

## 11. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

### 11.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО ВКЛАДА ПОТРЕБИТЕЛЯ И СИСТЕМЫ В НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА – ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Васильев И.Е., д.т.н., профессор кафедры  
«Электроснабжение промышленных предприятий»  
Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет)  
Клюев Р.В., к.т.н., зам. зав. кафедрой  
«Электроснабжение промышленных предприятий»  
Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет);  
Васильев Е.И., к.т.н., кафедра «Электроснабжение  
промышленных предприятий», Московский  
энергетический институт (технический университет)

В статье приведены результаты исследования качества электроэнергии в системе электроснабжения крупного промышленного предприятия на основе энергоаудита. Определены фактические вклады потребителя и системы в несинусоидальность напряжения в точке общего присоединения. Погрешность полученных результатов не превышает 7%.

В последние годы все большую актуальность и значимость на промышленных предприятиях, имеющих нелинейные потребители, приобретают вопросы исследования и анализа качества электроэнергии (КЭ). Для виновника ухудшения КЭ предусмотрены экономические санкции в случае несоблюдения требований [1]. В этой связи необходима разработка методики комплексной оценки КЭ, позволяющая осуществлять контроль показателей КЭ в темпе с технологическим процессом предприятия.

Одним из важнейших показателей КЭ является несинусоидальность напряжения. Имеется большое число научных публикаций, посвященных исследованию несинусоидальности [6], однако, на предприятиях ряда отраслей промышленности с большим удельным весом нелинейных нагрузок, эта проблема по настоящее время еще недостаточно проработана, и требует проведения комплексных экспериментальных исследований несинусоидальности напряжения.

Так, при проведении энергоаудита для крупнейшего предприятия цветной металлургии РСО-Алания ОАО «Электроцинк», установлено, что основными источниками искажения синусоидальности кривой напряжения и тока в системе электроснабжения (СЭС) являются 6-и и 12-и фазные вентильные преобразователи (ВК) и индукционные печи (ИЦ) [3, 4, 5].

Проблема несинусоидальности напряжения в точке общего присоединения (ТОП) определяется в наличии нелинейных или несимметричных потребителей. Если

имеется несколько нелинейных или несимметричных потребителей, подсоединенных к одному узлу, то возникает вопрос о долевом участии каждого из них в общем искажении напряжения в ТОП. Причем для каждого отдельно взятого потребителя все другие потребители входят в электрическую систему. Для того чтобы сказать, насколько виновен данный выделенный потребитель в искажении синусоидальности напряжения, необходимо определить фактический вклад потребителя и фактический вклад системы в ТОП.

Проблема определения фактического вклада потребителя (ФВП) и системы (ФВС) является не только научной проблемой, но и экономической, поскольку за ухудшения качества электроэнергии сверх оговоренных в Государственном стандарте (ГОСТ) норм положено применять разного рода санкции. Главным критерием для определения виновности в искажении синусоидальности напряжения в ТОП является соотношение между допустимым (ДВП) и ФВП потребителя. Таким образом, если ФВП найден, а ДВП задан, то можно констатировать виновность или невиновность потребителя.

Разработана методика, позволяющая вычислять результирующее сопротивление  $n$ -й гармонической составляющей  $Z_{рез(n)}$  на основе измерения параметров тока и напряжения при включении двух трансформаторов на параллельную работу в ТОП.

Современные приборы качества электроэнергии могут измерять трехфазные токи в цепи питания искажающего потребителя и трехфазные напряжения в узле подключения. Этот фактор должна учитывать любая методика определения ФВП и ФВС. На основе измеренных трехфазных токов и напряжений методика должна позволять определять фактические вклады по всем предусмотренным ГОСТ гармоническим составляющим искажения напряжения в ТОП.

Питание потребителей завода «Электроцинк» осуществляется от ГПП-110 кВ (рис. 1), на которой установлены два трансформатора мощностью 32 МВА  $T_1$  и 40 МВА  $T_2$ . В нормальном режиме трансформаторы работают раздельно, секционный МВ  $BC_1$  отключен. Важнейшим потребителем первой категории предприятия является газодувка, обеспечивающая нормальную работу всего технологического процесса завода. Для компенсации реактивной мощности электропривода газодувки – асинхронного двигателя 6 кВ мощностью 2,5 МВт – установлена батарея статических конденсаторов (БСК), мощностью 600 кВАр. При существующей схеме подключения БСК и двигателя через общий выключатель возможно аварийное отключение газодувки при срабатывании защиты БСК от высших гармонических, генерируемых в сеть 6 кВ в первую очередь мощными вентильными преобразователями, обеспечивающими электролиз цинковых растворов. Во избежание случайного отключения газодувки проведение экспериментов было разрешено только во время планового профилактического отключения газодувки [5].

С помощью анализатора электропотребления типа AR5 и прибора комплексного контроля типа ПКК-57 с классами точности 1,0 проведены измерения электрических параметров и коэффициентов искажения синусоидальности кривых токов и напряжений в СЭС сернокислотного цеха в двух режимах:

- режим 1. Питание подстанции цеха осуществляется от трансформатора  $T_2$ , секционный выключатель  $BC_1$  – отключен;
  - режим 2. Включение на параллельную работу трансформатора  $T_1$ , секционный выключатель  $BC_1$  – включен.
- В режиме 1 гистограммы изменения коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $k_{U(n)}$  (%) и тока  $k_{I(n)}$  (%), а также действующих значений  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $U_{(n)}$  (В) и тока  $I_{(n)}$  (А) приведены на рис. 2.

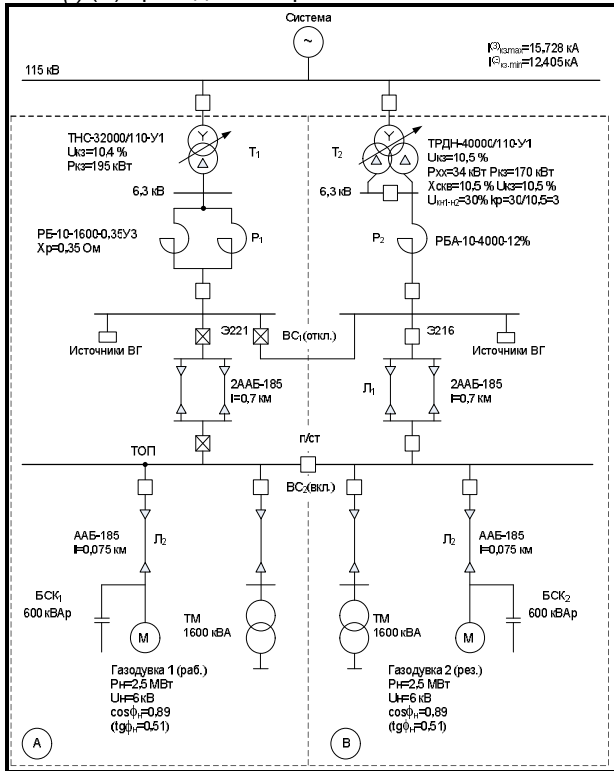


Рис. 1. Однолинейная схема СЭС сернокислотного цеха

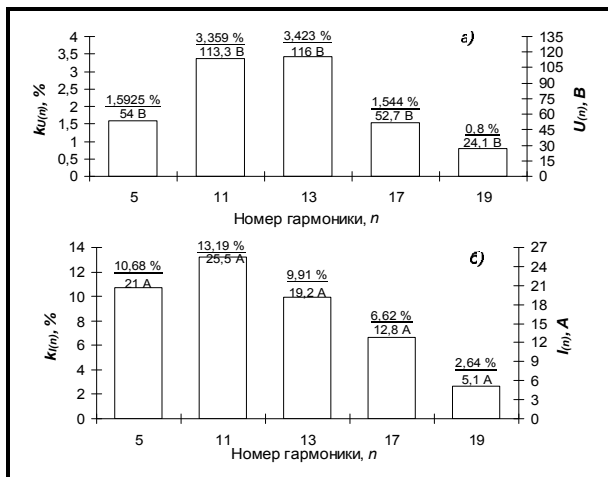


Рис. 2. Гистограммы изменения  $k_{U(n)}$ ,  $U_{(n)}$  (а);  $k_{I(n)}$ ,  $I_{(n)}$  (б)

Измерение показало наличие во всех фазах 5, 11, 13, 17, 19 гармоник по напряжению и току.

Численные характеристики выборок  $\{k_{U(n)}\}$ ,  $\{k_{I(n)}\}$  (для  $n = 5, 11, 13, 17$  и  $19$ ) приведены в табл. 1. В режиме 2 гистограммы изменения коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $k_{U(n)}$  (%) и тока  $k_{I(n)}$  (%), а также действующих значений  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $U_{(n)}$  (В) и тока  $I_{(n)}$  (А) приведены на рис. 3.

Таблица 1

ЧИСЛЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫБОРКИ  $\{K_{U(n)}\}$  и  $\{K_{I(n)}\}$

Обозн.	Сред. Знач.	ДИ для оценки		
		Ср. знач.	Дисперсии	Средн. откл.
$k_{U(5)}$ , %	10,68	10,621-10,739	0,027-0,1	0,164-0,316
$k_{I(11)}$ , %	13,19	13,115-13,265	0,0055-0,02	0,074-0,143
$k_{I(13)}$ , %	9,91	9,905-9,915	0,004-0,015	0,063-0,122
$k_{I(17)}$ , %	6,62	6,61-6,63	0,0045-0,017	0,067-0,129
$k_{U(19)}$ , %	2,64	2,564-2,725	0,02-0,072	0,14-0,268
$k_{U(5)}$ , %	1,5925	1,543-1,642	0,0074-0,027	0,086-0,165
$k_{U(11)}$ , %	3,359	3,332-3,386	0,0019-0,0071	0,044-0,084
$k_{U(13)}$ , %	3,423	3,415-3,431	0,0016-0,00595	0,04-0,077
$k_{U(17)}$ , %	1,544	1,541-1,547	0,00077-0,0028	0,028-0,053
$k_{U(19)}$ , %	0,8	0,795-0,805	0,00049-0,0018	0,022-0,043

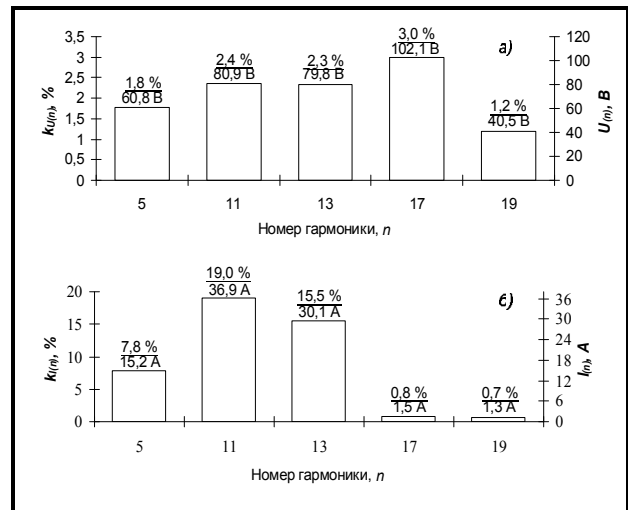


Рис. 3. Гистограммы изменения  $k_{U(n)}$ ,  $U_{(n)}$  (а)  $k_{I(n)}$ ,  $I_{(n)}$  (б)

Численные характеристики выборок  $\{k_{U(n)}\}$ ,  $\{k_{I(n)}\}$  (для  $n = 5, 11, 13, 17$  и  $19$ ) приведены в табл. 2.

Таблица 2

ЧИСЛЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫБОРКИ  $\{K_{U(n)}\}$  и  $\{K_{I(n)}\}$

Обозн.	Сред. Знач.	ДИ для оценки		
		Средн. знач.	Дисперсии	Средн. откл.
$k_{I(5)}$ , %	7,8	7,725-7,875	0,185-1,756	0,43-1,325
$k_{I(11)}$ , %	19	18,432-19,568	0,094-0,89	0,306-0,943
$k_{I(13)}$ , %	15,5	15,035-15,965	0,84-7,964	0,917-2,822
$k_{I(17)}$ , %	0,8	0,715-0,885	20,865-197,71	4,568-14,061
$k_{I(19)}$ , %	0,7	0,634-0,766	4,779-45,284	2,186-6,729
$k_{U(5)}$ , %	1,8	1,659-1,941	0,014-0,134	0,119-0,366
$k_{U(11)}$ , %	2,4	1,856-2,944	0,184-1,742	0,429-1,32
$k_{U(13)}$ , %	2,3	1,855-2,745	0,249-2,357	0,499-1,535
$k_{U(17)}$ , %	3	2,86-3,14	1,083-10,264	1,041-3,204
$k_{U(19)}$ , %	1,2	1,142-1,258	0,172-1,631	0,415-1,277

Расчетные значения коэффициентов искажения синусоидальности кривой фазных напряжений  $k_U$  по отдельным фазам для двух режимов приведены в табл. 3.

Таблица 3

РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ  $k_U$  ДЛЯ ДВУХ РЕЖИМОВ

Показатель	$k_{U_1}$	$k_{U_2}$	$k_{U_3}$
Режим 1	5,28	5,53	5,11
Режим 2	5,93	5,78	5,59

Результаты расчета результирующих сопротивлений  $n$ -й гармонической составляющей  $Z_{рез(n)}$  приведены в табл. 4.

Таблица 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ  $Z_{РЕЗ(N)}$

$n$	$U_1, В$	$U_2, В$	$\Delta U, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$\Delta I, А$	$Z_{рез(n)}, Ом$
5	54	60,8	6,8	21	15,2	-5,8	1,17
11	113,3	80,9	-32,4	25,5	36,9	11,4	2,84
13	116	79,8	-36,2	19,2	30,1	10,9	3,32
17	52,7	102,1	49,4	12,8	1,5	-11,3	4,37
19	24,1	40,5	16,4	5,1	1,3	-3,8	4,32

В табл. 4: изменения тока и напряжения равны:  $\Delta I = I_2 - I_1$ ,  $\Delta U = U_2 - U_1$  («индекс 1» – режим 1, «индекс 2» – режим 2). Результирующее сопротивление  $n$ -й гармонической составляющей [4]:

$$Z_{рез(n)} = -\frac{\Delta U(n)}{\Delta I(n)}, Ом.$$

ФВП в несинусоидальность напряжения в ТОП равен:

$$U_{ФВП} = \frac{(U_m + I_m Z_n)}{Z_c + Z_n} * Z_c,$$

где  $U_m$  – гармоническая составляющая напряжения в ТОП;

$I_m$  – гармоническая составляющая тока в цепи питания потребителя;

$Z_n$  – сопротивление линейной части нагрузки потребителя для данной гармонической составляющей ( $Z_{рез(n)}$ , табл. 4);

$Z_c$  – эквивалентное линейное сопротивление электрической системы для данной гармонической составляющей.

ФВС в несинусоидальность напряжения в ТОП определяется по выражению:

$$U_{ФВС} = \frac{(U_m - I_m Z_c)}{Z_c + Z_n} * Z_n.$$

Недостающее значение  $Z_{c(n)}$  определялось аналитически по схеме замещения рис. 1 относительно ТОП для высших гармонических (ВГ) 5, 11, 13, 17, 19 порядков. Для определения погрешности расчетов по схеме замещения также были рассчитаны значения сопротивлений потребителя для  $n$ -й гармонической составляющей  $Z_{расч(n)}$ .

В табл. 5 приведены значения  $Z_{c(n)}$ ,  $Z_{расч(n)}$ , а также результаты расчета ФВП и ФВС по  $n$ -й гармонической составляющей.

Значения погрешностей расчетных ( $Z_{расч(n)}$ ) (табл. 5) и измеренных ( $Z_{рез(n)}$ ) (табл. 4) сопротивлений приведены в табл. 6.

Таблица 5

ЗНАЧЕНИЯ  $Z_{c(n)}$ ,  $Z_{расч(n)}$ , ФВП И ФВС ПО  $n$ -Й ГАРМОНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

$n$	$Z_{c(n)}, Ом$	$Z_{расч(n)}, Ом$	$U_{ФВП}, В$	$U_{ФВС}, В$
5	1,064	1,216	37,421	16,579
11	2,339	2,674	83,877	29,423
13	2,764	3,160	81,659	34,341
17	3,614	4,132	49,175	3,525
19	4,039	4,618	22,291	1,809

Таблица 6

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ  $\Delta Z$

$n$	5	11	13	17	19
$Z_{расч(n)}, Ом$	1,216	2,674	3,160	4,132	4,618
$Z_{рез(n)}, Ом$	1,17	2,84	3,32	4,37	4,32
$\Delta Z, Ом$	0,046	0,166	0,16	0,238	0,298
$\Delta Z, \%$	3,78	5,845	4,819	5,446	6,453

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы.

1. График изменения фазных токов имеет искаженную синусоидальную форму, обусловленную наличием 5, 11, 13, 17, 19-й гармонических составляющих, значение  $k_{I(n)}$  изменяется в пределах 0,7-15,5%.

2. Для фазных напряжений характерно наличие 5, 11, 13, 17, 19-й гармонической составляющей по напряжению, значение  $k_{U(n)}$  изменяется в пределах 0,8-3,423%.

3. Значение  $k_U$  (табл. 3) превышает нормально допустимые по ГОСТ 13109-97 значения  $k_U$  во всех фазах ( $k_{Uнорм} = 5\%$  при  $U_{ном} = 6 - 20 кВ$ ).

4. После перехода на параллельную работу 2<sup>х</sup> трансформаторов изменение значений ВГ токов и напряжений обусловлено взаимным влиянием ВК, имеющих 6- и 12-фазную схемы выпрямления на шинах 6 кВ трансформатора Т1.

В целом можно отметить следующее изменение коэффициентов  $k_i$  при переходе от режима 1 к режиму 2

$$\left( \frac{k_{i1}}{k_{i2}} \right):$$

$$k_{I(5)} = \frac{10,68}{7,8} \% ; k_{I(11)} = \frac{13,19}{19} \% ; k_{I(13)} = \frac{9,91}{15,5} \% ;$$

$$k_{I(17)} = \frac{6,62}{0,8} \% ; k_{I(19)} = \frac{2,64}{0,7} \% ;$$

$$k_{U(5)} = \frac{1,5925}{1,8} \% ; k_{U(11)} = \frac{3,359}{2,4} \% ; k_{U(13)} = \frac{3,423}{2,3} \% ;$$

$$k_{U(17)} = \frac{1,544}{3} \% ; k_{U(19)} = \frac{0,8}{1,2} \% ;$$

5. Результаты расчета результирующего сопротивления  $n$ -ой гармонической составляющей  $Z_{рез(n)}$  подтверждает высокую эффективность разработанной методики определения ФВП, ФВС на основе активного эксперимента, связанного с включением трансформатора ГПП на параллельную работу, погрешность расчетов не превышает 7%.

Исследования, предусмотренные программой энергоаудита, проводились в рамках использования гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1324.2007.8.

## Литература

1. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]: ГОСТ 13109-97 // Федер. агентство по техническому регулированию: официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.gks.ru>.
2. Васильев И.Е. и др. Математическая модель расчета ФВП в несинусоидальности напряжений [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, О.А. Котова // Сб. тр. междунар. конф. «Исследования по современному анализу и математическому моделированию». – Владикавказ, 2008. С. 332-336.
3. Васильев И.Е. и др. Определение фактического вклада потребителя и системы в несинусоидальность напряжения при управлении работой БСК на предприятиях цветной металлургии [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, О.А. Котова // Известия высших учебных заведений. Изв. вузов; Электромеханика. – 2010. – №3. – С. 58-63.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Ключев Р.В. Исследование высших гармоник токов и напряжений в системе электроснабжения газодувки [Текст] / Р.В. Ключев // Труды 3-го Междунар. форума «Актуальные проблемы современной науки». Технические науки. Часть 18: Энергетика. – Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2007. – С. 14-19.
6. Управление качеством электроэнергии [Текст] / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, А.Ю. Воробьев; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

## Ключевые слова

Несинусоидальность напряжений; фактический вклад; вентильные преобразователи; гармоническая составляющая; сопротивление; выборка; численные характеристики; гистограмма; трансформатор; выключатель.

*Васильев Игорь Евгеньевич*

*Ключев Роман Владимирович*

*Васильев Евгений Игоревич*

## РЕЦЕНЗИЯ

Представленная статья посвящена актуальному вопросу определения фактического вклада потребителя в уровень искажения синусоидальности напряжения в точке общего присоединения, создаваемого нелинейными электроустановками потребителями. В работе содержится описание эксперимента, проведенного в действующей системе электроснабжения крупного предприятия цветной металлургии с целью определения фактического вклада электроустановок отдельного цеха.

Работы, связанные с исследованием несинусоидальности напряжения и определения фактических вкладов, проводятся уже давно, однако, для предприятий цветной металлургии с большим удельным весом нелинейных нагрузок такая работа представляет несомненную новизну.

В статье использованы методики расчета, разработанные на базе большого опыта проведения энергоаудита на предприятиях свинцово-цинкового и твердосплавного производства. Математический аппарат реализован с помощью средств программного комплекса MathCad.

Все данные получены с использованием сертифицированных средств измерения, результаты имеют высокую степень воспроизводимости и внедрены при разработке комплексной программы определения ФВП и ФВС в несинусоидальности напряжения на ОАО «Электроцинк».

Все выводы, полученные в статье, подтверждаются расчетными данными и строго соответствуют основным положениям статьи. Все таблицы и иллюстрации соответствуют физическому смыслу исследуемых процессов.

В статье сделаны ссылки на шесть литературных источников, в трех из которых приведены результаты исследования показателей качества электроэнергии, полученные авторами в ходе выполнения госбюджетных научно-исследовательских работ и гранта Президента РФ, полученного в 2007 г., что подтверждает значимость научных положений статьи.

Замечаний по статье нет.

В целом, статья написана грамотным техническим языком, в ней приведено много графиков и таблиц, отражающих весь спектр проводимых работ по определению ФВП и ФВС в несинусоидальности напряжения в ходе проведения активных экспериментов.

Рецензируемая статья заслуживает положительной оценки, тема предложенная авторами, является актуальной и может быть рекомендована к изданию.

*Кумаритов А.М., д.т.н., проф., зав. каф. «Информационные системы в экономике» Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)*

## 11.1. DETERMINATION OF ACTUAL DEPOSIT OF CONSUMER AND SYSTEM IN NON-SINE TENSIONS OF ENTERPRISES OF THE COLOURED METALLURGY ON THE BASIS OF ACTIVE EXPERIMENT ARE INCLUDING OF TRANSFORMERS ON PARALLEL WORK

I.E. Vasiliev, Doctor of Technical Science, Professor of Department «Industrial Power Supply» SKGMI (GTU); R.V. Kluyev, Candidate of Technical Science, Associate Professor of Department «Industrial Power Supply» SKGMI (GTU);

E.I. Vasiliev, Candidate of Technical Science, Associate Professor of Department «Industrial Power Supply» MEI (TU)

In the article results over of research of quality of electric power are brought in the system of power supply of major industrial concern on the basis of power inspection. The actual holding of consumer (ФВП) and systems (ФВС) is certain in non-sine tensions in the point of the general joining (ТОП). The error of the got results does not exceed 7%.

## Literature

1. State Standard 13109-97. «Norms of quality of electric energy are in the systems of power supply of the general setting» (in Russian).
2. Management by quality of electric power / of I.I. Cartashov, V.N. Tul'skiy, R.G. Shamonov, U.V. Sharov, A.U. Vorobiev, under reduction of U.V. Sharov. – M.: The Publishing house of Moscow Electrical Power Institute, 2006. – P. 320 (in Russian).
3. V.S. Ivanov, V.I. Sokolov. Modes of consumption and quality of electric power of the systems of power supply of industrial enterprises. – M.: Energoatomizdat, 1987 (in Russian).
4. I.E.Vasiliev, R.V. Kluyev, E.I. Vasiliev, O.A. Kotova. The mathematical model of calculation FVP in non-sine voltage // Collection of labours of international conference of «Research on a modern analysis and mathematical design». – Vladikavkaz, 2008. – P. 332-336 (in Russian).

5. I.E. Vasiliev, R.V..Kluyev, O.A..Kotova, E.I. Vasiliev. Determination of actual deposit of consumer and system in non-sine voltage at a management by work of batteries of static condensers on the enterprises of the coloured metallurgy // News of higher educational establishments. Izv. institutions of Electromechanically. – 2010. – №3. – Page 58-63 (in Russian).
6. R.V. Kluyev. Research of ultra harmonics of currents and voltage in the system of power supply of gas blower // Proceedings of the 3th International forum «Issues of the day of modern science». Engineering sciences. Part 18. Energy. Samara: Sam. State Tech.University – 2007. – P. 14-19.

**Keywords**

Non-sine of tensions; actual deposit; valve transformers; harmonic constituent; resistance; selection; numeral descriptions; histogram; transformer; switch.