</b>	1,1	<b>25,9</b>	<b>74,9</b>	9,0	<b>35,0</b>
ЦБК	A	<b>12,6</b>	0	<b>1,0</b>	<b>65,2</b>	0,7	<b>4,0</b>	<b>77,8</b>	1,1	<b>5,0</b>
	B	2,9	0	0,6	9,1	0,4	2,8	10,4	0,9	3,4
	C	8,7	0	1,7	12,8	0,5	2,8	14,3	1,5	5,5
ПЖД	A	<b>15,4</b>	0	<b>1,2</b>	<b>54,5</b>	0	<b>1,9</b>	<b>54,5</b>	0,4	<b>3,1</b>
	B	<b>16,8</b>	0	<b>1,1</b>	<b>12,0</b>	0	<b>1,7</b>	<b>17,2</b>	0,4	<b>2,8</b>
	C	<b>56,2</b>	0	<b>0,7</b>	<b>29,0</b>	0	<b>4,0</b>	<b>85,2</b>	0,3	<b>4,6</b>

меняют элементами, вычисленными по специальным алгоритмам [13, 14]. В данном случае аномальные элементы оставлены в исходном виде, так как на практике они учитываются счетчиками при измерении электрической энергии. В качестве примера на рис. 5 для узла присоединения подстанции железной дороги приведены точечные графики активной мощности 3-й гармоники в двух направлениях и вредной мощности  $P_d$  для фазы  $A$ . На графиках хорошо видны аномальные элементы, значительно превосходящие по значению остальные.

Сопоставление мощностей  $P_{dcp(-)}$  и  $P_{dmin(+)}$  в табл. 3 позволяет сделать вывод, что средние значения мощностей, направленных в нагрузку, больше средних значений мощностей, направленных в сеть.

**Предложение по использованию вредной активной энергии гармоник.** Активные мощности гармоник порядка  $n > 1$ , так же как и мощность первой гармоники, имеют физический смысл. Они выполняют работу. Но в отличие от мощности первой гармоники, выполняющей полезную работу, если пренебречь потерями активной мощности при передаче, они выполняют разрушительную вредную работу. В результате этой работы возникает ущерб, который можно оценить экономически. Для оценки значения полезной работы, совершенной активной мощностью первой гармоники, используют счетчики электрической энергии. Чтобы оценить значение вредной работы, совершенной вредной мощностью, нужно тоже использовать счетчики электрической энергии или специально разработанные приборы. Они должны измерять отдельно

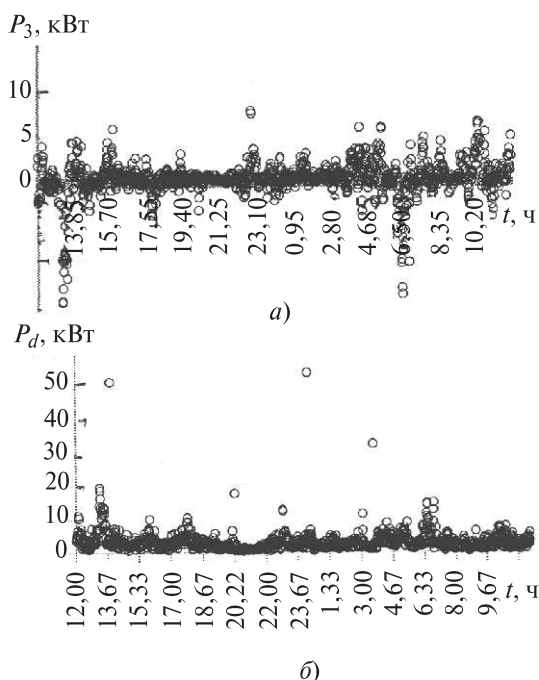


Рис. 5. Аномальные элементы массивов:  $P_3$  (а) и  $P_d$  (б)

вредную энергию гармоник, которую предприятие генерирует в сеть и вредную энергию гармоник, которую предприятие получает из сети.

Используя полученные ранее результаты анализа активных мощностей гармоник в узлах присоединения трех предприятий, оценим вредную активную энергию гармоник. Активную энергию гармоник можно вычислить, если принять, что значение активной мощности  $n$ -й гармоники на интервале одного измерения длительностью 1 мин остается постоянным. Значение энергии любой гармоники на интервале измерений легко вычислить как произведение значения активной мощности гармоники на длительность этого интервала. В табл. 4 приведены вычисленные значения активной энергии для некоторых канонических гармоник и суммарные значения энергии для 39 гармоник для трех фаз каждого предприятия за 24 ч измерений.

Таблица 4

Узел	Номер гармоники $n$	Значение активной энергии гармоник (кВтч) направленной	
		в сеть $W_{d(-)}$	в нагрузку $W_{d(+)}$
БАЗ	11	44,0	<b>1185,0</b>
	13	<b>686,4</b>	157,6
	23	11,3	46,6
	25	19,4	31,8
	35	7,1	173,6
	37	67,2	10,4
	2–40	<b>957,0</b>	<b>1669,7</b>
ЦБК	3	<b>53,9</b>	9,5
	5	5,2	38,3
	7	5,8	<b>40,3</b>
	2–40	<b>79,9</b>	<b>254,3</b>
ПЖД	3	<b>33,0</b>	<b>101,2</b>
	5	5,7	61,4
	7	13,6	4,8
	2–40	<b>69,8</b>	<b>181,2</b>

Из анализа табл. 4 следует, что блок алюминиевого завода за 24 ч генерирует в сеть 686,4 кВтч активной энергии 13-й гармоники, но потребляет из сети 1185,0 кВтч активной энергии 11-й гармоники. С учетом энергии 39 гармоник блок алюминиевого завода генерирует в сеть 957,0 кВтч энергии, но из сети в нагрузку блока поступает 1669,7 кВтч вредной энергии. Сравнение суммарной энергии 39 гармоник в двух направлениях, приведенных в табл. 4, позволяет сделать вывод, как это ни парадоксально, что все три предприятия полу-

чают из сети больше вредной энергии, чем генерируют в сеть.

Ранее отмечалось, что режимы гармоник имеют вероятностный характер. Оценить вклад нелинейной нагрузки в искажение качества электрической нагрузки использованием токов, напряжений, сопротивлений и других параметров, изменяющихся случайным образом, на основе детерминистического подхода, например как в [16–19], невозможно, именно потому, что множество случайных событий влияют на параметры сети и режима. Поскольку значение электрической энергии зависит от всех перечисленных параметров, то и в качестве критерия для оценки вклада потребителя или сети в искажение качества электрической энергии нужно измерять вредную энергию гармоник. Раздельное измерение вредной активной энергии гармоник в двух направлениях позволит решить вопрос о вкладе предприятия с нелинейными нагрузками в искажение качества электрической энергии. Предприятиям с линейными нагрузками счетчики вредной энергии позволят оценить значение вредной электрической энергии, которая им поступает из сети.

Естественно, чтобы улучшить качество электрической энергии, нужно уменьшить количество генерируемой вредной энергии предприятиями. Для этого предприятия — источники вредной энергии нужно стимулировать к уменьшению ее генерации в сеть путем введения отдельной платы за эту энергию. Нужно также рассмотреть вклад вредной реактивной мощности и энергии гармоник в искажение качества электрической энергии. Для отработки метода оценки вклада в искажение качества электрической энергии, основанного на измерении значений вредной энергии, можно использовать результаты непрерывного мониторинга параметров режима. Следует отметить, что предложения по использованию вредной энергии гармоник для оценки вклада источника искажений в ухудшение качества электрической энергии уже были сделаны в [20].

**Выводы.** 1. Анализ активных мощностей гармоник в узлах присоединения к сети высокого напряжения предприятий с нелинейной нагрузкой показал, что режимы гармоник имеют вероятностный характер. Активные мощности гармоник направлены из сети в нагрузку и из нагрузки в сеть. Время протекания потоков активной мощности гармоник в обоих направлениях для каждого узла различное. Значения активной мощности гармоник находятся в диапазоне от нескольких десятков ватт до нескольких десятков киловатт. Значения вредной энергии гармоник как генерируемой предпри-

ятием в сеть, так и получаемой предприятием из сети достигают нескольких мегаватт-часов за 24 ч.

2. При большом числе нелинейных нагрузок, присоединенных к сети высокого напряжения, предприятие, имеющее нелинейные нагрузки большой мощности, может получать вредной энергии гармоник из сети больше, чем генерировать ее в сеть.

3. Для оценки размера искажений качества электрической энергии, вносимых предприятием в сеть и получаемых из сети, необходимо использовать вредную энергию гармоник, значение которой можно измерять с помощью счетчиков или специальных приборов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Априлага Дж., Брэдли Д., Боджер П.** Гармоники в электрических системах / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990, 320 с.
2. **Czarnecki L.S.** Working, reflected and detrimental active powers. — IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, vol. 1, pp. 1–7.
3. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электропитания промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2000, 331 с.
4. **Koernikova L.I.** Estimation of damage from higher harmonics. Liberalization and Modernization of Power Systems: Risk Assessment and Optimization for Asset Management. — Proc. of the 3rd International Workshop / Edited by N.I. Voropai and E.J. Handschin. — Irkutsk: Energy Systems Institute, 2006, pp. 201–204.
5. **Bhattacharyya S., Michiel van Lumig, Cobben S. et al.** Consequences of poor power quality for grid operators. — Proc. of the 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, 8–11 June, 2009: <http://www.cired.net/publications/cired2009/>
6. **Hartungi R., Jiang L.** Investigation of power quality in health care facility. — Proc. of the Intern. Conf. on Renewable Energies and Power Quality, Granada (Spain), 23–25 March, 2010: <http://www.icrepq.com/icrepq'10/555-Hartungi.pdf>
7. **Targosz R., Chapman D.** Application note. Cost of poor power quality: <http://www.leonardo-energy.org/node/141781/>
8. **ГОСТ 32144–2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014.
9. **Emanuel A.E.** Power definitions and physical mechanism of power flow. — John Wiley & Sons, 2010, 264 p.
10. **Kazibwe W.E., Ortmeier T.H., Hammam M.S.A.A.** Summation of probabilistic harmonic vectors. — IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, vol. 4, pp. 621–628.
11. **Stevens R.H.** Power flow direction definitions for metering bidirectional power. — IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, vol.102, No. 9, Sept., pp. 3018–3021.
12. **Emanuel A.E., Orr J.A., Cyganski D., Gulachenski E.M.** A survey of harmonic voltages and currents at distribution substations. — IEEE Transactions on Power Delivery, October, 1991, vol.6, No. 4, pp. 1883–1890.
13. **Irwin J.O.** On a criterion for the rejection of outlying observations. — Biometrika, 1925, vol. 17, Issue 3–4, pp. 238–250.
14. **Кобзарь А.И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М.: Физматлит, 2012, 816 с.

15. **Правила** применения скидок и надбавок к тарифам за качество электроэнергии. — Промышленная энергетика, 1991, № 8, с. 49—51.

16. **Правила** присоединения потребителей к сети общего назначения по условиям влияния на качество электроэнергии. — Промышленная энергетика, 1991, № 8, с. 45—48.

17. **Геворкян В.М., Михалин С.Н.** Проблема учета фактического вклада субъектов электрических сетей в искажение параметров качества электрической энергии. — Технологии электромагнитной совместимости, 2007, № 1(20), с. 3—10.

18. **Тигунцев С.Г.** Оценка вклада участников электроснабжения в качество электрической энергии. — Сб. трудов Междунаро. научно-практической конф. «Управление качеством электрической энергии», Москва, 26—28 ноября 2014. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014, с. 199—207.

19. **Висяшев А.Н., Федосов Д.С., Федчишин В.В.** Оценка влияния электроприемников на уровень гармонических составляющих напряжения в электрической сети. — Сб. трудов Междунаро. научно-практической конф. «Управление качеством электрической энергии», Москва, 26—28 ноября 2014. —

М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014, с. 209—221.

20. **Суслов К.В., Степанов В.С., Солонина Н.Н., Солонина З.В.** Распределенный мониторинг качества электрической энергии в интеллектуальных электрических сетях. — Сб. трудов Междунаро. научно-практической конф. «Управление качеством электрической энергии», Москва, 26—28 ноября 2014. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2014, с. 329—335.

[07.11.2016]

*А в т о р : Коверникова Лидия Ивановна окончила электротехнический факультет Новосибирского электротехнического института в 1976 г. В 1995 г. защитила кандидатскую диссертацию «Разработка алгоритмов и программного комплекса для анализа высших гармоник в высоковольтных сетях электроэнергетических систем» в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН). Старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 3, pp. 12–20.*

## Harmonic Active Power at Nodes Connecting Nonlinear Loads to the High Voltage Network

**KOVERNIKOVA Lidiya I.** (*Melent'yev Energy System Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS), Irkutsk, Russia*). — Senior Researcher of ESI SB RAS

*The paper presents the results of an analysis of harmonic active power at the nodes connecting a 220 kV supply network to three nonlinear high-power loads: an aluminum smelter shop, a pulp and paper plant and a railway traction substation. The main process equipment of the facilities is a source of harmonics. The analysis is performed on the basis of measurements. Measured current and voltage were used to calculate active power for harmonics 2–40. Based on the analysis, it was found out that the facilities are the sources of characteristic harmonics and generate the harmonic active power to the network only during part of the measurement time. For the other part of the time the harmonic active power flows from the network to the load of the facilities. The values of the harmonic active power flowing in both directions vary from several tens of watts to several tens of kilowatts. The paper presents the proposals on the use of harmonic active energy.*

*Key words:* high-voltage network, nonlinear load, power quality, harmonics, measurement

### REFERENCES

1. **Arrilaga G., Bradly D., Bodger P.** *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* (Harmonics in electrical systems). Moscow, Energoatomizdat, 1990, 320 p.

2. **Czarnecki L.S.** Working, reflected and detrimental active powers. — IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, vol. 1, pp. 1–7.

3. **Zhezhenko I.V.** *Vysshiyе garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya* (Higher harmonics in power supply systems). 4th Edit. Moscow, Energoatomizdat, 2000, 331 p.

4. **Kovernikova L.I.** Estimation of damage from higher harmonics. Liberalization and Modernization of Power Systems: Risk Assessment and Optimization for Asset Management. — Proc. of the 3rd International Workshop/Edited by N.I. Voropai and E.J.Handschin. — Irkutsk: Energy Systems Institute, 2006, pp. 201—204.

5. **Bhattacharyya S., Michiel van Lumig, Cobben S. and al.** Consequences of poor power quality for grid operators. — Proc. of the 20th International Conference on Electricity Distribution,

Prague, 8–11 June, 2009: <http://www.cired.net/publications/cired2009/>

6. **Hartungi R., Jiang L.** Investigation of power quality in health care facility.— Proc. of the Intern. Conf. on Renewable Energies and Power Quality, Granada (Spain), 23–25 March, 2010: <http://www.icrepq.com/icrepq'10/555-Hartungi.pdf>

7. **Targosz R., Chapman D.** Application note. Cost of poor power quality:<http://www.leonardo-energy.org/node/141781/>

8. **GOST 32144–2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* (State standard. Electric energy. Electromagnetic compability of technical means. Power quality limits in public power supply systems). Moscow, Standartinform, 2014.

9. **Emanuel A.E.** Power definitions and physical mechanism of power flow. — John Wiley & Sons, 2010, 264 p.

10. **Kazibwe W.E., Ortmeier T.H., Hammam M.S.A.A.** Summation of probabilistic harmonic vectors. — IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, vol. 4, pp. 621—628.