

Elektr yoyli pechlarining energetik samaradorligini oshirish va yuqori garmonika ta'sirlari taxlili

Sultonxo'ja K. Mahmutxonov

PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; mahmutkhonov.sultonkhoja.93@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6098-4097>

Dolzarbli: hozirgi kunda metallurgiya sanoati elektr energiyasining eng yirik iste'molchilaridan biri bo'lib, elektr yoyli pechlar yuqori quvvatli va nochiqli elektr yuklamalari sifatida elektr ta'minoti tizimiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Elektr yoyli pechlarining ishlash jarayonida yoyning beqaror yonishi natijasida tok va kuchlanishning shakli buzilib, elektr tarmoqlarida yuqori darajadagi garmonikalar hosil bo'ladi. Ushbu yuqori garmonik ta'sirlar elektr energiyasi sifatining yomonlashuviga, transformatorlar, kabel liniyalari hamda taqsimlovchi qurilmalarda qo'shimcha isroflar va qizishlarning ortishiga olib keladi. Energiya resurslarining cheklanganligi, elektr energiyasi tariflarining oshib borishi va sanoat korxonalariga qo'yilayotgan energiya samaradorligi talablari elektr yoyli pechlarining energetik samaradorligini oshirish masalasini yanada dolzarb etmoqda. Elektr energiyasi sarfining kamaytirilishi ishlab chiqarish tannarxini pasaytirish bilan birga, elektr energiyasi ishlab chiqarish jarayonida hosil bo'ladigan issiqxona gazlari chiqindilarini qisqartirish imkonini beradi. Shu bilan birga, yuqori garmonikalarning kamaytirilishi elektr ta'minoti tizimining ishonchligini oshirib, boshqa iste'molchilarning elektr energiyasi sifatiga salbiy ta'sirni cheklaydi. Shu sababli elektr yoyli pechlarida yuqori garmonik ta'sirlarni kamaytirish va energiya isroflarini optimallashtirishga qaratilgan tadqiqotlar barqaror sanoat rivoji nuqtayi nazaridan muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega bo'lib, sanoat infratuzilmasini takomillashtirish va ekologik barqarorlikni ta'minlashga xizmat qiladi.

Maqsad: elektr yoyli pechlarining energetik samaradorligini oshirish hamda ularning elektr ta'minoti tizimiga ko'rsatadigan yuqori garmonik ta'sirlarini kamaytirishning samarali texnik va boshqaruv usullarini eksperimental asosda aniqlashdan iborat.

Usullari: eksperimental o'lchashlar, tok va kuchlanish garmonik tarkibini spektral tahlil qilish hamda kompensatsiya va adaptiv boshqaruv rejimlarini solishtirish usullari asosida olib borildi..

Natijalar: elektr yoyli pechlarining turli ish bosqichlarida energetik ko'rsatkichlar va garmonik tarkib sezilarli darajada o'zgarishi aniqlandi. Adaptiv elektrod boshqaruvi va reaktiv quvvatni kompensatsiyalash choralari qo'llanilganda yoy barqarorligi oshib, tokning maksimal qiymatlari kamaydi. Natijada bir tonna mahsulotga to'g'ri keladigan elektr energiyasi sarfi 1 % ga qisqardi. Shu bilan birga, tokning umumiy garmonik kamayib, elektr energiyasi sifati yaxshilandi. Ushbu natijalar elektr ta'minoti tizimining ishonchligini oshirish va uskunalarning xizmat muddatini uzaytirishga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: elektr yoyli pech, energetik samaradorlik, elektr energiyasi sifati, yuqori garmonikalar, garmonik buzilish, reaktiv quvvat, spektral tahlil, energiya isroflari, barqaror sanoat rivoji.

Повышение энергоэффективности электродуговых печей и анализ влияния высших гармоник

Султонхужа К. Махмутхонов

PhD, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; mahmutkhonov.sultonkhoja.93@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6098-4097>

Актуальность: в настоящее время металлургическая промышленность является одним из крупнейших потребителей электрической энергии, при этом электродуговые печи оказывают существенное влияние на систему электроснабжения как высокоомощные и нелинейные электрические нагрузки. В процессе работы электродуговых печей вследствие неустойчивого горения дуги искажаются формы тока и напряжения, в результате чего в электрических сетях возникают высокие гармоники. Эти гармонические воздействия приводят к ухудшению качества электрической энергии, увеличению потерь и дополнительный перегрев трансформаторов, кабельных линий и распределительных устройств. Ограниченность энергетических ресурсов, рост тарифов на электроэнергию и ужесточение требований к энергоэффективности на промышленных предприятиях делают задачу повышения энергетической эффективности электродуговых печей особенно актуальной. Снижение потребления электроэнергии позволяет уменьшить себестоимость продукции, а также сократить выбросы парниковых газов, образующихся при производстве электрической энергии. В то же время уменьшение уровня высших гармоник повышает надёжность системы электроснабжения и ограничивает негативное влияние на качество электроэнергии у других потребителей. В связи с этим исследования, направленные на снижение гармонических воздействий и оптимизацию энергетических потерь в электродуговых печах, имеют важное научно-практическое значение с точки зрения устойчивого промышленного развития.

Цель: целью исследования является экспериментальное определение эффективных технических и управляющих методов повышения энергетической эффективности электродуговых печей и снижения их гармонического воздействия на систему электроснабжения.

For citation: Makhmutkhonov S.K.
Improving the Energy Efficiency of
Electric Arc Furnaces and Analysis of
High Harmonic Impacts. Scientific and
technical journal of Problems of En-
ergy and Sources Saving, 2026, no. 2
pp. 121-126.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21205669>

Received: 24.12.2025

Revised: 20.04.2026

Accepted: 10.06.2026

Published: 26.06.2026

Copyright: © Kakhraman R. Allaev,
Tokhir F. Makhmudov, Denis Y. Lo-
sev, 2025. Submitted to Problems of
Energy and Sources Saving for possi-
ble open access publication under the
terms and conditions of the Creative
Commons Attribution (CC BY) license
([https://creativecommons.org/li-
censes/by/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).



Методы: исследование выполнено на основе экспериментальных измерений, спектрального анализа гармонического состава тока и напряжения, а также сравнительного анализа режимов компенсации и адаптивного управления.

Результаты: установлено, что на различных стадиях работы электродуговых печей энергетические показатели и гармонический состав существенно изменяются. Применение адаптивного управления электродами и компенсации реактивной мощности привело к повышению устойчивости дуги и снижению максимальных значений тока. В результате удельное потребление электрической энергии на одну тонну продукции сократилось на 1 %. Одновременно наблюдалось снижение общего уровня гармонических искажений тока и улучшение качества электрической энергии. Полученные результаты способствуют повышению надёжности системы электроснабжения и увеличению срока службы электрооборудования.

Ключевые слова: электродуговая печь, энергетическая эффективность, качество электрической энергии, высшие гармоники, гармонические искажения, реактивная мощность, спектральный анализ, энергетические потери, устойчивое промышленное развитие.

Improving the Energy Efficiency of Electric Arc Furnaces and Analysis of High Harmonic Impacts

Sultonkhoja K. Makhmutkhonov

PhD., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; mahmutkhonov.sultonkhoja.93@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6098-4097>

Relevance: at present, the metallurgical industry is one of the largest consumers of electrical energy, and electric arc furnaces have a significant impact on power supply systems as high-power and nonlinear electrical loads. During the operation of electric arc furnaces, unstable arc burning causes distortion of current and voltage waveforms, leading to the generation of high-order harmonics in electrical networks. These harmonic effects result in deterioration of power quality, increased additional losses, and overheating of transformers, cable lines, and distribution equipment. The limited availability of energy resources, rising electricity tariffs, and stricter energy efficiency requirements imposed on industrial enterprises make the improvement of energy efficiency in electric arc furnaces increasingly important. Reducing electricity consumption not only lowers production costs but also decreases greenhouse gas emissions associated with power generation. At the same time, mitigation of high-order harmonics enhances the reliability of power supply systems and limits adverse impacts on power quality for other consumers. Therefore, research aimed at reducing harmonic effects and optimizing energy losses in electric arc furnaces is of great scientific and practical importance for sustainable industrial development.

Aim: the objective of this study is to experimentally identify effective technical and control methods for improving the energy efficiency of electric arc furnaces and reducing their harmonic impact on power supply systems.

Methods: the study was carried out based on experimental measurements, spectral analysis of the harmonic content of current and voltage, and comparative analysis of compensation and adaptive control operating modes.

Results: it was found that energy performance indicators and harmonic characteristics vary significantly at different operating stages of electric arc furnaces. The application of adaptive electrode control and reactive power compensation improved arc stability and reduced peak current values. As a result, the specific electrical energy consumption per ton of product decreased by 1%. In addition, a reduction in the overall current harmonic distortion was observed, leading to improved power quality. These results contribute to increased reliability of power supply systems and extended service life of electrical equipment.

Keywords: electric arc furnace, energy efficiency, power quality, high-order harmonics, harmonic distortion, reactive power, spectral analysis, energy losses, sustainable industrial development.

1. Kirish (Introduction)

Zamonaviy metallurgiya sanoati yuqori energiya sig'imiga ega bo'lgan texnologik jarayonlar bilan tavsiflanadi. Ushbu sohada elektr yoyli pechlar po'lat ishlab chiqarishning asosiy vositalaridan biri bo'lib, metall chiqindilarini qayta eritish orqali resurslardan samarali foydalanishni ta'minlaydi. Shu bilan birga, elektr yoyli pechlarining ishlashi yuqori quvvatli, keskin o'zgaruvchan va noxiziqli elektr yuklamalari bilan bog'liq bo'lib, elektr ta'minoti tizimida jiddiy muammolarni yuzaga keltiradi [1].

Elektr yoyli pechlarda yoyning beqaror yonishi natijasida tok va kuchlanishning vaqt bo'yicha shakli buziladi, elektr energiyasi iste'moli notekis bo'ladi hamda keng spektrli yuqori garmonikalar hosil bo'ladi. Ushbu garmonik ta'sirlar elektr energiyasi sifatining yomonlashuviga, transformatorlar, qisqa tarmoqlar va kabel liniyalarida qo'shimcha aktiv isroflar hamda ortiqcha qizishlarning paydo bo'lishiga olib keladi. Natijada elektr ta'minoti tizimining ishonchiligi pasayadi va ishlab chiqarish jarayonining umumiy energetik samaradorligi kamayadi [2].

So'nggi yillarda elektr energiyasi tariflarining oshib borishi, energiya resurslarining cheklanganligi hamda ekologik talablarning kuchayishi elektr yoyli pechlarning energetik samaradorligini oshirish va ularning elektr tarmog'iga salbiy ta'sirini kamaytirish masalasini dolzarb ilmiy-texnik vazifaga aylantirdi. Elektr energiyasi sarfining kamaytirilishi ishlab chiqarish tannaxirini pasaytirish bilan birga, elektr energiyasi ishlab chiqarish bilan bog'liq issiqxona gazlari chiqindilarini qisqartirish imkonini ham beradi[6].

Mazkur tadqiqot elektr yoyli pechlarning energetik samaradorligini oshirish va yuqori garmonik ta'sirlarini kamaytirish masalalarini eksperimental asosda o'rganishga qaratilgan. Tadqiqot jarayonida elektr yoyli pechlarning turli ish bosqichlarida tok va kuchlanish rejimlari real vaqt rejimida o'lchandi. Eksperimental o'lchovlar elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini aniqlash uchun AR6 rusumli elektr energiyasi analizatori hamda tok va kuchlanishning vaqt diagrammalarini qayd etish uchun ossillograf yordamida amalga oshirildi. Olingan o'lchov natijalari asosida garmonik tarkib, umumiy garmonik buzilish darajasi va energiya samaradorlik ko'rsatkichlari tahlil qilindi.

Ushbu tadqiqot natijalari elektr yoyli pechlarning ish rejimlarini optimallashtirish, energiya isroflarini kamaytirish va elektr energiyasi sifatini yaxshilashga qaratilgan ilmiy-amaliy tavsiyalar ishlab chiqish uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

2. Metodlar va materiallar (Methods and materials)

Mazkur tadqiqot elektr yoyli pechlarning energetik samaradorligini oshirish va yuqori garmonik ta'sirlarini kamaytirish masalalarini o'rganishga qaratilgan bo'lib, u sanoat sharoitida amalga oshirilgan eksperimental o'lchovlarga asoslanadi. Tadqiqot obyekti sifatida Toshkent viloyati Ohangaron tumanida joylashgan SP OOO "LI DA METAL TECHNOLOGY" qo'shma korxonasining po'lat eritish sexida ishlayotgan DCPI-30 rusumli, sig'imi 30 tonna bo'lgan elektr yoyli pech tanlandi. Ushbu pech yuqori quvvatli, nohiziqli va keskin o'zgaruvchan elektr yuklamasi sifatida elektr ta'minoti tizimiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi

Eksperimental tadqiqotlar elektr yoyli pechning real ish sharoitida olib borildi. O'lchovlar metall eritish jarayonining turli texnologik bosqichlarida, jumladan salqon (salt ishlash), metallolom yuklash va faol eritish rejimlarida bajarildi. Pechning ish jarayoni maxsus vizualizatsiya tizimi va OnlineTrend-Control dasturiy muhiti orqali kuzatilib, fazalardagi tok va kuchlanishlarning vaqt bo'yicha o'zgarishi nazorat qilindi

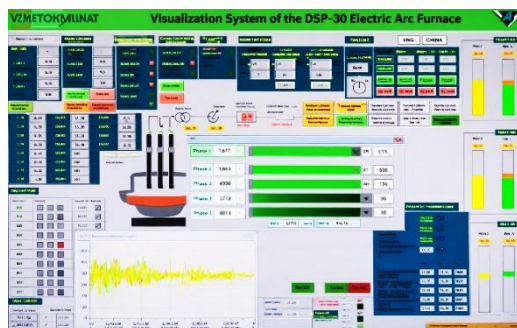
Elektr energiyasi sifati va energetik ko'rsatkichlarni aniqlash uchun AR6 Circutor rusumli elektr energiyasi analizatori qo'llanildi. Ushbu analizator yordamida pech transformatorining ikkilamchi tomoni — qisqa tarmoqda fazaviy kuchlanish va tok signallarining osillogrammalari qayd etildi. O'lchovlar davomida kuchlanish amplitudalari va shaklining vaqt bo'yicha o'zgarishi aniqlanib, elektr yoyli pech ish rejimlarining elektr tarmog'iga ta'siri baholandi

O'lchov natijalari asosida kuchlanish va tok signallari tezkor Furje o'zgartirishi (Fast Fourier Transform — FFT) usuli yordamida qayta ishlaniib, ularning spektral tarkibi aniqlandi. Ushbu yondashuv elektr yoyli pech ishida yuzaga keladigan yuqori garmonik ta'sirlarni sifat jihatidan baholash uchun metodik asos bo'lib xizmat qildi. Shuningdek, elektr yoyli pechni ta'minlovchi "Sanoat" podstantsiyasida o'rnatilgan SVG (Static Var Generator) qurilmasining mavjudligi sharoitida o'lchovlar olib borilib, dinamik reaktiv quvvat kompensatsiyasining elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlariga ta'siri baholandi.

3. Natijalar va muhokama (Results and discussion)

Elektr yoyli pechda o'tkazilgan eksperimental tadqiqotlar natijalari DCPI-30 pechining elektr yuklamalari keskin o'zgaruvchan va nohiziqli xarakterga ega ekanligini ko'rsatdi. Pechning ish jarayoni davomida tok va kuchlanishning vaqt bo'yicha o'zgarishi, fazalararo nosimmetriya hamda yuqori garmonikalarning yuzaga kelishi kuzatildi.

1-rasmda elektr yoyli pech elektrodlarining holati va fazalar bo'yicha yuklama real vaqt rejimida ko'rsatilgan.

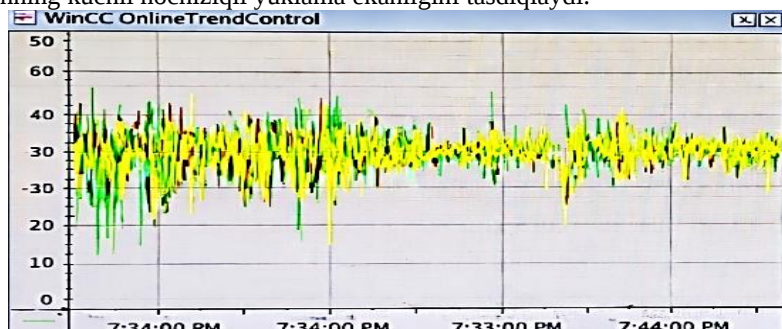


1-rasm. DSP-30 pechining vizualizatsiya tizimi

Fig. 1. Visualization System of the DSP-30 Electric Arc Furnace

Ushbu rasmda elektrodning gidravlik tizim orqali vertikal harakati natijasida yoy uzunligining doimiy o'zgarib turishi kuzatiladi. Bu holat yoy barqarorligining buzilishiga olib kelib, tok va kuchlanish shakllarining beqarorlashishiga sabab bo'ladi.

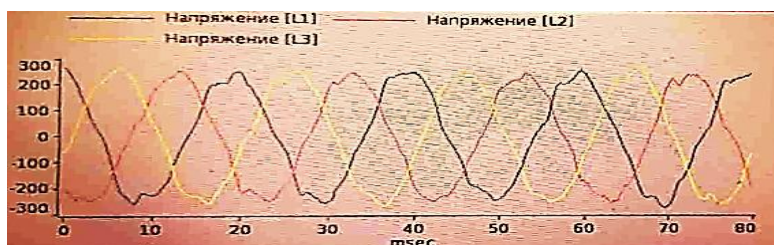
2-rasmda keltirilgan OnlineTrendControl oynasi orqali olingan faza toklarining vaqt bo'yicha o'zgarish grafiklari metall eritish rejimida tok qiymatlarining keskin tebranishini yaqqol namoyon etadi. Ayrim vaqt momentlarida fazalar orasidagi tok farqi o'nlab kiloampnerni tashkil etib, yuklamaning nosimmetrikliligini ko'rsatadi. Tok egri chiziqlarining sinusoidal shakldan sezilarli darajada og'ishi elektr yoyli pechning kuchli nochiziqli yuklama ekanligini tasdiqlaydi.



2-rasm. OnlineTrend Control oynasi orqali EYP faza toklarining vaqt bo'yicha o'zgarish grafiklari

Fig. 2. Time-domain variation of electric arc furnace phase currents obtained via the OnlineTrend Control interface

3-rasmda kuchlanish egri chiziqlarining amplitudasi va shakli vaqt bo'yicha o'zgarib turishi kuza-tiladi.

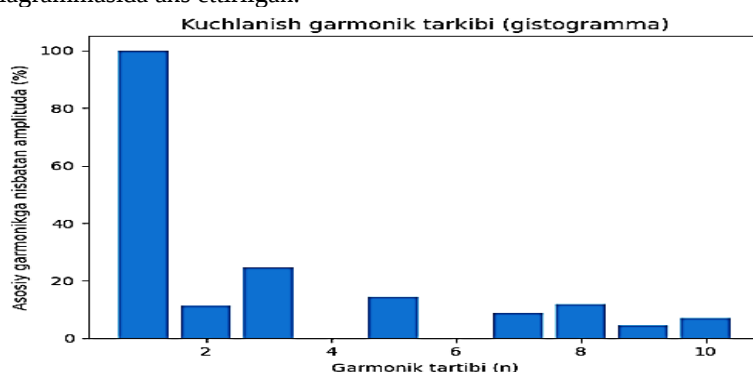


3-rasm. DSP-30 elektr yoy pechining qisqa tarmog'ida kuchlanish o'zgarish

Fig. 3. Voltage variation in the short network of the DSP-30 electric arc furnace

Ushbu osillogrammalar elektr yoyli pech ish jarayonida elektr ta'minoti tarmog'ida kuchlanish sifati yomonlashishini ko'rsatadi. Kuchlanish signallarining sinusoidal shakldan og'ishi yuqori garmonikalarining mavjudligini bildiradi.

Kuchlanish osillogrammalari asosida bajarilgan spektral tahlil natijalari 4-rasmda keltirilgan garmonik spektr diagrammasida aks ettirilgan.



4-rasm. Yuqori garmonikalar tahlili

Fig. 4. Analysis of high-order harmonics

Diagrammadan ko'rinib turibdiki, kuchlanish spektrida asosiy garmonik bilan bir qatorda bir qator past va o'rta tartibli yuqori garmonikalar sezilarli amplitudaga ega. Ayniqsa, 2-, 3-, 5- va 7-garmonikalarining mavjudligi elektr yoyli pech yuklamasining nochiziqli xususiyatini yaqqol tasdiqlaydi.

Past tartibli garmonikalarining ustunligi, birinchi navbatda, yoyning beqaror yonishi va fazalar bo'yicha toklarning notekis taqsimlanishi bilan bog'liq. Elektr yoyli pechda yoy uzunligining doimiy o'zgarib turishi kuchlanish va tok shakllarining sinusoidal dan og'ishiga olib keladi, bu esa garmonikalarining hosil bo'lishiga sabab bo'ladi. 3-garmonikning yuqori ulushi uch fazali tizimda nol

ketma-ketlik komponentlarining kuchayishiga olib kelib, transformator va neytral elementlarga qo'shimcha yuklama hosil qiladi.

5- va 7-garmonikalarning mavjudligi elektr ta'minoti tizimida elektromagnit moslashuv muammolarini kuchaytiradi. Ushbu garmonikalar kabel liniyalari va transformatorlarda qo'shimcha aktiv isroflar hamda ortiqcha qizishlarni yuzaga keltirib, uskunalarining xizmat muddatini qisqartirishi mumkin. Bundan tashqari, yuqori garmonikalar kuchlanish sifatining yomonlashuviga olib kelib, elektr tarmog'iga ulangan boshqa iste'molchilarning normal ishlashiga salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Yuqori garmonikalar sababli qo'shimcha aktiv quvvat isroflari (ΔP) tahlili. Yuqorida keltirilgan kuchlanish garmonik spektrida past va o'rta tartibli garmonikalarning sezilarli ulushi elektr yoyli pech ish jarayonida qo'shimcha energiya isrofiga olib kelishini ko'rsatadi. Yuqori garmonikalar mavjud bo'lganda tokning samarali (RMS) qiymati ortadi va natijada elektr tarmog'i elementlarida aktiv quvvat isroflari oshadi [2-3].

Tokning umumiy samarali qiymati garmonikalar bo'yicha quyidagicha aniqlanadi:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} ; \quad (1)$$

bu yerda I_1 - asosiy garmonik toki, I_n — nnn-garmonik toki.

Garmonikalar bo'lmagan ideal holatda tarmoqdagi aktiv quvvat isrofi:

$$P_1 = 3RI_1^2 ; \quad (2)$$

garmonikalar mavjud bo'lganda esa:

$$P = 3R \sum_{n=1}^N I_n^2 . \quad (3)$$

Shunga mos ravishda yuqori garmonikalar sababli yuzaga keladigan qo'shimcha aktiv isrof quyidagicha ifodalanadi:

$$\Delta P = P - P_1 = 3R \sum_{n=2}^N I_n^2 . \quad (4)$$

Agar tok bo'yicha umumiy garmonik buzilish ko'rsatkichi THD ma'lum bo'lsa:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} ; \quad (5)$$

unda qo'shimcha isroflar quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\Delta P = 3RI_1^2 \cdot THD_I^2 . \quad (6)$$

Mazkur ifoda shuni ko'rsatadiki, garmonikalar sababli aktiv quvvat isroflari THD_I ning kvadratiga proporsional bo'lib, garmonik buzilishlar ortishi bilan kabel liniyalari, qisqa tarmoq va pech transformatorida qizish ham keskin kuchayadi [1-4].

Bundan tashqari, yuqori tartibli garmonikalarda chastota oshishi sababli o'tkazgichlarda sirt effekti yuzaga keladi va ekvivalent qarshilik ortadi. Bu holat quyidagicha ifodalanadi:

$$P = 3 \sum_{n=1}^N R_n I_n^2 ; \quad (7)$$

bu yerda $R_n > R_1$ bo'lib, yuqori garmonikalarda qo'shimcha isroflarni yanada kuchaytiradi. Natijada elektr yoyli pechlarda garmonik buzilishlar nafaqat elektr energiyasi sifatini yomonlashtiradi, balki bir tonna mahsulotga to'g'ri keladigan elektr energiyasi sarfini oshirib, umumiy energetik samaradorlikni pasaytiradi [4-6].

4. Xulosa (Conclusion)

Mazkur tadqiqotda elektr yoyli pechlarining energetik samaradorligiga va elektr ta'minoti tizimiga ko'rsatadigan yuqori garmonika ta'sirlariga eksperimental asosda baho berildi. DCII-30 rusumli elektr yoyli pechda AR6 energiya analizatori yordamida o'tkazilgan o'lchovlar natijalari pech yuklamasining keskin o'zgaruvchan va noxiziqli xarakterga ega ekanligini ko'rsatdi. Tok va kuchlanish shakllarining sinusoidal dan og'ishi elektr tarmoqlarida yuqori garmonikalarning hosil bo'lishiga olib kelishi aniqlandi.

Spektral tahlil natijalariga ko'ra, qisqa tarmoq kuchlanishida past va o'rta tartibli garmonikalar, xususan 2-, 3-, 5- va 7-garmonikalarning sezilarli ulushiga ega ekanligi kuzatildi. Ushbu garmonikalar tokning samarali qiymatini oshirib, kabel liniyalari, qisqa tarmoq va pech transformatorida qo'shimcha aktiv quvvat yo'qotishlarini yuzaga keltiradi. Analitik ifodalar asosida garmonikalar sababli yuzaga keladigan qo'shimcha yo'qotishlar ΔP tok bo'yicha garmonika buzilish darajasining kvadratiga proporsional ekanligi ko'rsatildi.

Bundan tashqari, yuqori garmonikalar mavjudligida yuza effekti kuchayib, o'tkazgichlarning

ekvivalent qarshiligi ortishi va issiqlik yo'qotishlarining yanada oshishi aniqlandi. Bu holat elektr yoyli pechlarning bir tonna mahsulotga to'g'ri keladigan elektr energiyasi sarfini oshirib, umumiy energetik samaradorlikni pasaytiradi.

Olingan natijalar elektr yoyli pechlarda yuqori garmonika ta'sirlarni kamaytirish va energiya isrofini qisqartirish uchun reaktiv quvvatni kompensatsiyalash, garmonikalarni filtratsiyalash hamda adaptiv boshqaruv algoritmlarini qo'llash zarurligini ilmiy jihatdan asoslaydi. Ushbu chora-tadbirlar sanoat elektr ta'minoti tizimlarining ishonchligini oshirish, energiya samaradorligini yaxshilash va barqaror sanoat rivojini ta'minlashga xizmat qiladi.

ADABIYOT

1. Arrillaga J. & Watson N. R. (2003). Power system harmonics (2nd ed.). John Wiley & Sons.
2. Beites L. F. (2010). Electric arc furnace steelmaking. Iron & Steel Society.
3. Bollen M. H. J. & Hassan F. (2011). Integration of distributed generation in the power system. IEEE Press–Wiley.
4. IEC. (2008). IEC 61000-3-6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems. International Electrotechnical Commission.
5. Zhang L., Xu Z. & Xiao X. (2018). Harmonic analysis and suppression in electric arc furnaces. IEEE Transactions on Power Delivery, 33(4), 1891–1899. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2800123>.
6. S.K. Mahmutxonov. Umumiy ulanish nuqtasidagi elektr energiya iste'molchilarining kuchlanish sifatiga ta'sirini baholash // "Yashil iqtisodiyot uchun zamonaviy elektr mashinalari va yuritmalarining rivoji" mavzusidagi respublika ilmiy-texnika anjumani materiallari. — 245–246-betlar, 2025-yil.
7. S.K. Mahmutxonov. Metallurgiya zavodi eritish sexining tok va kuchlanish sifatiga ta'sirini o'rganish // Energiya va resurs tejash muammolari. — Maxsus son (№87), 358–364-betlar, 2024-yil.

REFERENCES

1. Arrillaga J. & Watson N. R. (2003). Power system harmonics (2nd ed.). John Wiley & Sons.
2. Beites L.F. (2010). Electric arc furnace steelmaking. Iron & Steel Society.
3. Bollen M. H. J., Hassan F. (2011). Integration of distributed generation in the power system. IEEE Press–Wiley.
4. IEC. (2008). IEC 61000-3-6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems. International Electrotechnical Commission.
5. Zhang L., Xu Z., & Xiao X. (2018). Harmonic analysis and suppression in electric arc furnaces. IEEE Transactions on Power Delivery, 33(4), 1891–1899. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2800123>.
6. Makhmutkhonov, S. K. (2025). Assessment of the impact of electric power consumers on voltage quality at the point of common coupling. In Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference "Development of Modern Electrical Machines and Drives for the Green Economy" (pp. 245–246).
7. Makhmutkhonov S.K. (2024). Investigation of the impact of a metallurgical plant melting shop on current and voltage quality. Energy and Resource Saving Problems, Special Issue No. 87, 358–364.