

УДК: 621.31

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ПУТЁМ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рахмонов Икромжон Усмонович – доктор технических наук (DSc), профессор,

ORCID: 0000-0003-2076-5919, E-mail: raxmonov.ikromjon@tdtu.uz

Холихматов Бахриддин Берди угли – самостоятельный соискатель (PhD), ассистент,

E-mail: xolixmatov.b22@mail.ru

Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В данной статье рассмотрены пути повышения энергоэффективности электродуговых сталеплавильных печей (ЭДП) за счёт улучшения качества электроэнергии, подаваемой в металлургические предприятия. Анализ показал, что существенное влияние на перерасход энергии оказывают такие факторы, как несимметрия фазных напряжений, наличие гармоник и реактивной мощности. В рамках исследования предложено техническое решение — устройство автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности. Устройство обеспечивает симметрирование напряжения, снижение гармонических искажений и адаптивное управление в условиях нестабильной нагрузки. Проведённые измерения до и после внедрения устройства показали улучшение симметрии фаз, снижение удельного расхода электроэнергии на тонну стали на 10–12%, что подтверждает его высокую эффективность.

Ключевые слова: энергоэффективность, электродуговая печь, качество электроэнергии, симметрия фаз, гармоники, реактивная мощность, потери, устройство регулирования.

УО'К: 621.31

ELEKTR ENERGIYASI SIFATINI OSHIRISH ORQALI ELEKTR YOYLI PO‘LAT ERITISH PECHLARIDA ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISH

Raxmonov Ikromjon Usmonovich – texnika fanlari doktori (DSc), professor

Xolixmatov Baxriddin Berdi o‘g‘li – mustaqil izlanuvchi (PhD), assistent

Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada metallurgiya korxonalariga yetkazib beriladigan elektr energiyasi sifatiga ta’sir etuvchi omillarni yaxshilash orqali elektr yoyli po‘lat eritish pechlarining (EYoP) energiya samaradorligini oshirish yo‘llari ko‘rib chiqilgan. Tahlil shuni ko‘rsatdiki, energiyaning ortiqcha sarflanishiga asosiy ta’sir qiluvchi omillar – bu fazalar kuchlanishining nosimmetriyasi, garmonikalar mavjudligi va reaktiv quvvatning ortig‘i hisoblanadi. Tadqiqot doirasida texnik yechim sifatida – kuchlanish va reaktiv quvvatni avtomatik tarzda boshqaruvchi maxsus qurilma taklif etildi. Ushbu qurilma fazalar kuchlanishini simmetriyalash, garmonik buzilishlarni kamaytirish va noaniq yuklama sharoitida adaptiv boshqaruvni ta’minlaydi. Qurilma joriy etilishidan oldin va keyin o‘lchangan natijalar fazalar simmetriyasi yaxshilanganini hamda 1 tonna po‘lat eritish uchun sarflanadigan elektr energiyasining 10–12% ga kamayganini ko‘rsatdi, bu esa taklif etilgan yechimning samaradorligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: energiya samaradorligi, elektr yoyli pech, elektr energiyasi sifati, fazalar simmetriyasi, garmonikalar, reaktiv quvvat, yo‘qotishlar, boshqaruv qurilmasi.

UDC: 621.31

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES BY ENHANCING POWER QUALITY

Rakhmonov, Ikromjon Usmonovich – Doctor of Technical Sciences (DSc),

Kholikhmatov, Bakhridin Berdi ugli – independent researcher (PhD), Assistant

Tashkent State Technical University, Tashkent city, Uzbekistan

Abstract. This article explores ways to improve the energy efficiency of electric arc steelmaking furnaces (EAFs) by enhancing the quality of electricity supplied to metallurgical enterprises. The analysis revealed that significant contributors to energy overconsumption include phase voltage asymmetry, the presence of harmonics, and reactive power. As part of the study, a technical solution was proposed – a device for automatic voltage and reactive power regulation. The device ensures voltage symmetrization, reduction of harmonic distortion, and adaptive control under unstable load conditions. Measurements taken before and after the implementation of the device demonstrated improved phase symmetry and a 10–12% reduction in the specific electricity consumption per ton of steel, confirming the high efficiency of the proposed solution.

Keywords: energy efficiency, electric arc furnace, power quality, phase symmetry, harmonics, reactive power, losses, regulation device.

Введение

Металлургическая промышленность занимает стратегически важное место в экономике Республики Узбекистан. Спрос на металл и металлоконструкции постоянно растёт, в результате чего увеличивается нагрузка на энергетическую инфраструктуру. Особую роль в энергопотреблении играют электродуговые сталеплавильные печи (ЭДП), характеризующиеся чрезвычайно высокими удельными расходами электроэнергии. В среднем по республике расход электроэнергии на 1 тонну стали составляет 420–460 кВт·ч, тогда как в развитых странах этот показатель не превышает 360 кВт·ч (Рис.1) [3].

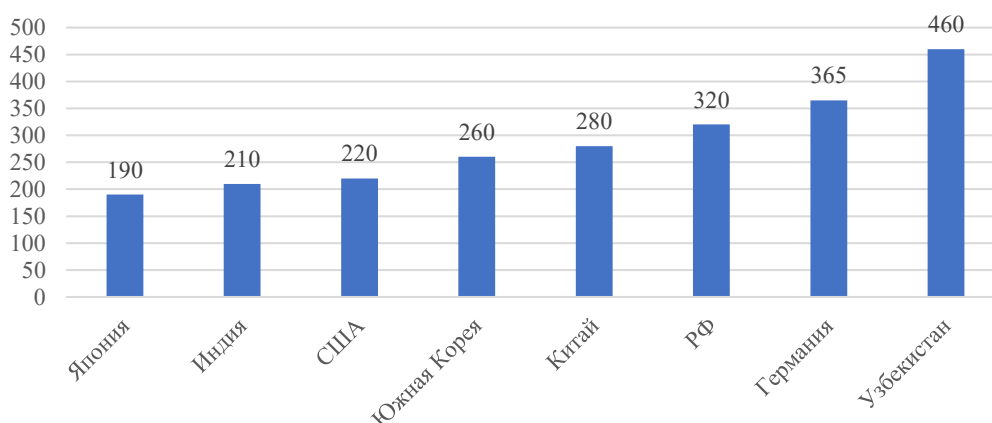


Рис.1. Удельный расход электроэнергии при выплавке 1 тонны стали в международной практике [8].

Низкая энергоэффективность ЭДП связана, прежде всего, с нестабильностью качества питающей электроэнергии. Нарушение симметрии фаз, наличие гармоник и колебания напряжения приводят к ухудшению работы оборудования, росту эксплуатационных затрат и снижению срока службы элементов сети [10]. Решение этих проблем путём улучшения параметров качества электроэнергии является приоритетной задачей для повышения эффективности сталеплавильного производства.

Современное состояние и энергетические проблемы электродуговых сталеплавильных печей.

В настоящее время металлургическая промышленность, обеспечивающая сырьём строительство, машиностроение, транспорт, энергетику, занимает важное место в экономике Узбекистана. В связи с ростом спроса на сталь и металлоконструкции вопрос расширения производства стали считается актуальным. Однако в то же время существует и риск возникновения серьезных проблем в сфере электроснабжения, в том числе с качеством электроэнергии.

Согласно официальным данным по энергетическому балансу Республики Узбекистан на 2024 год, объем выработки электроэнергии составил около 80 млрд. кВт·ч (Рис.2). Более 52% всей потребляемой энергии приходится на промышленный сектор, в котором металлургические предприятия занимают 12–14%. Это делает сталеплавильные заводы одними из крупнейших потребителей электроэнергии в стране.

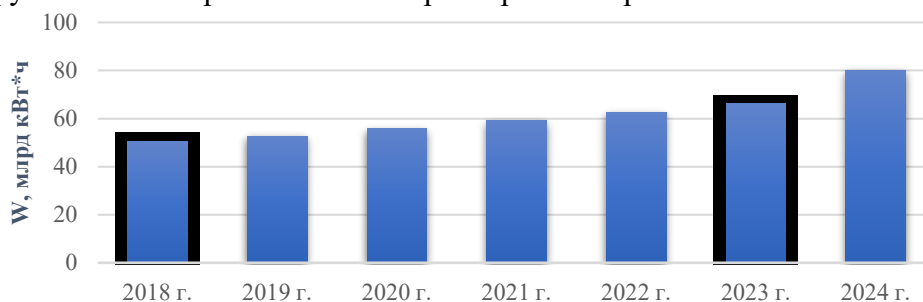


Рис.2. Рост потребления электроэнергии в Республике Узбекистан за период 2018–2024 гг. [9].

Особенность металлургического производства, основанного на применении электродуговых сталеплавильных печей (ЭДП), заключается в резком и неравномерном потреблении мощности. Работа ЭДП сопровождается высокими пусковыми токами, резкими изменениями нагрузки, частыми переходными процессами и длительным временем плавки. Всё это оказывает негативное влияние на питающую сеть и создаёт проблемы, связанные с качеством электроэнергии: Основные энергетические проблемы ЭДП:

- в процессе плавки наблюдаются неравномерные токи по фазам из-за разной длины дуги и нестабильного положения электродов. Это приводит к несимметрии напряжения в сети, достигающей 5-6%, что превышает допустимый нормативный диапазон (2-4%) [1, 2]. Это значение увеличивает потери в трансформаторах и линиях, приводит к перегреву оборудования и ухудшению изоляции.

- из-за прерывистого и нелинейного характера дугового разряда в токе и напряжении появляются высшие гармоники. В связи с этим коэффициент нелинейных искажений (Total Harmonic Distortion, THD) в питающих сетях может превышать 8–10%, тогда как допустимые значения по международным стандартам составляют не более 5%. Высшие гармоники вызывают перегрев кабелей и трансформаторов, некорректная работа реле и автоматики вызывает резонансные явления, ухудшение коэффициента мощности и т.д.

Комплексное воздействие указанных факторов оказывает прямое влияние на уровень удельного расхода электроэнергии на тонну выплавляемой продукции. В Узбекистане этот показатель составляет 420–460 кВт·ч/т, тогда как в ряде зарубежных стран этот показатель составляет 200–260 кВт·ч/т. Это, в свою очередь, означает, что потребление электроэнергии в этом районе выше нормы. Даже частичное устранение проблем, связанных с качеством электроэнергии, может привести к снижению энергопотребления на 8–10%, не требуя масштабной реконструкции оборудования. Однако для этого необходимо техническое решение, направленное на выравнивание фазных напряжений, компенсацию реактивной мощности и фильтрацию гармоник в режиме реального времени.

Для достижения устойчивого повышения энергоэффективности в электродуговых сталеплавильных печах требуется комплексный подход, включающий как технический анализ текущей ситуации, так и разработку и апробацию целенаправленных решений. В рамках данного исследования были определены ключевые цели и задачи, направленные на системное решение выявленных проблем в энергетическом обеспечении металлургических процессов.

Техническое решение – устройство регулирования качества электроэнергии

Разработанное в рамках данного исследования устройство представляет собой техническое решение, предназначенное для автоматического управления параметрами питающей трёхфазной сети в условиях выраженной несимметрии фазных напряжений, наличия реактивных нагрузок и гармонических искажений. Основное назначение устройства

– улучшение симметрии фаз напряжения, компенсация реактивной мощности и стабилизация формы напряжения в реальном времени, что особенно важно при питании переменных нагрузок, таких как дуговые электропечи. На рис. 3 представлена структурная схема устройства, демонстрирующая состав основных компонентов и их взаимосвязь между фазами, трансформаторами, элементами управления и фильтрации [4, 5, 6, 7].

Конструктивно устройство включает три основных функциональных модуля: фазосдвигающий орган (ФСО), орган формирования управляющих напряжений (ФУН) и LC-контур, состоящий из конденсаторной батареи и реактора. Кроме того, в состав входят три регулируемых реактора и три конденсаторных батареи, подключаемых по фазам. ФСО отвечает за выравнивание фазных напряжений, а ФУН формирует управляющие импульсы для активного регулирования силовых элементов, обеспечивая точность и быстродействие.

В фазосдвигающем органе размещены три одинаковых блока, по одному на каждую фазу (А, В, С), каждый из которых включает многообмоточный понижающий трансформатор с одной первичной и четырьмя вторичными обмотками. Первичная обмотка подключается между соответствующей фазой и нулевым проводом питающей сети, а вторичные – задействованы в управлении фазосдвигающим элементом, который формируется на базе линейной индуктивности, нелинейного резистора и параллельного сопротивления, соединённых в определённой последовательности. Эта комбинация обеспечивает возможность точной коррекции фазы и амплитуды напряжения.

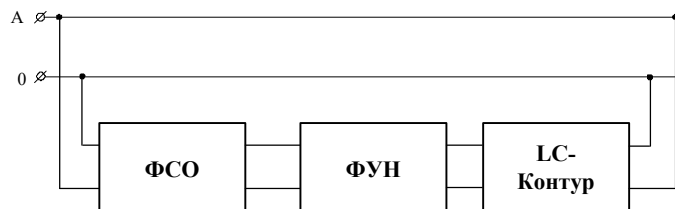


Рис.3. Структурная схема устройства симметрирования напряжений

Орган формирования управляющих напряжений включает три полупроводниковых моста, каждый из которых состоит из двух плеч на неуправляемых диодах и двух плеч на управляемых тиристорах. Управление тиристорами осуществляется с использованием оптопар, которые обеспечивают гальваническую развязку между силовой и логической частью схемы, защищая её от перенапряжений и импульсных помех. Такая конфигурация позволяет генерировать требуемое управляющее напряжение, необходимое для коррекции параметров сети при любых флуктуациях.

Регулируемые реакторы, подключённые параллельно с батареями конденсаторов, служат для компенсации реактивной мощности. Их основное преимущество – наличие обмотки подмагничивания, которая позволяет изменять индуктивность реактора в зависимости от текущей нагрузки. Это особенно важно при резких переходных процессах, сопровождающих работу дуговых печей. Автоматическая корректировка соотношения активной и реактивной составляющих в каждой фазе способствует снижению потерь энергии и стабилизации процесса плавки.

Принцип действия устройства основан на непрерывном мониторинге фазных токов и напряжений, сравнении их с эталонными значениями и формировании управляющих воздействий, направленных на корректировку параметров сети. Алгоритм управления реализован в замкнутом контуре с высоким быстродействием, что позволяет мгновенно реагировать на изменения нагрузки и предотвращать развитие аварийных ситуаций.

Практическое применение устройства показывает, что оно позволяет:

- уменьшить коэффициент несимметрии напряжения до нормативных значений (до 2-4%);
- снизить высших гармоник в спектре напряжения (THD менее 5%);
- стабилизировать работу оборудования, увеличить срок его службы;
- снизить удельный расход электроэнергии на тонну стали на 10–12%.

Стоит отметить, что предлагаемое устройство является модульным и масштабируемым, что позволяет интегрировать его в существующие системы электроснабжения без необходимости масштабной реконструкции. Благодаря своей универсальности, оно применимо как для модернизации действующих энергетических систем металлургических предприятий, так и в составе новых проектов.

В целом устройство демонстрирует высокую техническую и эксплуатационную эффективность, обеспечивает стабилизацию параметров сети при больших промышленных и нелинейных нагрузках, позволяет добиться высокой энергетической и экономической эффективности производства стали.

Результаты

Практическая проверка эффективности разработанного устройства регулирования качества электроэнергии была проведена на промышленном объекте – трансформаторной подстанции, обеспечивающей питание электродуговой сталеплавильной печи типа ДСП-35. Данная печь представляет собой мощный и динамически изменяющийся нагрузочный элемент, характеризующийся частыми пиковыми токами, колебаниями длины дуги и нестабильным положением электрода в процессе плавки. Именно в таких условиях наиболее ярко проявляются проблемы с несимметрией напряжений, искажениями формы сигналов и нестабильностью питающей сети.

До внедрения устройства фазные напряжения на вторичной обмотке трансформатора демонстрировали значительные отклонения от номинальных значений. Коэффициент несимметрии напряжения достигало 5–6%, что существенно превышает допустимый предел в 2–4%, установленных нормативными документами. Помимо несимметрии, фиксировалось значительное присутствие высших гармоник в спектре напряжения, что указывало на наличие нелинейных искажений, типичных для дуговых нагрузок [4].

После подключения устройства регулирования была проведена серия измерений фазных напряжений, искажений формы сигнала и токов в питающей сети. Полученные данные показали устойчивую положительную динамику: величины фазных напряжений стабилизировались, коэффициент несимметрии напряжения уменьшился до 2–2,2%, что укладывается в нормативные рамки (Рис.4). Улучшение симметрии напряжения не только устранило перераспределение токов в фазах, но также снизило уровень циркулирующих токов в нейтрали и связанных с ними потерь мощности.

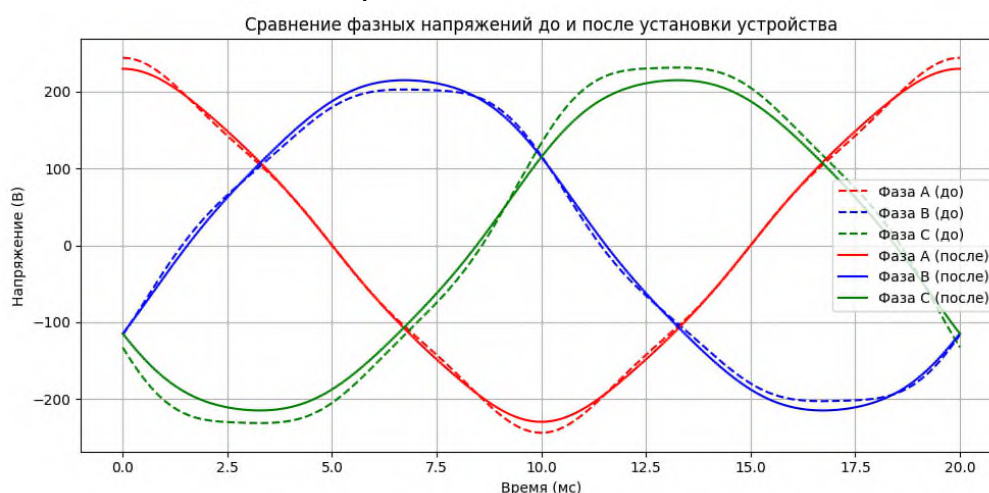


Рис. 4. Сравнение фазных напряжений до и после установки устройства.

До внедрения устройства доля высших гармоник в суммарной составляющей напряжения (THD) превышала 8%, причём преобладали 5-я и 7-я гармоники, наиболее характерные для индуктивно-резистивных промышленных нагрузок. После установки входящих в состав устройства фильтрующих и корректирующих элементов уровень

гармонических искажений снижается до 4,2-4,5%, что существенно улучшает качество питающего напряжения. Такая стабилизация параметров положительно отразилась на всех последующих технологических операциях – плавка стала более равномерной, сократились интервалы между циклами, снизилось количество внештатных отключений оборудования.

Дополнительно были зафиксированы изменения в показателях удельного расхода электроэнергии. Кроме того, можно отметить изменение удельных показателей энергопотребления. При условии стабильной работы печи, после внедрения устройства, удельный расход может быть снижен на 8-10% от значения 445-450 кВт·ч/т. Учитывая высокую себестоимость электрической энергии и объёмы плавки, подобное снижение энергозатрат представляет собой значительный резерв для оптимизации производства.

Итоговая оценка результатов внедрения показывает, что устройство контроля качества электроэнергии не только обеспечивает выравнивание напряжения и фильтрацию помех, но и влияет на всю энергосистему предприятия, снижая суммарные потери, повышая надёжность оборудования, способствуя устойчивой работе энергетической инфраструктуры в условиях больших нагрузок.

Заключение

Проведённое исследование показывает, что низкое качество электроэнергии (несимметрия напряжения, гармоники, реактивная мощность) является одной из главных причин повышенного энергопотребления в электродуговых сталеплавильных печах. Разработанное устройство для автоматического симметрирования напряжения и управления реактивной мощностью обеспечило снижение удельного расхода электроэнергии на 8–10% и стабилизацию параметров сети. Предложенное решение является технически реализуемым и эффективно повышает энергоэффективность без необходимости капитальной модернизации оборудования.

Литература

- [1] Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2018 йил 9 февралдаги №99-сон қарори. «Электр энергияси сифат кўрсаткичларини нормалаштириш тўғрисида». – Тошкент: Адлия вазирлиги, 2018. – 8 б.
- [2] Ўзбекистон миллий стандарти О'z DSt 3295:2018. Электр энергияси сифати. Умумий техник талаблар. – Тошкент: Ўзстандарт, 2018. – 27 б.
- [3] Raxmonov I.U., Xolixmatov B.B., Qorjobova M.F. Metallurgiya sanoatida energiya samaradorligining joriy holati. “Mineral xomashyolarni qazib olish, qayta ishlashning istiqbollari yoshlar nigohida” Respublika ilmiy-texnik anjumani. Olmaliq. 15-may 2024-y. 215-217 b.
- [4] Usmanov E., Kholikhmatov B., Rikhsitillaev B., Nimatov K. E3S Web of Conferences 461, 01052 (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346101052>
- [5] Рахмонов И.У., Усманов Э.Г., Холихматов Б.Б. Управление несимметрией в электрических сетях 0,4 кв. Научно-технический журнал «Проблемы энерго-и ресурсосбережения». Выпуск №3. 2023 г. с.115-122.
- [6] Рахмонов И.У., Холихматов Б.Б. Роль автоматизации и контроля несимметрии напряжения в устойчивости процессов сталеплавильных печей. «Бутаковские чтения» III Всероссийской с международным участием молодёжной конференции. Томск, 12–14 декабря 2023 г. с. 46-49.
- [7] Rakhmonov I.U., Kholikhmatov B.B. Technical solutions for reducing voltage unsymmetry in the steel melting process. “Ilmiy tadqiqotlar, innovatsiyalar, nazariy va amaliy strategiyalar tadqiqi” Respublika ko‘p tarmoqli ilmiy konferensiya. №9, may 2023 y. 48-50 b.
- [8] <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/>
- [9] <https://minenergy.uz/ru/news/view/3621>
- [10] Сойфер В.М., Кузнецов Л.Н. Дуговые печи в сталелитейном цехе. – М. Металлургия, 1989. – 176 с.