

Корнилов Г.П., Николаев А.А., Шулепов П.А., Петухова О.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Удельная мощность печных трансформаторов современных сверхмощных дуговых сталеплавильных печей достигла значения 1,2 МВА/т, и дальнейшее ее увеличение не представляется возможным. Повышение производительности осуществляется за счет внедрения альтернативных источников энергии, таких как природный газ, кислород и жидкий чугун. В связи с этим встает вопрос о рациональном распределении долей используемых энергоресурсов в общем тепловом балансе. Одним из вариантов решения является регулировка объемов каждого из энергоресурсов в зависимости от стадии плавки. В статье рассмотрен способ, позволяющий судить о том, на какой из стадий плавки находится печь, анализируя значение коэффициента несимметрии кривой тока. На его основе возможно построение системы автоматического регулирования объемов электроэнергии, газа и кислорода. Коэффициент несимметрии кривой силы тока имеет прямую зависимость от величины четных высших гармонических составляющих тока дуги. Наибольшего значения они достигают на стадии образования колодцев, которое снижается по мере увеличения доли расплавленного металла в общей массе загрузки печи. В свою очередь, на протяжении плавки значение нечетных высших гармонических составляющих тока увеличивается. Система управления анализирует скорость изменения значений четных и нечетных гармонических составляющих, на основе чего формирует сигналы регулирования объемов природного газа и кислорода. Рассмотренный в статье метод определения стадии плавки позволяет использовать приборы с довольно низкой частотой дискретизации – 500 Гц, что увеличивает быстродействие системы в целом. Внедрение данной системы позволит снизить затраты на производство стали и повысить КПД печи.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, энергетическая эффективность, распределение энергоресурсов, система автоматического регулирования, коэффициент несимметрии, коэффициент синусоидальности.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых задач по повышению энергетической эффективности современных сверхмощных дуговых сталеплавильных печей (ДСП) является рациональное распределение различных энергетических ресурсов, подводимых в рабочее пространство печи, в общем тепловом балансе. К основным энергетическим ресурсам относятся: электрическая энергия, природный газ, кислород и жидкий чугун [1]. Для наиболее оптимального распределения объемов каждого из энергоресурсов необходимо решить задачу оптимизации, критерием которой является наименьшее суммарное значение экономических затрат на плавку. Решение данной проблемы является весьма сложной задачей, т.к. в него входит большое количество факторов, обусловленных технологическими требованиями, таких как время плавки, температура стали на выходе, химический состав стали и т.п. [2]. Наиболее оптимальным решением является построение системы автоматического регулирования объемов подводимых энергетических ресурсов. Для ее разработки необходимо определить, какие из параметров можно использовать для определения стадии плавки. Рассмотрим несколько вариантов распределения энергоресурсов.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПЕЧИ

Первый вариант – увеличение объема подаваемого природного газа на всем протяжении плавки. Данное решение позволит снизить долю потребленной электрической энергии и уменьшить время плавки. Но при этом необходимо учитывать, что общее время плавки установлено технологическими особенностями производства и не должно значительно отклоняться от заданных значений. Также увеличение объема газа целесообразно на начальных стадиях ведения плавки, когда

доля твердого материала превышает долю расплава в объеме печи. При переходе стали в жидкую фазу целесообразно производить плавку энергией электрической дуги, т.к. это позволяет добиваться высокой степени чистоты расплава и исключает возможность внесения в него дополнительной массы углерода.

Вторым вариантом является увеличение объема подводимого в рабочее пространство печи кислорода на всем протяжении плавки. Это также позволяет снизить долю электроэнергии за счет протекания экзотермических реакций в расплаве. В свою очередь, данное решение увеличивает количество выжигаемого из стали углерода и приводит к увеличению угара металла. Также увеличение объема подаваемого кислорода в начальные моменты ведения плавки, когда велика доля твердого материала, приводит к повышению температуры отходящих газов, может вывести из строя систему дымоудаления [3].

Каждый из вариантов позволяет снизить долю подводимой электрической энергии, тем самым снизив экономические затраты на плавку [4]. Однако применение каждого из вариантов в отдельности влечет за собой негативное влияние на качество выплавляемой стали и увеличивает износ различных систем. Решением данной проблемы является комплексное применение каждого из методов. Увеличение объема природного газа наиболее целесообразно производить на начальных стадиях плавки. Это позволит ускорить переход материала из твердой стадии в жидкую. Кислород, напротив, необходимо подводить в избытке на стадии, когда материал практически полностью перейдет в жидкое состояние, что позволит получить дополнительную энергию от протекания экзотермических реакций.

Для построения автоматической системы регулирования объемов подводимых газов необходимо знать, на какой стадии плавки печь находится в тот или иной момент. Это возможно осуществить путем определения гармонических составляющих тока. На начальных стадиях ведения плавки значение четных высших гар-

моник тока превышает значение нечетных, и наоборот, на конечных стадиях значение нечетных гармоник превышает значение четных. За время расплавления первой завалки материала суммарное действующее значение четных высших гармоник тока снижается с 12 до 4% относительно номинального первичного тока печного трансформатора. За это же время суммарное действующее значение нечетных высших гармоник тока снижается с 8 до 6% [5].

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕМАМИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Наиболее четкую картину о стадии плавки можно получить, анализируя значения четных высших гармоник тока, т.к. за период расплавления материала их значение изменяется в более широких пределах. Данный способ позволяет регулировать объем природного газа, однако возникают трудности при регулировании объема кислорода в тот момент, когда значения четных и нечетных гармонических составляющих становятся

примерно равными. Это наблюдается в те моменты, когда материал начинает переход из твердой фазы в жидкую. С одной стороны, увеличение объема подвдимого кислорода приведет к интенсификации экзотермических реакций и позволит снизить необходимый объем электрической энергии [6]. С другой стороны, повышение доли экзотермических реакций в общем тепловом балансе ведет к росту температуры отходящих газов и, тем самым, дополнительному расходу электрической энергии на их очистку и охлаждение [7, 8]. Исходя из этого, целесообразно, наряду с измерением значений гармонических составляющих тока, производить измерение и фиксировать изменение температуры отходящих газов.

Учитывая все вышеизложенное, можно построить автоматическую систему управления объемами, электрической энергии, природного газа и кислорода, которая способна определять стадию плавки за счет измерения технологических параметров (рис. 1) [9].

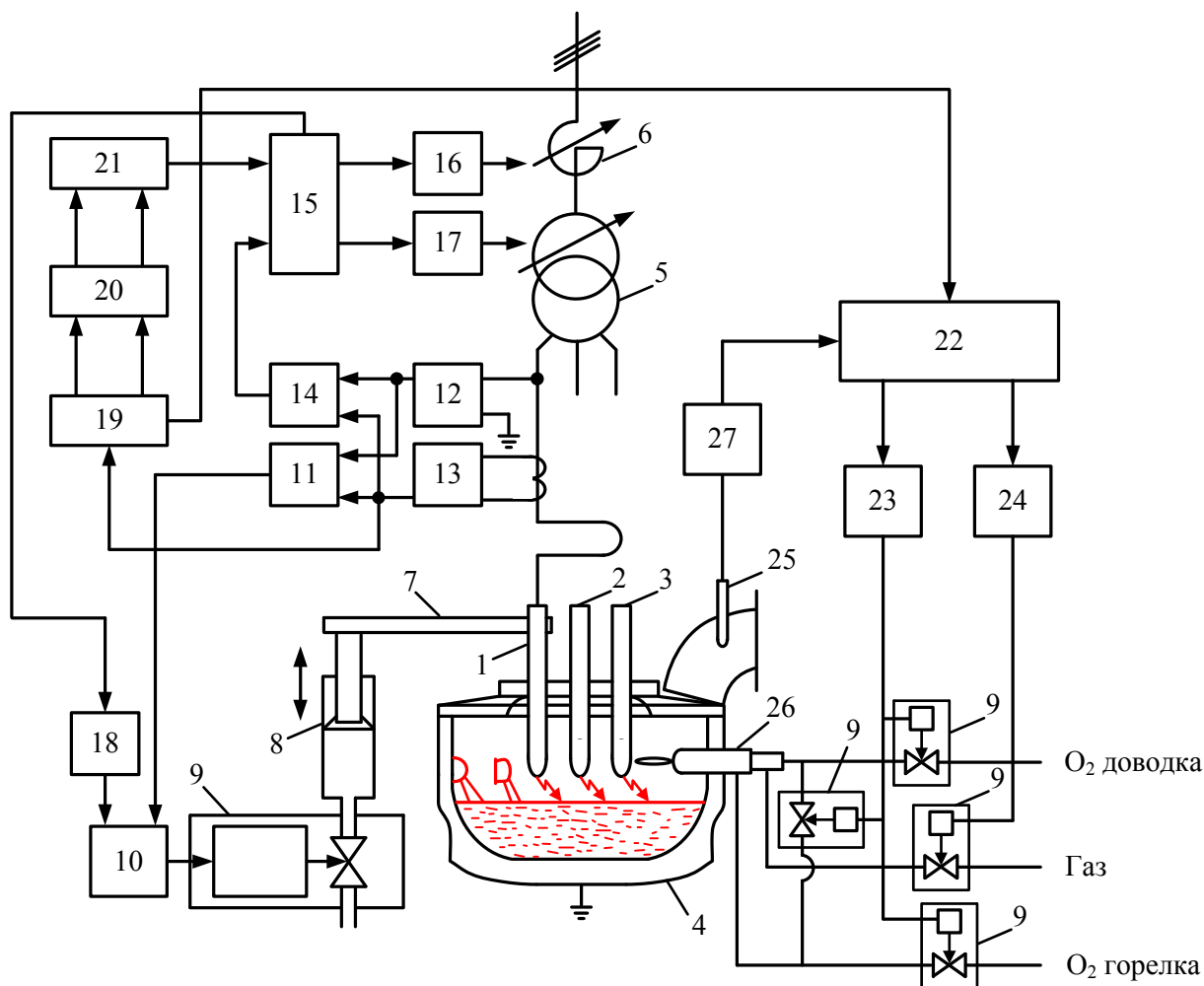


Рис. 1. Блок-схема системы управления электрическим режимом, объемами природного газа и кислорода с подсистемой диагностики стадий плавки по высшим гармоникам токов дуг (1, 2, 3 – электроды; 4 – ванна печи; 5 – печной трансформатор; 6 – реактор; 7 – электрододержатель; 8 – гидроцилиндр; 9 – сервоклапан; 10 – система управления первого уровня с регулятором импеданса; 11 – блок расчета импеданса; 12, 13 – датчики тока и напряжения; 14 – блок расчета расхода электроэнергии; 15 – система управления второго уровня; 16, 17 – исполнительные механизмы РПН реактора и трансформатора; 18 – блок выбора установки импеданса; 19 – блок расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой тока дуг и дисперсии тока дуг; 20 – блок усреднения; 21 – блок определения стадий плавки; 22 – блок обработки данных; 23 – система управления подачей кислорода (СУПК); 24 – система управления подачей природного газа (СУПГ); 25 – датчик температуры отходящих газов; 26 – газокислородная горелка; 27 – преобразователь сигнала)

Блок обработки данных формирует сигналы для систем управления подачей газа и кислорода на основе данных, полученных с датчика температуры отходящих газов и блока расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и дисперсии тока дуг. В свою очередь, СУПК и СУПГ подают управляющие сигналы на сервоклапаны. Исходными данными, поступающими с блока определения стадий плавки, может служить коэффициент искажения синусоидальности кривой тока дуги (THD), который вычисляется по формуле

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}}. \quad (1)$$

Исследования, проведенные на действующем оборудовании дуговых сталеплавильных печей, показали, что данный параметр имеет хорошую корреляцию с технологическими стадиями плавки [9]. На рис. 2 приведены относительные значения токов наиболее значимых высших гармоник (с первой по седьмую) для трёх стадий плавки.

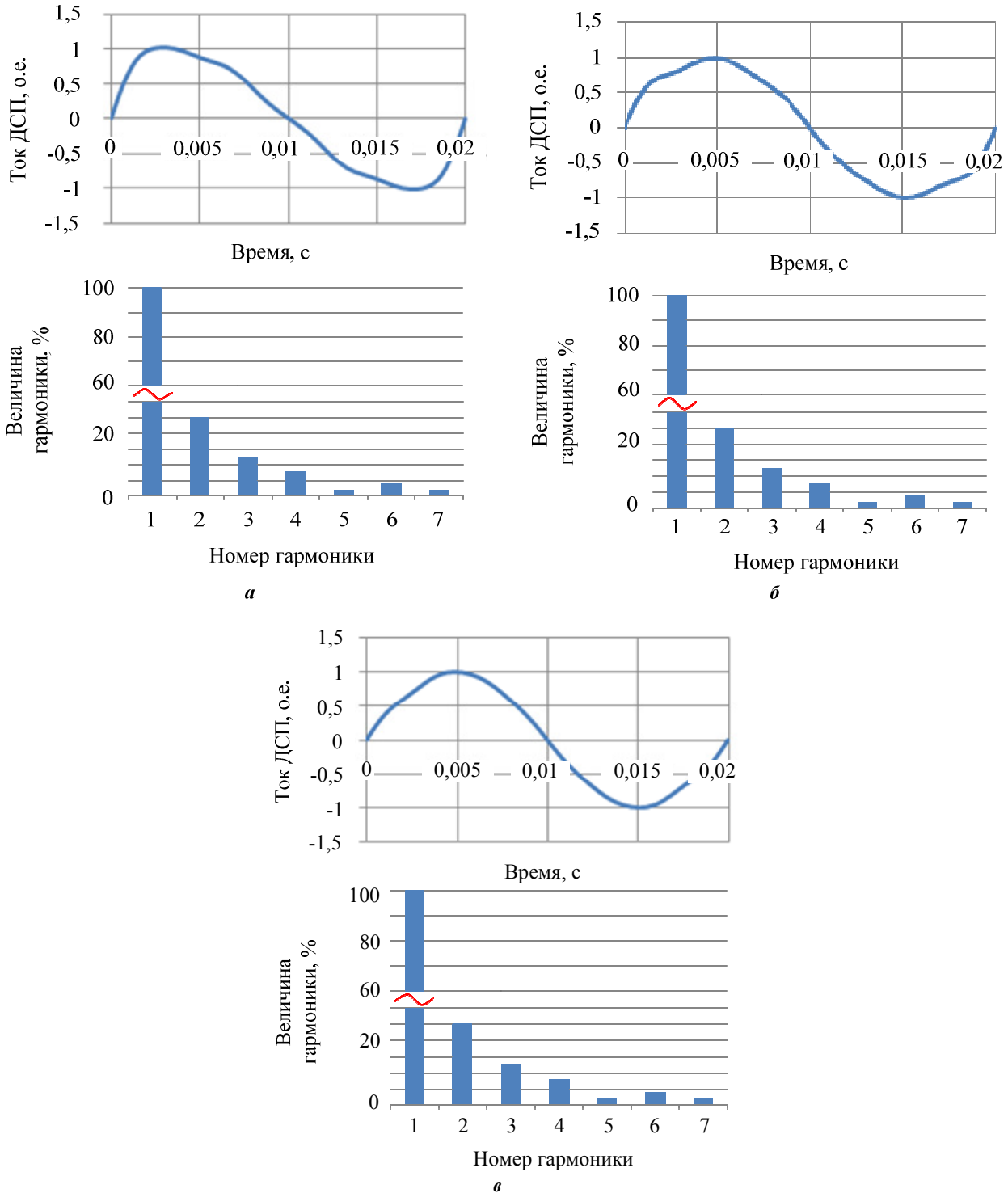


Рис. 2. Кривые относительных значений токов ДСП и гармонический состав на различных стадиях плавки: а – начальный период плавки; б – период образования колодцев и плавления материала; в – период горения дуг на жидкую ванну

Коэффициент несимметрии кривой тока можно выразить следующим уравнением:

$$\Delta_I = \int_0^{0,005} I(t)dt - \int_{0,005}^{0,01} I(t)dt. \quad (2)$$

Используя выражение (2), можно определить коэффициент несимметрии кривой тока для различных значений четных и нечетных гармонических составляющих (рис. 3-5).

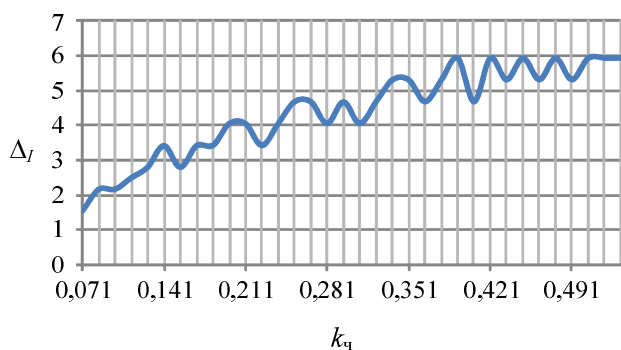


Рис. 3. Зависимость коэффициента несимметрии кривой тока от содержания четных гармонических составляющих

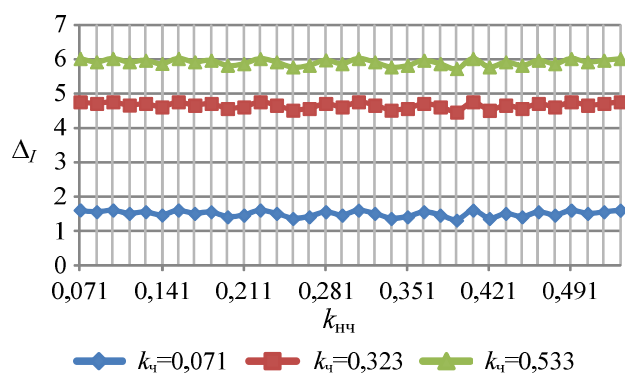


Рис. 4. Зависимость коэффициента несимметрии кривой тока от содержания нечетных гармонических составляющих

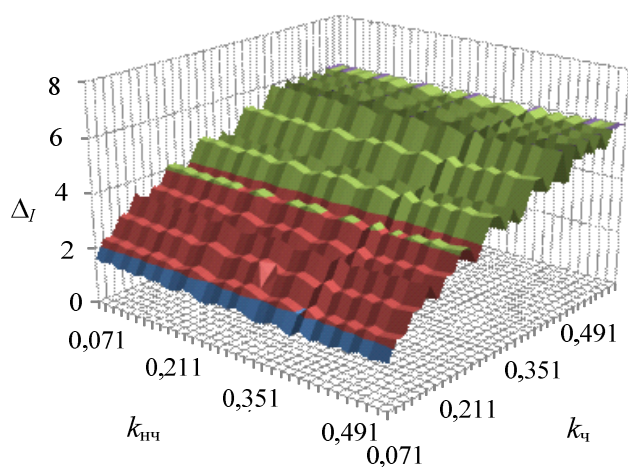


Рис. 5. Зависимость коэффициента несимметрии кривой тока от содержания четных и нечетных гармонических составляющих

Коэффициенты несимметрии кривой тока от содержания четных и нечетных гармонических составляющих определим по выражениям:

$$k_{\text{ч}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{2n}^2}}{I_1}; \quad (3)$$

$$k_{\text{нч}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{2n+1}^2}}{I_1}. \quad (4)$$

Чем больше значение Δ_I , тем значительнее несимметрия кривой тока печи и, следовательно, тем выше значение токов четных высших гармоник в его составе [10]. Значения коэффициентов THD и Δ_I для различных периодов плавки представлены в таблице.

Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока ДСП и коэффициента несимметрии для различных стадий плавки

Коэффициент	THD	Δ_I
Начальный период плавки	34,5	5,8
Период образования колодцев и плавления материала	14,4	3,5
Период горения дуг на жидкую ванну	6,5	2,6

Таким образом, анализируя значение коэффициента несимметрии, можно судить о том, на какой из стадий плавки находится печь в текущий момент. Гармонические составляющие тока дуги выше 5-й не оказывают существенного влияния на значение Δ_I . Согласно теореме Котельникова в системе управления объемами природного газа и кислорода достаточно применения контроллеров с частотой дискретизации равной 500 Гц. Увеличение значения Δ_I однозначно дает информации об увеличении четных гармонических составляющих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повысить энергетическую эффективность и снизить затраты на энергетические ресурсы, используемые в современных сверхмощных дуговых сталеплавильных печах, возможно путем регулирования объемов данных энергоресурсов. Эту задачу можно осуществить путем внедрения системы автоматического регулирования. Для данной системы основными исходными данными являются температура отходящих газов и гармонический состав тока. На основе этих данных система способна определить, на какой стадии плавки находится печь в каждый момент времени и воздействовать на количество подводимых энергетических ресурсов.

Внедрение автоматической системы регулирования позволяет снизить количество потребляемой электрической энергии, основного энергетического ресурса, тем самым сократить суммарные экономические затраты на производство стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тулуевский Е.Н., Зинуров И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 347 с.
2. Корнилов Г.П., Шулепов П.А. Снижение затрат при эксплуатации сверхмощных дуговых сталеплавильных печей // Главный энергетик. 2015. № 5-6. С. 24-28.
3. S.I. Deaconu, G.N. Popa and I. Popa. Energy consumption reduction in dry undust filter equipment for electric arc

- furnace. Fifth International Conference in hydrotechnics. vol. 7, ISBN 973-8130-82-4, Sebes, Romania, 30-31 May, 2005, pp. 285-288.
4. Корнилов Г.П., Шулёпов П.А. Анализ способов энергосбережения в современных ДСП // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. трудов. Вып. 1. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 186 с.
 5. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / Николаев А.А., Руссо Ж.-Ж., Сцымански В., Тулунов П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 5. С. 106-120.
 6. L.W. White and S. Bhattacharya. A single phase PSCad electric arc furnace model in IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 5352-5356.
 7. Чердиченко В.С., Бикеев Р.А., Иванова Е.Г. Научные основы обработки паропылегазовых смесей в дуговых сталеплавильных электропечах // Научный вестник НГТУ. 2013. №1(50). С. 173-181.
 8. Карасев В.П., Сулягин К.Л. Определение мощности тепловых потерь в дуговых сталеплавильных печах // Электрометаллургия. 2006. №3. С. 19-23.
 9. Оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Ануфриев А.В., Пехтерев С.В., Повелица Е.В. // Сталь. 2014. №4. С. 37-47.
 10. L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, P. Thorgersen. Adaptive Compensation of reactive power with Shunt Active Power Filters. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 3, May/June, 11. 2008, pp. 867-877.

Поступила в редакцию 16 августа 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM AIMED AT DISTRIBUTION OF ENERGY RESOURCES IN ARC FURNACES

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc (Eng.), Professor, Head of the department of electric power supply of industrial enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Aleksandr A. Nikolaev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the department, Department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Pavel A. Shulepov

Postgraduate student, the department of Power Supply Systems of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pashulepov13@mail.ru.

Olga I. Petukhova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, department of electric power supply of industrial enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: petukhova-ol@mail.ru.

The specific power of furnace transformers of modern high-power arc steel-making furnaces has reached the value of 1.2 MVA/t and its further increase is impossible. The increased productivity is achieved through the introduction of alternative energy sources, such as: natural gas, oxygen and liquid iron. In this connection, the question arises of the rational distribution of the shares of energy resources used in the overall heat balance. One solution is to adjust the volume of each of the energy resources, depending on the stage of melting. The article considers the method, which makes it possible to judge which stage of melting the furnace is in, analyzing the value of the asymmetry coefficient of the current curve. On its basis, it is possible to build a system of automatic regulation of volumes of electricity, gas and oxygen. The coefficient of asymmetry of the current curve has a direct dependence on the magnitude of the even higher harmonic components of the arc current. The greatest value they reach at the stage of formation of wells, which decreases as the share of molten metal increases in the total weight of the furnace charge. In its turn, during melting, the value of odd higher harmonic current components increases. The control system analyzes the rate of change in the values of the even and odd harmonic components, on the basis of which it generates signals for regulating the volumes of natural gas and oxygen. The method of determining the melting stage considered in the article makes it possible to use instruments with a fairly low frequency of 500 Hz, which makes it possible to increase the overall system performance. The introduction of this

system will reduce the cost of steel production and improve the efficiency of the furnace.

Keywords: Arc furnace, energy efficiency, energy distribution, the automatic control system, the asymmetry coefficient sinusoidal coefficient.

REFERENCES

1. Tuluevskiy E.N., Zinurov I.Yu. *Innovatsii dlya dugovykh staleplavilnykh pechey. Nauchnye osnovy vybora* [Innovations for Arc Steel Furnaces. Scientific Basis of Choice]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2010. 347 p. (In Russian)
2. Kornilov G.P., Shulepov P.A. Reduction of Costs in the Operation of Ultra-high Power Arc Steel Furnaces. *Glavnyy energetik* [Chief Power Engineer], 2015, no. 5-6, pp. 24-28. (In Russian)
3. S.I. Deaconu, G.N. Popa and I. Popa. Energy consumption reduction in dry undust filter equipment for electric arc furnace. Fifth International Conference in hydrotechnics vol. 7, ISBN 973-8130-82-4, Sebes, Romania, 30-31 May 2005, pp. 285-288.
4. Kornilov G.P., Shulepov P.A. Analysis of Energy-saving Methods in Modern EAFs. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy: mezhdunar. sb. nauchn. trudov* [Power and electrical engineering systems: international collection of scientific works]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2014. 186 p.

- (In Russian)
5. Nikolaev A.A., Russo Zh.-Zh., Stsymanski V., Tulupov P.G. Experimental Study of Harmonic Composition of Arc Currents for Arc Steel Furnaces of Various Capacities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of MSTU. G.I. Nosov]. 2016, no. 5, pp. 106-120. (In Russian)
 6. L.W. White and S. Bhattacharya. A single phase PSCad electric arc furnace model in IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 5352-5356.
 7. Cherednichenko V.S., Bikeev R.A., Ivanova E.G. Scientific Basis of Processing Steam-gas mixtures in Arc Steelmaking Electric Furnaces. *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific bulletin of the NSTU], 2013, no. 1(50), pp. 173-181. (In Russian)
 8. Karasev V.P., Sutyagin K.L. Determination of Power of Thermal Losses in Arc Steelmaking Furnaces. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2006, no. 3, pp. 19-23. (In Russian)
 9. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. Optimization of Electric Modes of Ultra-high Power Arc Steel-smelting Furnaces. *Stal* [Steel], 2014, no. 4, pp. 37-47. (In Russian)
 10. L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, P. Thorgersen. Adaptive Compensation of reactive power with Shunt Active Power Filtres. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, May/June, 11. 2008, pp. 867-877.

Варианты построения системы автоматического регулирования распределения долей энергетических ресурсов в дуговых печах / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Шулепов П.А., Петухова О.И. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 4(37). С. 32-37. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-32-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-32-37)

Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Shulepov P.A., Petukhova O.I. Development of Automatic Control System aimed at Distribution of Energy Resources in Arc Furnaces. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4(37), pp. 32-37. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-32-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-32-37)