

УДК 621.311

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ВЫЗВАННЫХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМИ РЕЖИМАМИ, ПРИ РАСЧЕТЕ НЕБАЛАНСОВ СИСТЕМНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 10 КВ

**О. Г. ШИРОКОВ, Т. В. АЛФЕРОВА, А. А. АЛФЕРОВ,
С. Л. ПРУСАКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Важнейшим количественным показателем технического состояния электрических сетей и уровня их эксплуатации является величина потерь электроэнергии и тенденции ее изменения.

Несмотря на существенный прогресс в развитии систем учета электроэнергии, в настоящее время наблюдается практически повсеместный рост отчетных потерь электроэнергии. При этом увеличиваются обе составляющие потерь: техническая и коммерческая.

По мнению международных экспертов, относительные общие потери электроэнергии при ее передаче и распределении в электрических сетях можно считать удовлетворительными, если они не превышают 4–5 %. В России их величина достигает 11–13 %, в Японии и Западной Европе – не более 6–7 %. Согласно официальным данным в Республике Беларусь эти потери составляют в среднем 11–13 % [1].

Высокий уровень потерь электроэнергии в распределительных сетях энергосистем в основном обусловлен следующими факторами: техническими параметрами элементов сети; неоптимальными режимами работы; недостатком регулирующих средств; отсутствием или неудовлетворительной компенсацией реактивной мощности; высокой неравномерностью графиков электрических нагрузок; неэффективностью систем учета электроэнергии; увеличением установленной мощности нелинейных и несимметричных нагрузок. Фактические небалансы электроэнергии в распределительных сетях энергосистем зачастую превышают допустимые значения, иногда значительно. Их динамика как по подстанциям, так и по сетям в целом характеризует случайность, стремление к увеличению. Поэтому аппаратная реализация учета электроэнергии приводит к неопределенности исходной информации, используемой при расчете, анализе и прогнозировании потерь электроэнергии.

Качество электроэнергии в сетях энергоснабжающих организаций по многим показателям обуславливается техническими характеристиками и режимами работы электроприемников потребителей. Многие проблемы в области качества электроэнергии (в частности, взаимоотношений поставщиков и потребителей энергии) в настоящее время не имеют окончательного решения в значительной мере в силу влияния на качество электроэнергии самих потребителей. Особенности электроэнергии обуславливают и тот неприятный факт, что потребители, не оказывающие отрицательного влияния на качество электроэнергии, вынуждены потреблять электроэнергию, качество которой ухудшено другими потребителями [3].

Производственные затраты, обусловленные некачественной электроэнергией, не оцениваются и не учитываются, хотя это делать необходимо [2].

Целью работы является количественная оценка потерь электрической энергии, вызванных несинусоидальными режимами, при расчете небалансов системных подстанций 6–10 кВ; получение спектров высших гармоник (ВГ) на трансформаторных подстанциях г. Гомеля и Гомельской области и определение процента дополнительных потерь от несинусоидальности кривой напряжения.

Основная часть

Потери энергии в системах электроснабжения в значительной степени связаны с качеством электроэнергии, которое в свою очередь является составной частью электромагнитной совместимости. Можно выделить основные показатели качества электрической энергии [5], ухудшение которых приводит к увеличению потерь электроэнергии:

- установившееся отклонение напряжения;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент n -й гармонической составляющей;
- коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям.

Причем виновниками несоответствия таких показателей, как установившееся отклонение напряжения и отклонения частоты являются энергоснабжающие организации, а коэффициентов искажения синусоидальности, n -й гармонической составляющей, несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям – потребители [4].

При наличии в кривой напряжения ВГ возникают дополнительные потери мощности в электрооборудовании и в линиях электропередачи. Эти потери будут довольно значительными при большом коэффициенте искажения синусоидальности кривой напряжения. Для обеспечения небольшого искажения синусоиды мощность источника питания должна быть в 10 раз больше мощности нелинейной нагрузки. В Республике Беларусь только частично налажена работа по контролю значений несинусоидальности напряжения. Данная деятельность лучше всего поставлена в филиале «Энергосбыт» РУП «Гомельэнерго». В остальных областях республики она находится на начальной стадии [1].

В настоящее время на промышленных предприятиях и у коммунально-бытовых потребителей ударными темпами увеличивается количество помехогенерирующего оборудования. На предприятиях это связано с повсеместной модернизацией производства, т. е. с внедрением передового оборудования: современных источников света, сварочных выпрямителей и частотных преобразователей. В коммунально-бытовом секторе – это персональные компьютеры, компактные люминесцентные лампы, телевизоры и др.

При несинусоидальных токах и напряжениях учет электрической энергии связан со значительными погрешностями. Особенно влияние ВГ сказывается на счетчиках индукционной системы, имеющих отрицательную частотную погрешность на частотах выше 50 Гц. В зависимости от того, содержит электроприемник линейную или нелинейную нагрузку, возможен недоучет или переучет потребленной электроэнергии.

При больших искажениях напряжения и преобладании 5–13-й гармоник токов положительная погрешность измерения энергии, потребляемой тиристорными преобразователями, достигает 3–4 %. В наибольшей степени влияние несинусоидальности на погрешности индукционных счетчиков проявляется на частотах 11-й и 13-й гармоник.

При коэффициенте искажения синусоидальности напряжения менее 5 % дополнительные погрешности измерений оказываются пренебрежительно малыми.

В свою очередь недоучет электроэнергии и постоянное ухудшение ее качества приводит к дополнительным потерям электроэнергии и денежных средств энерго-снабжающих организаций. Это связано с тем, что показатели качества электроэнергии, ухудшаемые ее потребителями, постоянно не отслеживаются, что приводит к увеличению технических потерь электроэнергии. Структура потерь электроэнергии, вызванных ее низким качеством, приведена на рис. 1.

Гармоники высшего порядка вносят ощутимый вклад в ухудшение параметров энергосети предприятия путем генерации паразитной мощности в сеть. Данная мощность не потребляется нагрузкой и стремится к источнику (трансформатору).

Для более эффективного энергоснабжения с учетом данной паразитной мощности приходится увеличивать сечения кабельных линий, мощности трансформаторов.



Рис. 1. Структура потерь электроэнергии в системах электроснабжения, вызванных низким качеством электроэнергии

Потери в трансформаторах, связанные с показателями качества

Дополнительные потери активной мощности при несимметрии напряжений представляют в виде суммы дополнительных потерь холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). При несинусоидальности напряжения учитывают еще и добавочные потери, обусловленные вихревыми токами. Эти потери обычно невелики и составляют в среднем 5 % номинальных потерь КЗ трансформатора P_k , однако при протекании в трансформаторе токов ВГ добавочные потери резко возрастают и могут достигать 30–50 % P_k . Например, в Канаде на преобразовательной подстанции

высоковольтной системы передачи постоянного тока был зарегистрирован отказ трехобмоточного трансформатора мощностью 240 МВ·А. Исследования показали, что отказ был вызван потерями от вихревых токов, уровень которых из-за ВГ значительно превысил допустимое значение. Добавочные потери в обмотках трансформатора возрастают пропорционально квадрату номера гармоники.

Дополнительными потерями ХХ при несинусоидальности и несимметрии напряжений, как правило, пренебрегают, однако в некоторых работах их учитывают. Дополнительные потери ХХ ΔP_{xv} при несинусоидальности напряжения рассчитывают по выражению

$$\Delta P_{xv} = P_x \sum_{v=2}^n \frac{U_{v*}^2}{v^{2,6}}, \quad (1)$$

где P_x – потери ХХ при основной частоте, $U_{v*} = \frac{U_v}{U_{ном}}$.

Дополнительные потери активной мощности при несинусоидальности напряжения будут равны:

$$\Delta P_v = 1,291 \frac{P_k}{u_k^2} \sum_{v=2}^n \frac{1 + 0,05 \cdot v^2}{v\sqrt{v}} \cdot U_{v*}^2, \quad (2)$$

где u_k – напряжение КЗ, о. е.; дополнительными потерями ХХ, обусловленными ВГ, пренебрегают.

Дополнительные потери активной мощности в трансформаторах при несимметрии режима можно определить по следующей формуле

$$\Delta P_{(2)} = \frac{P_k}{u_k^2} K_{2U}^2, \quad (3)$$

где $K_{2U} = U_2 / U_{ном}$ – коэффициент обратной последовательности напряжений, равный отношению напряжения обратной последовательности U_2 к номинальному напряжению $U_{ном}$; дополнительные потери ХХ, обусловленные несимметрией напряжений, в практических расчетах можно не учитывать [6].

Определение коэффициентов n-х гармонических составляющих напряжения на системных подстанциях 10 кВ проводилось при помощи устройства контроля параметров качества электрической энергии УК1 (ТУ РБ 100230547.012–2002), которое производит замеры параметров качества электрической энергии в соответствии с требованиями ГОСТ 13109–97.

Показатели качества электрической энергии были сняты для четырех системных подстанций 10 кВ для двух трансформаторов ТМГ11-1000-10/0,4 и двух ТМ-1000-10/0,4. Эксперименты проводились на шинах 0,4 кВ в соответствии с [5], время каждого измерения составляло 24 часа.

Коэффициенты n-х гармонических составляющих напряжения по фазам для подстанций № 1 и 2 с трансформаторами ТМГ11-1000-10/0,4 и подстанций № 3 и 4 с трансформаторами ТМ-1000-10/0,4 приведены на рис. 2–5 соответственно.

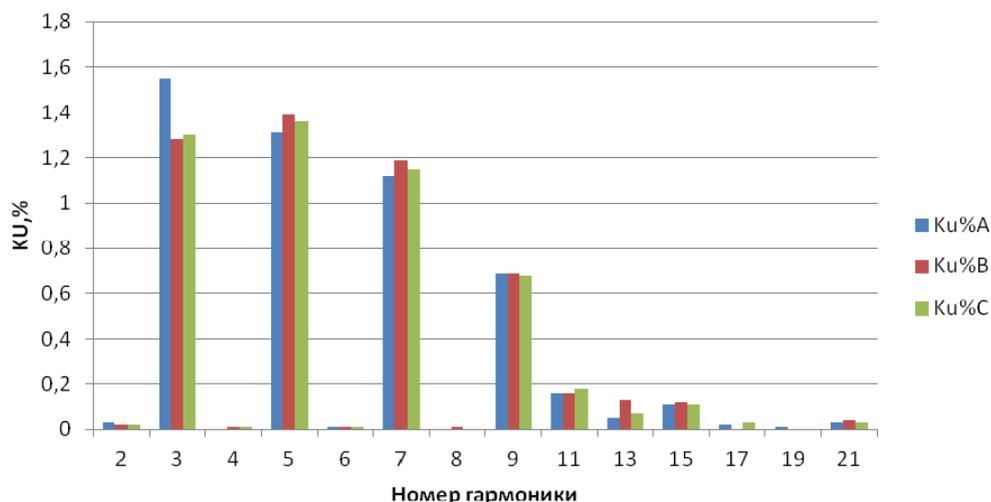


Рис. 2. Коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения для подстанции № 1

Из анализа рис. 2 можно сделать вывод, что в спектре гармонических составляющих напряжения в основном преобладают нечетные гармоники, особенно 3-я, 5-я, 7-я, 9-я, 11-я, 13-я и 15-я. Данные гармонические составляющие будут оказывать наибольший вклад в суммарные потери электроэнергии, связанные с ее качеством.

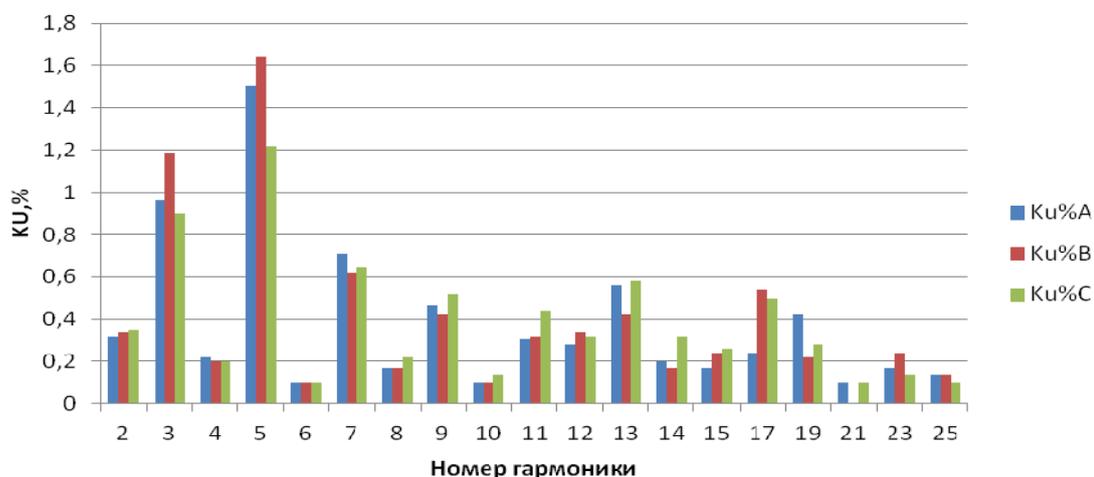


Рис. 3. Коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения для подстанции № 2

Из анализа рис. 3 следует, что в спектре гармонических составляющих напряжения на подстанции № 2 присутствуют практически все гармоники до 25-й включительно. В основном преобладают нечетные гармоники, особенно 3-я, 5-я, 7-я, 9-я, 11-я, 13-я и 17-я. Данные гармонические составляющие будут оказывать наибольший вклад в суммарные потери электроэнергии, связанные с ее качеством.

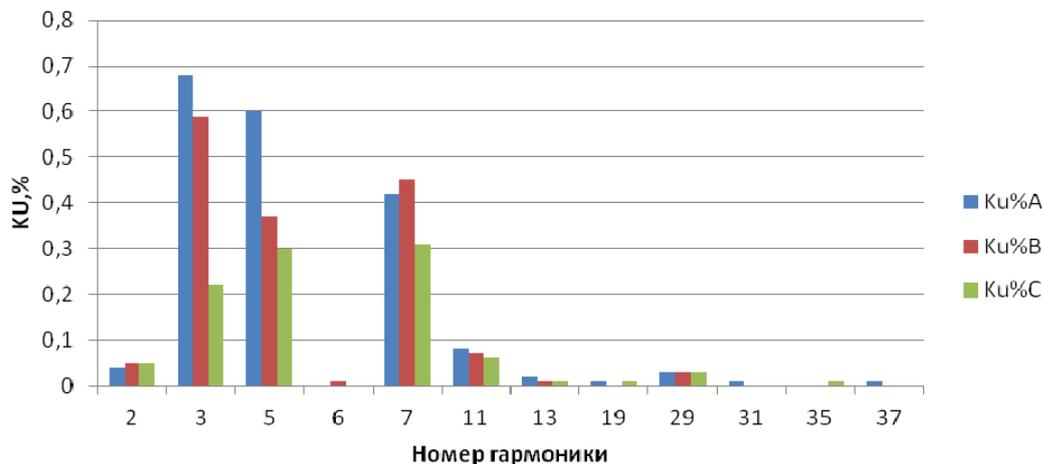


Рис. 4. Коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения для подстанции № 3

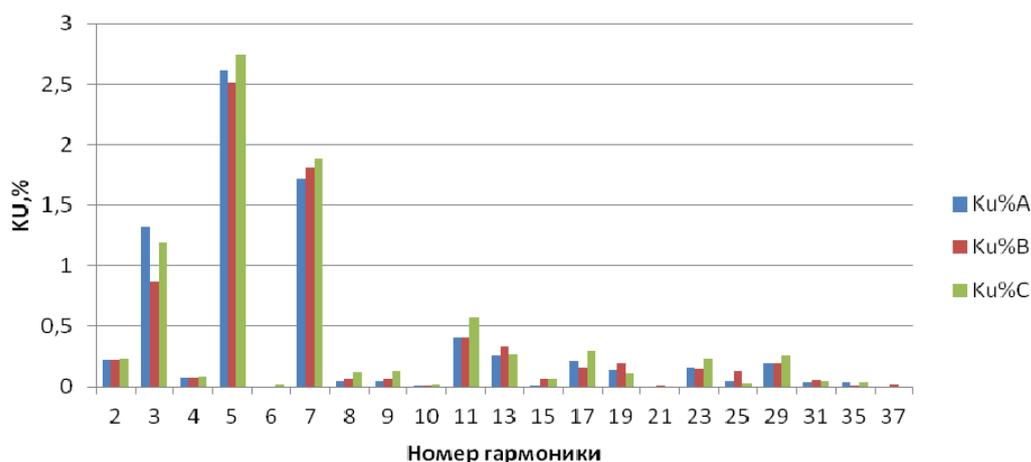


Рис. 5. Коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения для подстанции № 4

Из анализа рис. 4 и 5 можно сделать вывод, что на подстанциях № 3 и 4 преобладают гармоники № 3, 5, 7 и 11, именно они будут иметь наибольшее влияние на потери мощности и электроэнергии.

Из анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что на всех подстанциях значения коэффициентов n -х гармонических составляющих находятся в пределах допустимых значений, а если выходят за их пределы, то на очень незначительное время.

Обработка экспериментальных данных проводилась в пакете Excel. Потерями ХХ от ВГ напряжения было решено пренебречь, так как их величина не превышала 1 % потерь КЗ. Для обработки брались данные, усредненные за сутки. Для определения добавочных активных потерь мощности при несинусоидальности напряжения было использовано выражение (2), мощность КЗ для всех трансформаторов принималась по справочным данным завода-изготовителя и составляла 10,8 кВт, а напряжение КЗ принималось 5,5 %. Полученные расчетные данные приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Дополнительные потери активной мощности от высших гармоник напряжения
для подстанции № 1

Номер гармоники, <i>n</i>	Коэффициенты <i>n</i> -х гармонических составляющих напряжения по фазам			Потери мощности от высших гармоник напряжения, Вт/сут		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С	А	В	С
2	0,03	0,02	0,02	0,18	0,08	0,08
3	1,55	1,28	1,3	309,01	210,73	217,37
4	0	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
5	1,31	1,39	1,36	159,18	179,22	171,57
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
7	1,12	1,19	1,15	107,70	121,59	113,55
8	0	0,01	0	0,00	0,01	0,00
9	0,69	0,69	0,68	41,04	41,04	39,86
11	0,16	0,16	0,18	2,28	2,28	2,89
13	0,05	0,13	0,07	0,23	1,57	0,46
15	0,11	0,12	0,11	1,18	1,40	1,18
17	0,02	0	0,03	0,04	0,00	0,09
19	0,01	0	0	0,01	0,00	0,00
21	0,03	0,04	0,03	0,10	0,18	0,10
Итого, Вт/сут				620,97	558,11	547,15
Итого тыс. кВт · ч/год				0,63		
Итого т у. т.				0,18		

Таблица 2

Дополнительные потери активной мощности от высших гармоник напряжения
для подстанции № 2

Номер гармоники, <i>n</i>	Коэффициенты <i>n</i> -х гармонических составляющих напряжения по фазам			Потери мощности от высших гармоник напряжения, Вт/сут		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С	А	В	С
2	0,32	0,34	0,35	20,02	22,61	23,96
3	0,96	1,19	0,9	118,54	182,14	104,18
4	0,22	0,2	0,2	5,02	4,15	4,15
5	1,5	1,64	1,22	208,71	249,48	138,06
6	0,1	0,1	0,1	0,88	0,88	0,88
7	0,71	0,62	0,65	43,28	33,01	36,28
8	0,17	0,17	0,22	2,47	2,47	4,14
9	0,47	0,42	0,52	19,04	15,21	23,31
10	0,1	0,1	0,14	0,87	0,87	1,71
11	0,31	0,32	0,44	8,56	9,12	17,24
12	0,28	0,34	0,32	7,13	10,51	9,31
13	0,56	0,42	0,58	29,14	16,39	31,26
14	0,2	0,17	0,32	3,80	2,75	9,73
15	0,17	0,24	0,26	2,81	5,60	6,57
17	0,24	0,54	0,5	5,85	29,63	25,40
19	0,42	0,22	0,28	18,70	5,13	8,31
21	0,1	0	0,1	1,10	0,00	1,10

Окончание табл. 2

Номер гармоники, <i>n</i>	Коэффициенты <i>n</i> -х гармонических составляющих напряжения по фазам			Потери мощности от высших гармоник напряжения, Вт/сут		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С	А	В	С
23	0,17	0,24	0,14	3,31	6,61	2,25
25	0,14	0,14	0,1	2,33	2,33	1,19
Итого, Вт/сут				501,58	598,88	449,04
Итого тыс. кВт · ч/год				0,57		
Итого т у. т.				0,16		

Таблица 3

Дополнительные потери активной мощности от высших гармоник напряжения для подстанции № 3

Номер гармоники, <i>n</i>	Коэффициенты <i>n</i> -х гармонических составляющих напряжения по фазам			Потери мощности от высших гармоник напряжения, Вт/сут		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С	А	В	С
2	0,04	0,05	0,05	0,31	0,49	0,49
3	0,68	0,59	0,22	59,47	44,77	6,23
5	0,6	0,37	0,3	33,39	12,70	8,35
6	0	0,01	0	0,00	0,01	0,00
7	0,42	0,45	0,31	15,15	17,39	8,25
11	0,08	0,07	0,06	0,57	0,44	0,32
13	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
19	0,01	0	0,01	0,01	0,00	0,01
29	0,03	0,03	0,03	0,11	0,11	0,11
31	0,01	0	0	0,01	0,00	0,00
35	0	0	0,01	0,00	0,00	0,01
37	0,01	0	0	0,01	0,00	0,00
Итого, Вт/сут				109,09	75,92	23,78
Итого тыс. кВт · ч/год				0,076		
Итого т у. т.				0,021		

Таблица 4

Дополнительные потери активной мощности от высших гармоник напряжения для подстанции № 4

Номер гармоники, <i>n</i>	Коэффициенты <i>n</i> -х гармонических составляющих напряжения по фазам			Потери мощности от высших гармоник напряжения, Вт/сут		
	Ku% фаза А	Ku% фаза В	Ku% фаза С	А	В	С
2	0,23	0,23	0,24	10,34	10,34	11,26
3	1,32	0,87	1,19	224,11	97,35	182,14
4	0,08	0,08	0,09	0,66	0,66	0,84
5	2,62	2,51	2,74	636,73	584,39	696,39
7	1,72	1,81	1,89	254,01	281,29	306,70
8	0,05	0,07	0,12	0,21	0,42	1,23
9	0,05	0,07	0,13	0,22	0,42	1,46
10	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03
11	0,4	0,4	0,57	14,25	14,25	28,94
13	0,26	0,33	0,27	6,28	10,12	6,77

Окончание табл. 4

Номер гармоники, n	Коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения по фазам			Потери мощности от высших гармоник напряжения, Вт/сут		
	Ku% фаза A	Ku% фаза B	Ku% фаза C	A	B	C
15	0,01	0,07	0,07	0,01	0,48	0,48
17	0,22	0,16	0,29	4,92	2,60	8,54
19	0,14	0,2	0,11	2,08	4,24	1,28
23	0,16	0,15	0,24	2,94	2,58	6,61
25	0,05	0,13	0,03	0,30	2,01	0,11
29	0,2	0,2	0,26	5,08	5,08	8,59
31	0,04	0,06	0,05	0,21	0,47	0,33
35	0,04	0,01	0,04	0,22	0,01	0,22
37	0	0,02	0	0,00	0,06	0,00
Итого, Вт/сут				1162,58	1016,80	1261,97
Итого тыс. кВт · ч/год				1,26		
Итого т у. т.				0,35		

Потери активной мощности по фазам для всех подстанций и средние значения коэффициентов искажения синусоидальности напряжения приведены в табл. 5, а их зависимости на рис. 6.

Таблица 5

Потери активной мощности по фазам для всех подстанций и средние значения коэффициентов искажения синусоидальности напряжения

Подстанция	Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, %			Потери активной мощности от несинусоидальности напряжения, Вт/сут		
	A	B	C	A	B	C
Подстанция № 1	2,53	2,47	2,44	620,97	558,11	547,15
Подстанция № 2	1,02	1,46	0,92	501,58	598,88	449,04
Подстанция № 3	1,06	0,9	0,58	109,09	75,92	23,78
Подстанция № 4	2,85	2,91	3,05	1162,58	1016,80	1261,97

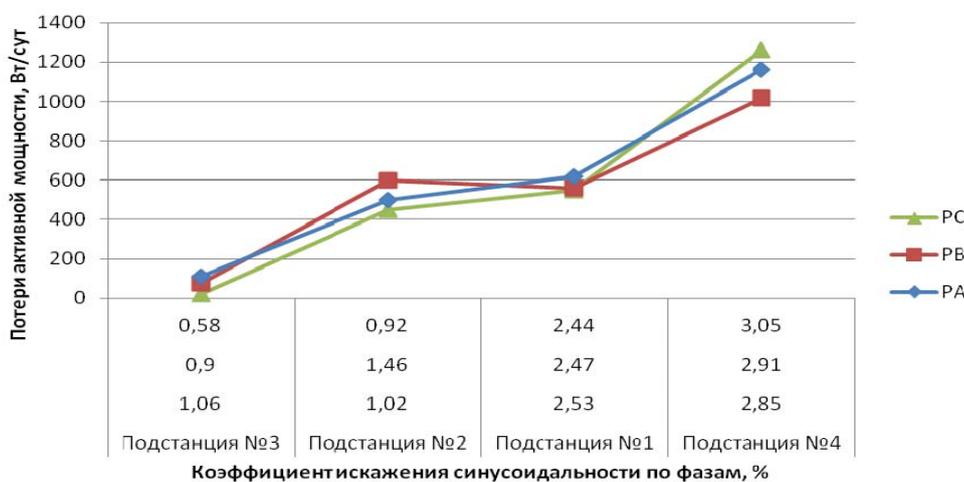


Рис. 6. Зависимость потерь активной мощности от коэффициентов искажения синусоидальности напряжения

Из анализа рис. 5 следует, что с повышением коэффициента искажения синусоидальности возрастают потери активной мощности в трансформаторе. Если дополнительными потерями ХХ, вызванными искажением синусоидальности, можно пренебречь, так как их величина не превышает 1 % от потерь КЗ, то дополнительные потери активной мощности составляют в данном случае от 2 (подстанция № 2) до 32 % (подстанция № 4) от $P_{кз}$.

Заключение

В настоящее время потери электрической энергии включаются в состав технических потерь энергоснабжающей организации, хотя качество электрической энергии портят чаще всего ее потребители.

Анализ экспериментальных данных коэффициентов n -х гармонических составляющих позволяет сделать вывод, что несинусоидальность напряжения приводит к дополнительным потерям ХХ в трансформаторах системных подстанций 10 кВ. При этом в спектре гармонических составляющих напряжения в основном преобладают нечетные гармоники (3-я, 5-я, 7-я, 9-я, 11-я, 13-я, 15-я), которые на 5–10 % превышают нормально-допустимое значение по всем трем фазам.

Дополнительные потери активной мощности в трансформаторах рассмотренных четырех системных подстанций с повышением коэффициента искажения синусоидальности возрастают и составляют от 2 (подстанция № 2) до 32 % (подстанция № 4) от мощности КЗ, следовательно, они должны учитываться при оценке потерь электроэнергии по показателям качества.

Литература

1. Куличенков, В. П. Как уменьшить потери электроэнергии / В. П. Куличенков // Энергет. стратегия. – 2010. – № 3 (15). – С. 20–24.
2. Степанов, В. М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии / В. М. Степанов, И. М. Базыль // Изв. Тул. гос. ун-та. – 2013. – № 12-2. – С. 27–31.
3. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : рук. для практ. расчетов / Ю. С. Железко. – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.
4. Енин, А. С. Снижение потерь электроэнергии в системах электроснабжения / А. С. Енин, К. Б. Корнеев, Т. И. Узикова. – Режим доступа: <http://eprints.tstu.tver.ru/62/1/1.pdf>. – Дата доступа 17.10.2014.
5. ГОСТ 13109–97. Межгосударственный стандарт: электрическая энергия, совместимость технических средств электромагнитная, нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / под ред. И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

Получено 24.02.2015 г.