

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ 6ДСП-40 НА УРОВЕНЬ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

© 2015

*А.Н. Черненко*, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»  
*В.В. Вахнина*, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** система электроснабжения; гармонические составляющие напряжения; дуговая сталеплавильная печь.

**Аннотация:** В статье приводятся результаты экспериментальных исследований влияния дуговой сталеплавильной печи 6ДСП-40 на искажение синусоидальности кривой напряжения в точке подключения печи к электрической сети. Приведено подробное описание технологического процесса плавки металла и электрического режима, поддерживаемого во время плавки. Определение количественного состава гармонических составляющих напряжения проводилось анализатором количества и показателей качества электрической энергии AR.5M испанской фирмы Circutor. Рассмотрено влияние режима дуговой сталеплавильной печи (ДСП) на значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в точке подключения ДСП к электрической сети. Приведены результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на шинах 10 кВ ГПП, питающих 6ДСП-40 мощностью 15 МВА при  $S_k=282$  МВА. Показано, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения достигает максимальных значений в период проплавления колодцев. Произведена проверка соответствия коэффициентов гармонических составляющих напряжения и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения требованиям ГОСТ 32144-2013. Проверка выполнялась с помощью программного обеспечения PowerVision, входящего в комплект поставки электроанализатора. Установлено, что превышение предельно допустимых значений (п. 4.2.4.1 ГОСТ 32144-2013, перечисление б) наблюдается по 20 гармоническим составляющим из 29, для которых проводились замеры. В спектре гармонических составляющих напряжения наибольшими значениями обладают 5, 3 и 2-я гармонические составляющие. При этом максимальное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не превышает 8 %, установленных в стандарте для данного класса напряжения.

### ВВЕДЕНИЕ

В системах электроснабжения для измерения уровня гармонических составляющих тока и напряжения, а также вычисления коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка  $K_{U(n)}$  и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_U$  в настоящее время используют специальные приборы – измерители показателей качества электроэнергии (ПКЭ) [1–9]. Требования, предъявляемые к измерителям ПКЭ нормативными документами, определяют эти приборы как средства измерения большого количества параметров с расширенными функциональными возможностями по обработке, хранению и передаче результатов измерений [10].

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения количественного состава гармонических составляющих напряжения в точке подключения дуговой электропечи 6ДСП-40 к электрической сети использовался анализатор количества и показателей качества электрической энергии AR.5M испанской фирмы Circutor. Электропечь 6ДСП-40 производства ОАО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ» установлена в цехе 11/1 Металлургического производства ОАО «АВТОВАЗ». Используется при производстве расплава для отливок из серого чугуна и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом дуплекс-процессом: дуговая плавильная печь 6ДСП-40 – две тигельные индукционные печи ожидания промышленной частоты LDF-20 [11–19]. Плавка разделяется на следующие основные периоды: заправка печи, завалка 1-й бадьи, расплавление 1-й ба-

дьи, завалка 2-й бадьи, расплавление 2-й бадьи, снятие шлака, доводка химического состава, слив металла.

Контроль процесса плавки осуществляется по приборам пульта № 1 печи 6ДСП-40. Во время плавки поддерживаются значения напряжения и тока, приведенные в табл. 1. Изменение схемы соединения обмотки высокого напряжения печного трансформатора (ПТ) со «звезды» на «треугольник» происходит на 6-й ступени.

Измерения проводились в цепях вторичного напряжения измерительного трансформатора напряжения типа НТМИ-10, установленного в ячейке № 75 5-й секции сборных шин 10 кВ ГПП-3 металлургического производства ОАО «АВТОВАЗ». Вторичное напряжение трансформатора напряжения равнялось 100 В. Печь 6ДСП-40 подключена к ячейке № 63 той же секции сборных шин. На рис. 1 приведена схема подключения AR.5M.

Ввиду ограниченной, нерасширяемой памяти прибора AR.5M и большого расстояния между измерительными трансформаторами тока и напряжения, установленными на 5-й секции сборных шин ГПП-3, исследовался только гармонический состав напряжения.

Измерения проводились в несколько этапов. На первом этапе с целью определения фазы с наибольшим искажением синусоидальности кривой напряжения регистрировались значения  $K_U$  и  $K_{U(n)}$  в каждой фазе для периода расплавления первой бадьи. Результаты измерений представлены на рис. 2, 3.

Максимальное значение  $K_U$  зафиксировано в фазе В, которая была выбрана для дальнейшего исследования гармонических составляющих напряжения на всем цикле плавки на втором этапе измерений.

Таблица 1. Электрический режим, поддерживаемый во время плавки

| Ступень ПТ    | 1            | 2            | 3             | 4               | 5             | 6 | 7             | 8             | 9           | 10          | 11          |
|---------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|---|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Напряжение, В | 133          | 154          | 168           | 184             | 205           | 0 | 230           | 267           | 290         | 318         | 352         |
| Ток, кА       | от 8,5 до 10 | от 8,5 до 10 | от 10 до 11,5 | от 11,5 до 12,5 | от 12,5 до 16 | 0 | от 14,5 до 16 | от 16 до 18,5 | от 17 до 20 | от 20 до 23 | от 23 до 26 |

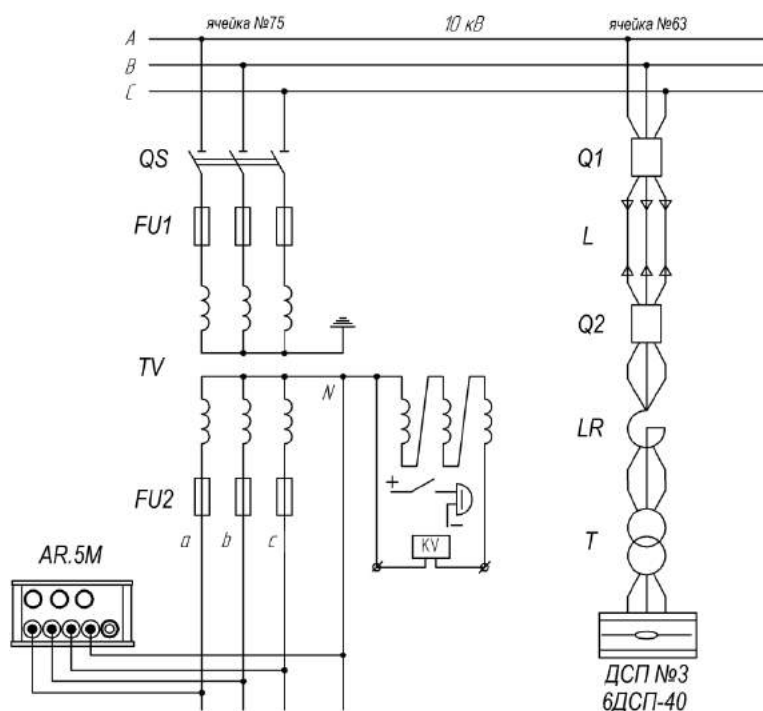


Рис. 1. Схема экспериментальных измерений гармонических составляющих напряжения прибором AR.5M

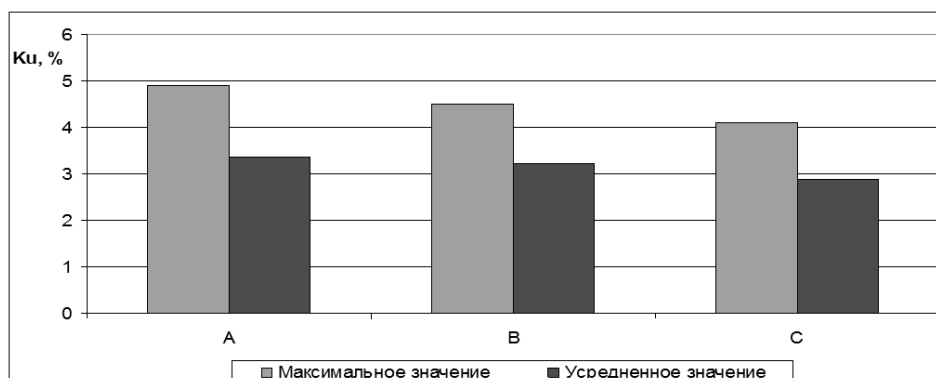


Рис. 2. Максимальные и усредненные значения  $K_U$  по отдельным фазам для периода проплавления колодцев (0–5 мин от начала плавки)

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 4 представлен график изменения  $K_U$  за цикл плавки. График разбит на 13 участков:

1. Период расплавления 1-й бадьи в плавке № 271 серого чугуна (начало в 9.05, окончание в 10.00; до 9.40 11-я ступень печного трансформатора (ПТ), с 9.40 до 9.46 10-я ступень ПТ, после 9.46 9-я ступень ПТ);
2. Завалка 2-й бадьи (10.00–10.09, печь отключена);

3. Проплавление колодцев (10.09–10.14, 11-я ступень ПТ);
4. Расплавление 2-й бадьи (10.14–10.38, 11-я ступень ПТ);
5. Расплавление остатка (10.38–10.51, до 10.41 10-я ступень ПТ, после – 9-я ступень ПТ);
6. Перемешивание и нагрев металла до заданной температуры (10.52–11.40, 7-я ступень ПТ без реактора);

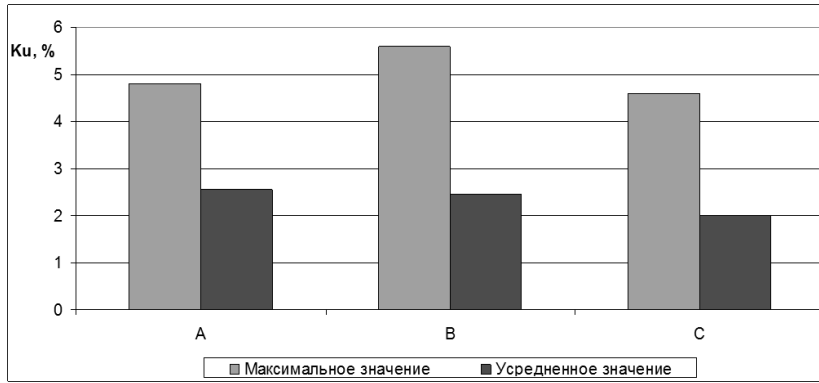


Рис. 3. Максимальные и усредненные значения  $K_U$  по отдельным фазам для периода расплавления 1-й бадьи (5–46 мин от начала плавки)

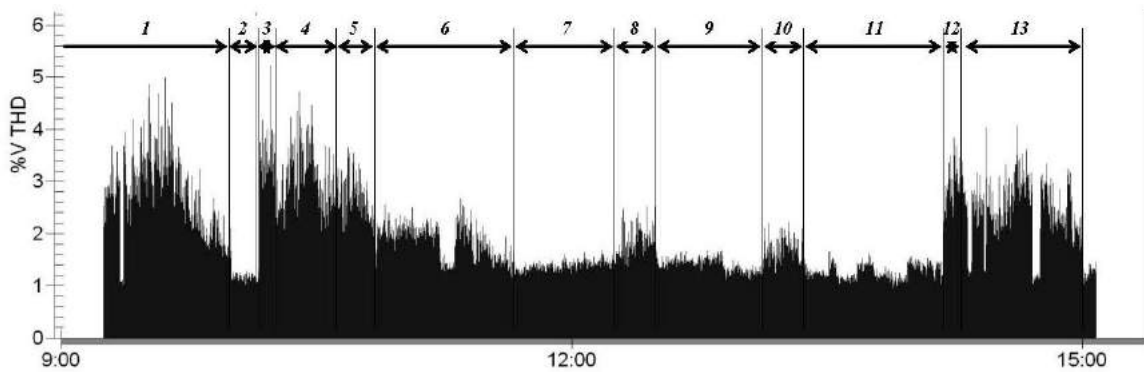


Рис. 4. График изменения  $K_U$  за цикл плавки

- 7. Снятие шлака, отбор пробы и отправка по пневмопочте в лабораторию (11.40–12.15, печь отключена);
- 8. Доводка хим. состава (12.15–12.30, 5-я ступень ПТ без реактора);
- 9. Повторная отправка пробы, ожидание освобождения печей LDF-20 (12.30–13.09, печь отключена);
- 10. Нагрев металла до температуры выпуска 1540 °C (13.09–13.22, 5-я ступень ПТ без реактора);
- 11. Снятие шлака, выпуск металла, заправка печи, завалка 1-й бадьи плавки № 272 серого чугуна (13.22–14.12, печь отключена);
- 12. Проплавление колодцев (14.12–14.17, 11-я ступень ПТ);

- 13. Расплавление 1-й бадьи (14.17–15.00, 11-я ступень ПТ).
- Данные по составу гармонических составляющих напряжения приведены в табл. 2.
- Как видно из рис. 4 и табл. 2, наибольшее искажение синусоидальности кривой напряжения в точке подключения ДСП к электрической сети наблюдается в период проплавления колодцев. В спектре гармонических составляющих напряжения преобладают 5-я – 1,6 %, 3-я – 1,1 % и 2-я – 1,1 % гармонические составляющие. Причем третья гармоническая составляющая присутствует в спектре, когда печь отключена и ее среднестатистическое значение достигает 0,7 %.

Таблица 2. Гармонический состав напряжения на шинах ГПП, питающих БДСП-40 при  $S_k=282$  МВА,  $S_{ном}=15$  МВА

| Период плавки      | $K_U$<br>$max$ | $U_\phi$<br>кВ | Номер гармоники и соответствующие ему усредненные значения $K_{U(n)}$ , % |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|----------------|----------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                    |                |                | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  |
| Печь отключена     | 2              | 6,04           | 0,3   | 0,7 | 0,3 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| Проплав. колодцев  | 3,8            | 5,91           | 0,8   | 0,9 | 0,6 | 1,4 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| Расплав. 1-й бадьи | 4,1            | 5,88           | 0,7   | 0,9 | 0,6 | 1,2 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| Проплав. колодцев  | 5,2            | 5,89           | 1,1   | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Расплав. 2-й бадьи | 4,7            | 5,84           | 0,8   | 1,0 | 0,7 | 1,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |

## ВЫВОДЫ

Анализ проверки соответствия  $K_{U(n)}$  требованиям ГОСТ 32144-2013 [20], выполненный с помощью программного обеспечения PowerVision, входящего в комплект поставки электроанализатора, показал, что превышение предельно допустимых значений наблюдается по 20 гармоническим составляющим из 29, для которых проводились замеры. Причем наиболее длительные превышения предельных значений наблюдались для 6-й (более 11 % от цикла плавки), 12-й (более 7 %) и 14-й (более 6 %) гармонической составляющей напряжения. Максимальное значение  $K_U$  составило 7,41 %, что не превышает требований ГОСТ 32144-2013 для данного класса напряжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев [и др.]. М.: МЭИ, 2006. 320 с.
2. Lundquist J. On Harmonic Distortion in Power Systems // Department of Electric Power Engineering: Technical report no. 371L. Göteborg, 2001. 139 p.
3. Gosbell V., Perera S., Smith V. Harmonic distortion in the electric supply system // Integral Energy Power Quality Centre: Technical Note no. 3. Australia, 2000. 10 p.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2004. 358 с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. 4-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
6. Чэпмэн Д. Цена низкого качества электроэнергии // Энергосбережение. 2004. № 1. С. 67–69.
7. Сапронов А.А., Гончаров Д.С. Некачественная электроэнергия – дополнительная составляющая коммерческих потерь энергопредприятия // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими. Ч. 2. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. С. 68–77.
8. Никифорова В.Н., Суднова В.В. Сертификация – эффективный механизм государственной политики обеспечения качества электроэнергии // Вестник Госэнергонадзора. 2000. № 2. С. 23–25.
9. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: МЭИ, 1997. 424 с.
10. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. 34 с.
11. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. 6-е изд. М.: Академкнига, 2005. 768 с.
12. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Современная технология производства стали. М.: Теплотехник, 2007. 528 с.
13. Naranjo R.D. Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry. Maryland: BCS Incorporated, 2005. 46 с.
14. Рябов А.В., Чуманов И.В., Шишимиров М.В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах. М.: Теплотехник, 2007. 192 с.
15. Шевцов М.С., Бородачев А.С. Развитие электротермической техники. М.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.
16. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Повышение эффективности электроснабжения электропечей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
17. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. М.: Энергия, 1975. 204 с.
18. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / под ред. А.Д. Свенчанского. 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
19. Taylor Ch. R., Custer C.C. Electric Furnace Steelmaking. London: Iron & Steel Society, 1985. 395 p.
20. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

## REFERENCES

1. Kartashev I., Tulsy V., Shamonov R., Sharov Yu., Vorobev A. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Electric power quality management]. Moscow, MEI publ., 2006, 320 p.
2. Lundquist J. On Harmonic Distortion in Power Systems. *Department of Electric Power Engineering: Technical report no. 371L*. Göteborg, 2001, 139 p.
3. Gosbell V., Perera S., Smith V. Harmonic distortion in the electric supply system. *Integral Energy Power Quality Centre: Technical Note no. 3*. Australia, 2000. 10 p.
4. Zhezhelenko I.V. *Visshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in electric power supply systems of production enterprises]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2004, 358 p.
5. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Kachestvo elektroenergii na promishlennih predpriyatiyah* [Electric power quality at the industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2005, 261 p.
6. Чэпмэн Д. Cost of poor quality of electric power. *Energoberezhnie*, 2004, no. 1, pp. 67–69.
7. Saproinov A.A., Goncharov D.S. Low-quality electric power – additional component of lost business of energy provider. *Sovremennie energeticheskie sistemi i kompleksi i upravlenie imi*, chast 2, Novocherkassk, YuRGTU, 2006, pp. 68–77.
8. Nikiforova V.N., Cudnova V.V. Certification – an effective mechanism of state policy of electric power quality assurance. *Vestnik Gosenergonadzora*, 2000, no. 2, pp. 23–25.
9. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. *Perehodnie protsessi v sistemah promishlennogo elektrosnabzheniya, obuslovlennnie elektrodvigatelnoy nagruzkoy* [Transient phenomena within industrial electric power supply systems caused by electromotor loading]. Moscow, MEI publ., 1997, 424 p.
10. GOST 30804.4.7-2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. General guideline for measuring instruments and harmonics and interharmonics measuring for the electric power supply systems and technical

- equipment connected to them. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 34 p. (In Russian).
11. Voskoboynikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya* [General metallurgy]. 6th ed. Moscow, Akademkniga publ., 2005, 768 p.
  12. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Sovremennaya tehnologiya proizvodstva stali* [Modern technology of steel production]. Moscow, Teplotehnik publ., 2007, 528 p.
  13. Naranjo R.D. *Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities for the Metal Casting Industry*. BCS Incorporated, 2005, 46 p.
  14. Ryabov A.V., Chumanov I.V., Shishimirov M.V. *Sovremennye sposobi viplavki stali v dugovih pechah* [Modern methods of steelmaking in arc furnaces]. Moscow, Teplotehnik publ., 2007, 192 p.
  15. Shevtsov M.S., Borodachev A.S. *Razvitie elektrotermicheskoy tehniki* [Development of electrothermic engineering]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1983, 208 p.
  16. Mineev R.V., Miheev A.P., Ryzhnev Yu.L. *Povishenie effektivnosti elektrosnabzheniya elektropechey* [Improvement of the efficiency of electrical furnaces electric power supply]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1986, 208 p.
  17. Markov N.A. *Elektricheskie tsepi i rezhimi dugovih elektricheskikh ustanovok* [Electric circuits and the modes of arc electric furnace plants]. Moscow, Energiya publ., 1975, 204 p.
  18. Svenchansky A.D., ed. *Elektricheskie promishlennye pechi. Dugovie pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva* [Electric industrial furnaces. Arc furnaces and preliminary heat plants]. 2nd ed. Moscow, Energoizdat publ., 1981, 296 p.
  19. Taylor Ch. R., Custer C.C. *Electric Furnace Steelmaking*. Iron & Steel Society, 1985, 395 p.
  20. GOST 32144–2013. Electric power. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standard for electric power in general-purpose electric power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).

#### THE INFLUENCE OF OPERATING MODES OF 6DSP-40 ARC STEEL-MAKING FURNACE ON THE LEVEL OF HARMONIC VOLTAGE COMPONENTS AT THE ELECTRICAL NETWORK CONNECTION POINT

© 2015

*A.N. Chernenko*, candidate of technical sciences,  
assistant professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering  
*V.V. Vakhnina*, Doctor of Engineering, Professor,  
Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** electric power supply system; harmonic voltage components; arc steel-making furnace.

**Annotation:** The article gives the results of experimental studies on the influence of 6DSP-40 arc steel-making furnace on the distortion of a voltage sine wave at the connection point of the furnace to the mains. The authors give the detailed description of the process of metal melting and electric mode kept during the melting process. The determination of the number of voltage harmonic components was carried out by the AR.5M analyzer of electric power quantity and quality produced by Spanish firm «Circutor». The authors considered the influence of the arc steel-making furnace (ASF) mode on the value of total voltage harmonic components at the point of connection of the ASF to the mains. The article presents the results of experimental investigations of harmonic voltage at the 10 kV busbars of MSDS feeding 6DSP-40 with the capacity of 15 MVA at  $S_k = 282$  MVA. The experiment showed that the total of harmonic voltage components reaches the maximum values during the process of wells melt-through. The authors carried out the inspection of conformance of the voltage harmonic components and the total voltage harmonic components to the GOST 32144-2013 standard. The inspection was carried out using the PowerVision software delivered with the electro-analyzer. It is found that the excess of limit values (c. 4.2.4.1 of GOST 32144-2013 standard, enumeration b) occurs on twenty of twenty nine harmonic components where the measurements were carried out. Within the spectrum of the voltage harmonic components the 5<sup>th</sup>, the 3<sup>rd</sup> and the 2<sup>nd</sup> harmonic components have the highest values. The maximum value of total coefficient of voltage harmonic components does not exceed 8% established by the standard for this voltage class.