

УДК 621.316.1

UDC 621.316.1

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРАХ 10/0,4 кВ**

**THE ADDITIONAL LOSSES OF THE
ELECTRIC POWER IN THE 10/0.4 KV POWER
TRANSFORMERS**

Юндин Михаил Анатольевич
к.т.н., профессор кафедры ТОЭ и ЭСХ

Yundin Michael Anatolievich
Cand.Tech.Sci., professor of the chair of Theory of
electrical engineering and power supply of agriculture

Ханин Юрий Иванович
аспирант кафедры ТОЭ и ЭСХ
*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВПО ДГАУ в г. Зернограде, Россия*

Hanin Yuri Ivanovich
post-graduate student of the chair of Theory of
electrical engineering and power supply of agriculture
*Azov-Black Sea Engineering Institute, Zernograd,
Russia*

Приведены результаты расчета составляющих
нагрузочных потерь электроэнергии в силовых
трансформаторах 10/0,4 кВ сельских коммунально-
бытовых сетей 0,38 кВ. Статистически обработаны
доли дополнительных потерь электроэнергии в
силовых трансформаторах 10/0,4 кВ

The results of calculation of the constituents of load
losses of the electric power in the 10/0.4kV power
transformers of the rural household networks of 0.38
kV. Proportions of additional losses of the electric
power in the 10/0.4kV power transformers are
statistically processed

Ключевые слова: ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ,
СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ, СЕЛЬСКИЕ
КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫЕ СЕТИ 0,38 кВ,
РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ, НЕСИММЕТРИЯ
ТОКОВ, ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ТОКА

Keywords: ELECTRIC POWER LOSSES, POWER
TRANSFORMER, RURAL HOUSEHOLD
NETWORK OF 0.38KV, REACTIVE POWER,
UNBALANCE CURRENT, HARMONICS
CURRENTS

Политика нашего государства в данный момент направлена на энергосбережение и повышение энергоэффективности [1]. К 2020 году ставится цель значительного снижения потерь электроэнергии и повышения эффективности расхода энергоресурсов. В сельских электрических сетях наиболее распространены трансформаторы с соединением обмоток «звезда – звезда с нулем», которые обладают высоким сопротивлением нулевой последовательности. Часть дополнительных потерь электроэнергии в сети 0,38 кВ происходит в силовом трансформаторе (СТ) 10/0,4 кВ. Так как нагрузка в сельской коммунально-бытовой сети является несимметричной и с каждым годом количество нелинейных нагрузок, генерирующих в электрическую сеть высшие гармоники тока, увеличивается, применяемые СТ становятся малоэффективными.

С целью анализа структуры потерь электроэнергии в СТ, посредством сертифицированных анализаторов качества электроэнергии «Hioki 3196», «Энергомонитор 3.3 Т» и «Энергомонитор 3.3» на вводе 0,4 кВ были получены суточные базы данных об основных электрических величинах с минутным усреднением. Исследованы 28 вводов 0,4 кВ ТП 10/0,4 кВ, питающих коммунально-бытовую нагрузку, и получены 37 суточных баз данных. По полученным данным были рассчитаны суточные потери электроэнергии в СТ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем», зависящие от нагрузки.

Нагрузочные потери электроэнергии в СТ можно разложить на составляющие [2]:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{IAKT} + \Delta W_{Д.Н} + \Delta W_{Д.ВГ} + \Delta W_{Д.РМ},$$

где ΔW_{IAKT} – активные потери электроэнергии в СТ, то есть потери электроэнергии в обмотках СТ от протекания активного тока прямой последовательности основной гармоники, Вт·ч;

$\Delta W_{Д.Н}$ – дополнительные потери электроэнергии в СТ из-за несимметрии токов, Вт·ч.

$\Delta W_{Д.ВГ}$ – дополнительные потери электроэнергии в СТ от протекания по сети токов высших гармоник, Вт·ч.

$\Delta W_{Д.РМ}$ – дополнительные потери электроэнергии в СТ от протекания по сети реактивного тока прямой последовательности основной гармоники, Вт·ч.

Первая составляющая – активные потери электроэнергии в СТ представляют собой потери необходимые для передачи электроэнергии и равны

$$\Delta W_{IAKT} = 3 \cdot \sum (I_1 \cdot \cos(\varphi_1))^2 \cdot r_{кз} \cdot \Delta t,$$

где I_1 – ток прямой последовательности основной частоты, А;

φ_1 – угол между током и напряжением прямой последовательности основной частоты, град;

$r_{кз}$ – сопротивление короткого замыкания трансформатора для прямой последовательности основной частоты, Ом;

Δt – интервал времени, в течение которого действует токовая нагрузка, $\Delta t = 1/60$ ч.

В тех случаях, когда не было непосредственно измеренного значения угла между током и напряжением прямой последовательности основной частоты φ_1 , угол определялся как среднее арифметическое углов между током и напряжением трех фаз:

$$\varphi_1 = (\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C)/3,$$

где, $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$, – углы между током и напряжением фаз А, В и С, град;

Три оставшихся составляющих нагрузочных потерь электроэнергии не обоснованы передачей активной мощности и являются дополнительными потерями электроэнергии:

$$\Delta W_D = \Delta W_{D.H} + \Delta W_{D.BГ} + \Delta W_{D.PM},$$

где ΔW_D – дополнительные потери электроэнергии в СТ, Вт·ч.

В дополнительные потери электроэнергии в СТ из-за несимметрии токов, включались потери электроэнергии в обмотках СТ от протекания токов обратной и нулевой последовательностей основной гармоники [3]:

$$\Delta W_{D.H} = \Delta W_2 + \Delta W_0,$$

где $\Delta W_2 = 3 \cdot \sum I_2^2 \cdot r_{кз} \cdot \Delta t$ – потери электроэнергии от протекания тока обратной последовательности основной гармоники, Вт·ч;

$\Delta W_0 = 3 \cdot \sum I_0^2 \cdot r_{0кз} \cdot \Delta t$ – потери электроэнергии от протекания тока нулевой последовательности основной гармоники, Вт·ч;

I_2, I_0 – токи обратной и нулевой последовательностей основной частоты, соответственно, А;

$r_{0кз}$ – сопротивление короткого замыкания СТ для нулевой последовательности основной частоты, для СТ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем» $r_{0кз} = (9 \div 11) \cdot r_{кз}$, Ом.

Дополнительные потери электроэнергии в СТ от протекания по сети токов высших гармоник рассчитывались как:

$$\Delta W_{д.вг} = \sum \Delta W_{(v)},$$

где v – номер соответствующей гармоники;

$\Delta W_{(v)} = \Delta W_{A(v)} + \Delta W_{B(v)} + \Delta W_{C(v)} + \Delta W_{N(v)}$ – потери электроэнергии в СТ от протекания токов v -ой гармоники, Вт·ч;

$\Delta W_{A(v)}$, $\Delta W_{B(v)}$, $\Delta W_{C(v)}$ – потери электроэнергии в соответствующем фазном проводнике от протекания тока v -ой гармоники, Вт·ч;

$\Delta W_{N(v)}$ – потери электроэнергии в нулевом проводнике от протекания тока v -ой гармоники, Вт·ч.

Потери электроэнергии в фазных и нулевом проводах для СТ от протекания высших гармоник тока оценивались выражениями [4]:

$$\Delta W_{\Phi(v)} = 3 \cdot \sum I_{\Phi(v)}^2 \cdot r_{кз} \cdot \Delta t \cdot k_{(v)} \cdot (1 + 0,05 \cdot v^2),$$

$$\Delta W_{N(v)} = 3 \cdot \sum I_{N(v)}^2 \cdot r_{кзN} \cdot \Delta t \cdot k_{(v)} \cdot (1 + 0,05 \cdot v^2),$$

где $I_{\Phi(v)}$, $I_{N(v)}$ – токи соответствующего фазного и нулевого провода, А;

$r_{кзN}$, – сопротивления нулевого провода силового трансформатора, для СТ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем» $r_{кзN} = 3 \cdot r_{кз}$, Ом;

$k_{(v)} = 0,47 \cdot \sqrt{v}$ – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости;

$1 + 0,05 \cdot v^2$ – коэффициент, учитывающий потери от вихревых токов высших гармоник в магнитопроводе трансформатора.

Для снижения трудоемкости расчетов дополнительные потери электроэнергии в СТ от токов высших гармоник рассчитывались для

наиболее значимых гармоник. Среди наиболее значимых гармоник установлены «3-я», «5-я», «7-я» и «9-я», на их долю приходится в среднем 96% величины действующего значения тока высших гармоник.

Дополнительные потери в СТ от протекания по сети реактивного тока прямой последовательности основной гармоники определялись как:

$$\Delta W_{Д.РМ} = 3 \cdot \sum (I_1 \cdot \sin(\varphi_1))^2 \cdot r_{кз} \cdot \Delta t.$$

В таблице 1 представлены значения отпуска электроэнергии в сеть W и потерь электроэнергии в СТ за сутки. В таблице 2 представлены доли составляющих потерь электроэнергии в СТ, отнесенные к суммарным потерям электроэнергии в СТ.

Таблица 1 – Значения отпуска электроэнергии в сеть и потерь электроэнергии в СТ за сутки

№ ТП ----- Номинальная мощность	W, Вт·ч / %	ΔW_{Σ} , Вт·ч / %			
		ΔW_{IAKT} , Вт·ч / %	$\Delta W_{\text{Д}}$, Вт·ч / %		
			$\Delta W_{\text{Д.ВГ}}$, Вт·ч / %	$\Delta W_{\text{Д.Н}}$, Вт·ч / %	$\Delta W_{\text{Д.РМ}}$, Вт·ч / %
1	2	3	4	5	6
1 ----- 250 кВА	221698 / 100	125 / 0,056	23 / 0,010	105 / 0,048	57 / 0,026
			185 / 0,083		
			310 / 0,140		
2 ----- 400 кВА	374336 / 100	210 / 0,056	37 / 0,010	50 / 0,013	23 / 0,006
			110 / 0,029		
			319 / 0,085		
3 ----- 100 кВА	309670 / 100	769 / 0,248	147 / 0,047	646 / 0,208	162 / 0,052
			955 / 0,308		
			1724 / 0,557		
4 ----- 400 кВА	872864 / 100	941 / 0,108	19 / 0,002	635 / 0,073	92 / 0,011
			747 / 0,086		
			1688 / 0,193		
5 ----- 160 кВА	1147533 / 100	5139 / 0,448	890 / 0,078	2094 / 0,182	1226 / 0,107
			4210 / 0,367		
			9349 / 0,815		
6 ----- 100 кВА	621558 / 100	3293 / 0,530	272 / 0,044	1665 / 0,268	410 / 0,066
			2347 / 0,378		
			5640 / 0,907		
7 ----- 100 кВА	775492 / 100	5307 / 0,684	272 / 0,044	1665 / 0,268	410 / 0,066
			2347 / 0,378		
			8369 / 1,079		

8 ----- 250 кВА	738369 / 100	1462 / 0,198	265 / 0,034	1796 / 0,232	1001 / 0,129
3062 / 0,395					
2142 / 0,290					
9 ----- 250 кВА	555269 / 100	779 / 0,140	83 / 0,011	328 / 0,044	269 / 0,036
680 / 0,092					
1186 / 0,214					
10 ----- 160 кВА	1392194 / 100	8503 / 0,611	101 / 0,018	79 / 0,014	227 / 0,041
407 / 0,073					
12108 / 0,870					
11 ----- 100 кВА	1457986 / 100	17810 / 1,222	174 / 0,012	724 / 0,052	2708 / 0,195
3605 / 0,259					
24819 / 1,702					
12 ----- 250 кВА	629095 / 100	1002 / 0,159	315 / 0,022	1414 / 0,097	5280 / 0,362
7009 / 0,481					
1461 / 0,232					
13 ----- 250 кВА	567890 / 100	827 / 0,146	111 / 0,018	123 / 0,020	225 / 0,036
460 / 0,073					
/ 0,216					
14 ----- 160 кВА	585340 / 100	1272 / 0,217	107 / 0,019	93 / 0,016	197 / 0,035
397 / 0,070					
1225 3133 / 0,535					
15 ----- 400 кВА	1734728 / 100	4675 / 0,270	146 / 0,025	912 / 0,156	803 / 0,137
1861 / 0,318					
5978 / 0,345					
16 ----- 400 кВА	474611 / 100	324 / 0,068	144 / 0,008	174 / 0,010	984 / 0,057
1303 / 0,075					
588 / 0,124					
17 ----- 400 кВА	450428 / 100	309 / 0,069	18 / 0,004	180 / 0,038	66 / 0,014
264 / 0,056					
535 / 0,119					
18 ----- 400 кВА	474179 / 100	341 / 0,072	13 / 0,003	142 / 0,031	71 / 0,016
225 / 0,050					
587 / 0,124					
19 ----- 400 кВА	1775058 / 100	4550 / 0,256	16 / 0,003	146 / 0,031	85 / 0,018
246 / 0,052					
7264 / 0,409					
20 ----- 400 кВА	1554428 / 100	3497 / 0,225	292 / 0,019	1174 / 0,076	1012 / 0,065
2478 / 0,159					
5975 / 0,384					
21 ----- 400 кВА	1012405 / 100	1564 / 0,154	115 / 0,011	127 / 0,013	361 / 0,036
604 / 0,060					
2167 / 0,214					
22 ----- 100 кВА	1030634 / 100	8440 / 0,819	379 / 0,037	1508 / 0,146	3119 / 0,303
5006 / 0,486					
13446 / 1,305					
23 ----- 100 кВА	1039587 / 100	8663 / 0,833	358 / 0,034	1274 / 0,123	3401 / 0,327
5033 / 0,484					
13696 / 1,317					

24 ----- 400 кВА	1099683 / 100	1765 / 0,160	200 / 0,018	566 / 0,051	559 / 0,051
1325 / 0,121					
3090 / 0,281					
25 ----- 400 кВА	1087547 / 100	1713 / 0,158	195 / 0,018	620 / 0,057	585 / 0,054
1400 / 0,129					
3113 / 0,286					
26 ----- 400 кВА	1056315 / 100	1662 / 0,157	201 / 0,019	723 / 0,068	615 / 0,058
1539 / 0,146					
3201 / 0,303					
27 ----- 160 кВА	1287570 / 100	6603 / 0,513	65 / 0,005	3520 / 0,273	2789 / 0,217
6374 / 0,495					
12977 / 1,008					
28 ----- 40 кВА	205827 / 100	1041 / 0,506	124 / 0,060	423 / 0,206	478 / 0,232
1025 / 0,498					
2065 / 1,003					
29 ----- 40 кВА	207033 / 100	987 / 0,477	93 / 0,045	537 / 0,259	468 / 0,226
1098 / 0,530					
2085 / 1,007					
30 ----- 100 кВА	527687 / 100	2369 / 0,449	197 / 0,037	550 / 0,104	574 / 0,109
1321 / 0,250					
3690 / 0,699					
31 ----- 250 кВА	444582 / 100	507 / 0,114	132 / 0,030	609 / 0,137	145 / 0,033
886 / 0,199					
1393 / 0,313					
32 ----- 250 кВА	882764 / 100	1827 / 0,207	129 / 0,015	1599 / 0,181	438 / 0,050
2167 / 0,245					
3993 / 0,452					
33 ----- 400 кВА	1585931 / 100	3732 / 0,235	625 / 0,039	395 / 0,025	695 / 0,044
1715 / 0,108					
5447 / 0,343					
34 ----- 250 кВА	793248 / 100	1662 / 0,210	176 / 0,022	210 / 0,027	326 / 0,041
712 / 0,090					
2374 / 0,299					
35 ----- 250 кВА	555512 / 100	846 / 0,152	147 / 0,026	323 / 0,058	123 / 0,022
593 / 0,107					
1439 / 0,259					
36 ----- 250 кВА	511083 / 100	616 / 0,121	56 / 0,011	265 / 0,052	63 / 0,012
384 / 0,075					
1000 / 0,196					
37 ----- 250 кВА	103529 / 100	25 / 0,024	12 / 0,012	48 / 0,046	7 / 0,006
67 / 0,065					
92 / 0,089					

Таблица 2 – Доли составляющих потерь электроэнергии в СТ, отнесенные к суммарным потерям, %

№ ТП	Номинальная мощность, кВА	Доли потерь электроэнергии от суммарных, %				
		ΔW_{IAKT} , %	ΔW_D , %	$\Delta W_{Д.ВГ}$, %	$\Delta W_{Д.Н}$, %	$\Delta W_{Д.РМ}$, %
1	250	40,3	59,7	7,4	34,0	18,3
2	400	65,7	34,3	11,5	15,7	7,1
3	100	44,6	55,4	8,5	37,5	9,4
4	400	55,8	44,2	1,1	37,7	5,5
5	160	55,0	45,0	9,5	22,4	13,1
6	100	58,4	41,6	4,8	29,5	7,3
7	100	63,4	36,6	3,2	21,5	12,0
8	250	68,2	31,8	3,9	15,3	12,6
9	250	65,7	34,3	8,5	6,7	19,2
10	160	70,2	29,8	1,4	6,0	22,4
11	100	71,8	28,2	1,3	5,7	21,3
12	250	68,5	31,5	7,6	8,4	15,4
13	250	67,5	32,5	8,8	7,6	16,1
14	160	40,6	59,4	4,6	29,1	25,6
15	400	78,2	21,8	2,4	2,9	16,5
16	400	55,1	44,9	3,0	30,7	11,2
17	400	57,8	42,2	2,4	26,5	13,2
18	400	58,1	41,9	2,6	24,8	14,4
19	400	62,6	37,4	3,4	18,3	15,7
20	400	58,5	41,5	4,9	19,6	16,9
21	400	72,1	27,9	5,3	5,9	16,7
22	100	62,8	37,2	2,8	11,2	23,2
23	100	63,3	36,7	2,6	9,3	24,8
24	400	57,1	42,9	6,5	18,3	18,1
25	400	55,0	45,0	6,3	19,9	18,8
26	400	51,9	48,1	6,3	22,6	19,2
27	160	50,9	49,1	0,5	27,1	21,5
28	40	50,4	49,6	6,0	20,5	23,1
29	40	47,4	52,6	4,4	25,7	22,5
30	100	64,2	35,8	5,3	14,9	15,5
31	250	36,4	63,6	9,5	43,7	10,4
32	250	45,7	54,3	3,2	40	11
33	400	68,5	31,5	11,5	7,3	12,8
34	250	70	30	7,4	8,9	13,7
35	250	58,8	41,2	10,2	22,4	8,5
36	250	61,6	38,4	5,6	26,5	6,3
37	250	26,9	73,1	13,5	52,4	7,1

Доли составляющих потерь электроэнергии в СТ были статистически обработаны. Гипотеза о нормальном законе распределения значений переменных была подтверждена по критерию Шапиро-Уилка, следовательно, для долей составляющих потерь электроэнергии в СТ можно определить абсолютную Δx при надежности $\alpha=0,95$ и относительную ε погрешности усреднения, результаты статистической обработки отражены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты статистических исследований составляющих потерь электроэнергии в СТ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем», %

Наименование величины	Доли потерь электроэнергии от суммарных, %				
	$\Delta W_{IAKT}, \%$	$\Delta W_D, \%$	$\Delta W_{D.BG}, \%$	$\Delta W_{D.H}, \%$	$\Delta W_{D.PM}, \%$
Среднее значение	58,1	41,9	5,6	21,0	15,3
Минимальное	26,9	21,8	0,5	2,9	5,5
Максимальное	78,2	73,1	13,5	52,4	25,6
Дисперсия	123,5	123,5	10,6	144,3	31,0
Стандартное отклонение	11,1	11,1	3,3	12,0	5,6
Δx при $\alpha=0,95$	3,7	3,7	1,1	4,0	1,9
$\varepsilon, \%$	6,4	8,8	19,3	19,1	12,1

Вычисления показали, что дополнительные потери электроэнергии в СТ соизмеримы с активными потерями электроэнергии, а на многих выводах даже превышают их. Проанализировав усредненные доли потерь электроэнергии в СТ можно заключить, что наибольшие дополнительные потери возникают из-за несимметрии токов, несколько меньший вклад вносят дополнительные потери от протекания по сети реактивного тока прямой последовательности основной гармоники, наименьшая доля приходится на дополнительные потери электроэнергии от протекания по сети токов высших гармоник.

Выводы:

1. В силовом трансформаторе 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем» при одновременном воздействии несимметричных токов, высших гармоник тока и избыточной реактивной мощности общие дополнительные потери электроэнергии составляют $(41,9 \pm 3,7)\%$; при $\varepsilon = 8,8\%$; $\alpha = 0,95$ от нагрузочных потерь электроэнергии.

2. В силовом трансформаторе 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем» при одновременном воздействии несимметричных токов, высших гармоник тока и избыточной реактивной мощности доля дополнительных потерь электроэнергии из-за несимметрии токов равна $(21,0 \pm 4,0)\%$; при $\varepsilon = 19,1\%$; $\alpha = 0,95$ от нагрузочных потерь электроэнергии.

3. В силовом трансформаторе 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем» при одновременном воздействии несимметричных токов, высших гармоник тока и избыточной реактивной мощности на долю дополнительных потерь электроэнергии от протекания реактивного тока прямой последовательности основной гармоники приходится $(15,3 \pm 1,9)\%$; при $\varepsilon = 12,1\%$; $\alpha = 0,95$ в нагрузочных потерях электроэнергии.

4. В силовом трансформаторе 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем» при одновременном воздействии несимметричных токов, высших гармоник тока и избыточной реактивной мощности на долю дополнительных потерь электроэнергии от протекания токов высших гармоник приходится $(5,6 \pm 1,1)\%$; при $\varepsilon = 19,3\%$; $\alpha = 0,95$ в нагрузочных потерях электроэнергии.

Литература

1. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Текст]: федер. закон N 261-ФЗ : [принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.: одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 г.].

2. Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке: [пер. с чешск.] / Р. Дрехслер.– Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 112с.

3. Косоухов Ф.Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях [Текст] / Ф.Д. Косоухов, И.В. Наумов. – Иркутск, 2003 – 260 с.

4. Жежеленко И.В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения [Текст] / И.В. Жежеленко // Электрика. – 2010. – № 4.– С. 3–6.

References

1. Rossijskaja Federacija. Zakony. Ob jenergosberezhenii i o povyshenii jenergeticheskoj jeffektivnosti i o vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatел'nye акты Rossijskoj Federacii [Текст]: feder. zakon N 261-FZ : [prinjat Gos. Dumoj 11 nojabrja 2009 g.: odobr. Sovetom Federacii 18 nojabrja 2009 g.].

2. Drehsler, R. Izmerenie i ocenka kachestva jelektrojenergii pri nesimmetrichnoj i nelinejnoj nagruzke: [per. s cheshsk.] / R. Drehlesr.– Moskva: Jenergoatomizdat, 1985. – 112s.

3. Kosouhov F.D. Nesimmetrija naprjazhenij i tokov v sel'skih raspredelitel'nyh setjah [Текст] / F.D. Kosouhov, I.V. Naumov. – Irkutsk, 2003 – 260 s.

4. Zhezhelenko I.V. Jelektricheskie poteri ot vysshih garmonik v sistemah jelektrosnabzhenija [Текст] / I.V. Zhezhelenko // Jelektrika. – 2010. – № 4.– S. 3–6.