

# Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии в системах электроснабжения

## Методические указания по выполнению контрольной работы по разделу «Несинусоидальность напряжения»

Напряжение в электрических сетях не является идеально синусоидальным по форме, оно всегда в большей или меньшей степени искажено действием нелинейных потребителей, доля которых в общем балансе электроприемников постоянно возрастает. В соответствии с ГОСТ 32144-2013 несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

- коэффициентами гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ ;
- суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения  $K_U$ .

Предпосылкой для применения этих показателей является так называемый спектральный подход, основанный на представлении несинусоидальных напряжений и токов рядами Фурье. В частности, для напряжения

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^N U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая;

$U_{nm}$ ,  $\varphi_n$  – амплитуда и начальная фаза гармонической составляющей (гармоники)  $n$ -го порядка;

$N$  – порядок (номер) последней из учитываемых высших гармоник.

Гармоника с номером  $n = 1$ , частота которой соответствует частоте сети, называется первой или основной, остальные – высшими гармониками (или гармоническими составляющими). В трехфазных сетях предприятий практически всегда  $U_0 = 0$ .

Совокупность амплитуд  $U_{nm}$  и фаз  $\varphi_n$  образует амплитудный и фазовый спектры. Для решения практических задач основное значение имеет амплитудный спектр частот, называемый для краткости просто спектром.

Спектр может быть представлен в виде решетчатого графика, ординатами которого являются значения коэффициентов гармонических составляющих  $K_{U(n)}$  для номеров гармоник  $n$ .

Коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения рассчитывается как отношение действующего значения  $n$ -й гармоники к действующему значению первой гармоники

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения определяется как отношение действующего значения высших гармоник к действующему значению  $U_1$  основной гармоники

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% , \quad (3)$$

где  $U_1$  – действующее значение основной гармоники напряжения, В (кВ).

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 необходимо учитывать высшие гармоники с номерами от 2 до 40.

Из (2) и (3) нетрудно показать, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения может быть найден по формуле

$$K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^N K_{U(n)}^2} . \quad (4)$$

Действующее значение напряжения  $u(t)$  находится как среднеквадратичное значение действующих значений всех гармонических составляющих

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2} . \quad (5)$$

Формулу (5) можно записать следующим образом

$$U = U_1 \sqrt{1 + (K_U / 100)^2} . \quad (6)$$

**Пример.** Результаты проведенных измерений показали, что кривая сетевого напряжения содержит нечетные гармоники с 1-й по 9-ю, начальные фазы которых равны нулю, а действующие значения равны соответственно 210, 16, 8.5, 6.7 и 5.6 В.

Коэффициенты гармонических составляющих напряжения в соответствии с (2) будут равны

$$K_{U(3)} = \frac{U_3}{U_1} \cdot 100\% = \frac{16}{210} \cdot 100\% = 7,61\% ;$$

$$K_{U(5)} = \frac{U_5}{U_1} \cdot 100\% = \frac{8,5}{210} \cdot 100\% = 4,05\% ;$$

$$K_{U(7)} = \frac{U_7}{U_1} \cdot 100\% = \frac{6,7}{210} \cdot 100\% = 3,19\%;$$

$$K_{U(9)} = \frac{U_9}{U_1} \cdot 100\% = \frac{5,6}{210} \cdot 100\% = 2,67\%.$$

Используя полученные значения коэффициентов, построим спектр напряжения (рис. 1). Для первой гармоники напряжения значение 100 % на графике не отображаем.



Рис. 1. Спектр напряжения

С помощью формулы (4) найдем, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

$$K_U = \sqrt{7,61^2 + 4,05^2 + 3,19^2 + 2,67^2} = 9,57\%.$$

По формуле (6) рассчитаем действующее значение кривой напряжения

$$U = 210 \sqrt{1 + (9,57 / 100)^2} = 210,96 \text{ В}.$$

Проанализируем полученные результаты на предмет их соответствия требованиям ГОСТ 32144-2013 на качество электроэнергии. Для этого внесем их в таблицу 1, в которой приведены также нормируемые значения показателей. Заметим, что рассматриваемый пример относится к сетям 0,38 кВ. Поэтому данные о нормируемых значениях берем из таблиц 1, 2 и 4 указанного стандарта для напряжения 0,38 кВ. Соответствие параметра отмечено знаком (+), несоответствие – знаком (–)

Таблица 1. Пример расчета

Показатель	$K_{U(3)},\%$	$K_{U(5)},\%$	$K_{U(7)},\%$	$K_{U(9)},\%$	$K_U,\%$
Нормируемое значение	5,0	6,0	5,0	1,5	8,0
Измеренное значение	7,61	4,05	3,19	2,67	9,57
Результат сравнения	–	+	+	–	–

Вывод. Коэффициенты гармоник с номерами 3 и 9, а также суммарный коэффициент гармоник превышают нормируемые значения. Вследствие этого анализируемая кривая напряжения не соответствует требованиям ГОСТ Р 54149-2010 на качество электроэнергии.

### Задание

В таблице 2 приведены действующие значения гармонических составляющих, содержащихся в кривой анализируемого напряжения (столбцы 3 – 10), а также номинальное напряжение в сети (столбец 2).

Требуется:

1. Рассчитать коэффициенты гармонических составляющих напряжения.
2. Построить спектр напряжения.
3. Рассчитать суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.
4. Рассчитать действующее значение кривой напряжения.
5. Сравнить рассчитанные показатели с нормируемыми значениями и сделать вывод о соответствии анализируемого напряжения требованиям стандарта.
6. Сравнить рассчитанное значение напряжения с номинальным значением и дать заключение о соответствии отклонения напряжения требованиям ГОСТ 32144-2013.

Таблица 2. Варианты заданий

№ вари- анта	$U_{ном}, B$	$U_1, B$	$U_3, B$	$U_5, B$	$U_7, B$	$U_9, B$	$U_{11}, B$	$U_{13}, B$	$U_{15}, B$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	220	200	0	8	6	1	1	0,4	0,1
2	380	360	16	0	14	2	1,5	0,5	0,2
3	660	640	22	12	0	3	2	1	0,3
4	6000	6100	240	130	100	0	30	13	12
5	10000	10000	450	340	130	45	0	15	11
6	35000	34000	1200	910	450	130	110	0	45
7	220	210	8	11	7	1	1	0,3	0
8	380	370	0	17	12	1	2	0,7	0,1
9	660	650	18	0	15	0,8	0,4	1	0,5
10	6000	6300	270	120	0	32	100	12	1
11	10000	10500	480	310	120	0	57	23	2
12	35000	33000	1000	820	350	67	0	58	8
13	220	210	19	12	18	1	1	0	1
14	380	400	20	15	23	7	4	2	0
15	660	570	0	13	23	2	1	2	1
16	6000	6500	300	0	45	22	12	7	2
17	10000	11000	540	370	0	70	120	88	9
18	35000	36000	1000	850	350	0	67	58	8
19	220	230	10	55	23	3	0	2	3
20	380	400	33	28	18	9	2	0	2
21	660	690	30	67	24	12	23	1	0
22	6000	6900	0	170	110	89	34	12	10
23	10000	11200	510	0	230	80	78	100	7
24	35000	36300	1060	880	0	67	14	22	8
25	220	185	0	12	8	4	3	0,8	0,2
26	380	342	16	0	14	2	1,5	0,5	0,2
27	660	625	22	12	0	3	2	1	0,3
28	6000	5900	240	130	100	0	30	13	12
29	10000	11000	650	540	330	45	0	15	11
30	35000	36000	1100	1010	550	130	210	0	45
31	220	240	8	11	7	1	1	0,3	0
32	380	390	0	19	16	5	2	0,14	0,1
33	660	680	18	0	18	0,8	0,4	1	0,5
34	6000	6300	300	220	0	42	100	18	1

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
35	10000	11000	680	310	120	0	77	23	2
36	35000	33000	1500	820	650	67	0	86	8
37	220	190	9	12	28	1	5	0	1
38	380	400	40	15	63	7	14	2	0
39	660	590	0	33	23	12	1	2	1
40	6000	6500	400	0	65	22	32	7	2
41	10000	11000	580	570	0	170	120	88	9
42	35000	36000	1000	1200	350	0	96	58	8
43	220	230	16	75	23	3	0	4	3
44	380	400	54	28	48	9	6	0	2
45	660	690	30	87	24	42	23	1	0
46	6000	6900	0	170	110	89	34	12	10
47	10000	11200	710	0	230	80	98	100	7
48	35000	38300	1060	880	0	87	14	42	8

### Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.

2. Артюхов И.И. Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии в системах электроснабжения // И.И. Артюхов, И.И. Бочкарева, А.Г. Сошинов. – Саратов: Издательский Дом «Райт-Экспо», 2013. – 96 с.

3. Вагин Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 224 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Порядок гармонической составляющей $n$	Значения коэффициентов $K_{U(n)}$ , %, нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем для напряжения электрической сети			
	0,38 кВ	6-25 кВ	35 кВ	110-220 кВ
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
17	2,0	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
2	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
>25	-	-	-	-

Таблица П2

Порядок гармонической составляющей $n$	Значения коэффициентов $K_{U(n)}$ , %, нечетных гармонических составляющих напряжения, кратных трем для напряжения электрической сети			
	0,38 кВ	6-25 кВ	35 кВ	110-220 кВ
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
>21	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица П3

Порядок гармонической составляющей $n$	Значения коэффициентов напряжения $K_{U(n)}$ , %, четных гармонических составляющих для напряжения электрической сети			
	0,38 кВ	6-25 кВ	35 кВ	110-220 кВ
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
>12	0,2	0,2	0,2	-

Таблица П4

Значения суммарных коэффициентов $K_U$ , %, гармонических составляющих напряжения в течение 95 % времени интервала в одну неделю для напряжения электрической сети			
0,38 кВ	6-25 кВ	35 кВ	110-220 кВ
8,0	5,0	4,0	2,0

Таблица П5

Значения суммарных коэффициентов $K_U$ , %, гармонических составляющих напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю для напряжения электрической сети			
0,38 кВ	6-25 кВ	35 кВ	110-220 кВ
12,0	8,0	6,0	3,0