

Научная статья
УДК 621.365.22
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.003

ОСОБЕННОСТИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ КАК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Елизавета Игоревна Губская

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, e.gubskaya@ksc.ru*

Аннотация

Дуговая сталеплавильная печь является одним из типовых промышленных потребителей электроэнергии, работа которого оказывает значительное негативное влияние на системы электроснабжения. Главным образом это связано с рядом особенностей технологического процесса плавки. В статье представлено краткое описание устройства и принципа работы электропечи. Приведены схема электроснабжения печи и специфические условия функционирования применяемого электрооборудования. Рассмотрены основные искажения качества электроэнергии в сетях, питающих дуговые электропечи, и показаны причины их возникновения.

Ключевые слова:

дуговая сталеплавильная печь, системы электроснабжения, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Губская Е. И. Особенности дуговых сталеплавильных печей как потребителей электроэнергии // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 29–38. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.003.

Original article

FEATURES OF ELECTRIC ARC FURNACES AS CONSUMERS OF ELECTRICAL ENERGY

Elizaveta I. Gubskaya

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, e.gubskaya@ksc.ru*

Abstract

An electric arc furnace is one of the typical industrial consumers of electrical energy, having a significant negative impact on power supply systems. This is mainly due to a number of specific features of the melting process. The article presents a brief description of the structure and principle of furnace operation. The scheme of electric power supply of the furnace and the specific conditions of functioning of the electrical equipment used are given. The main power quality distortions in the networks supplying electric arc furnaces are considered, and the causes of these disturbances are shown.

Keywords:

electric arc furnace, power supply systems, electromagnetic compatibility, power quality

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Gubskaya E. I. Features of electric arc furnaces as consumers of electrical energy // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 29–38. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.003.

Введение

Дуговая электрическая печь является энергоемкой электротехнической установкой, в которой плавление металлов и других материалов осуществляется за счет теплового эффекта электрической дуги. В настоящее время такие печи широко применяются в металлургии, машиностроении, химической и других отраслях промышленности.

Поскольку в процессе электроплавки точно регулируется температура металла и содержание в нем примесей и, следовательно, возможно получать сплавы практически любого состава, дуговые электропечи используются в первую очередь в производстве сталей.

В дуговых сталеплавильных печах (ДСП) выплавляют высоколегированные инструментальные стали, жаропрочные и жаростойкие, нержавеющие стали, подшипниковые, а также многие другие конструкционные стали, производство которых с помощью конвертера и мартеновской печи сопряжено с рядом трудностей [1].

Преимущество ДСП относительно других сталеплавильных агрегатов обусловлено следующим:

- отсутствие высоких требований к качеству шихтовых материалов (содержанию примесей в ломе);
- возможность введения в печь большого количества легирующих элементов за счет быстрого нагрева металла;
- точная и плавная регулировка температуры сплава;
- обеспечение низкого содержания серы, фосфора и неметаллических включений в составе сплавов;
- малые потери легирующих элементов в результате окисления за счет возможности регулирования окислительно-восстановительных свойств среды в процессе плавки, а также обеспечения в печи восстановительной атмосферы и безокислительных шлаков.

Применение ДСП, тем не менее, имеет ряд недостатков, к которым относят:

- трудность перемешивания металла, что в некоторой степени препятствует усреднению его температуры и химического состава;
- выделение значительного количества продуктов горения и производство шума во время работы [2, 3].

С позиции осуществления электропитания дуговая сталеплавильная печь является проблемным энергопотребителем, поскольку необходимо обеспечить согласование параметров печи и питающей сети, а также сглаживание значительных возмущений, возникающих в сети в процессе плавки. Негативное воздействие ДСП на системы электроснабжения обусловлено главным образом принципом действия установки и специфичными условиями ее работы.

Принцип работы дуговых электропечей

Различают два основных вида дуговых электропечей: печи прямого действия (нагрева), в которых электрическая дуга горит между электродом и расплавляемым металлом, при этом энергия дуги передается металлу непосредственно, и печи косвенного действия (нагрева), в которых дуга горит между двумя электродами над поверхностью металла, теплопередача при этом осуществляется излучением и конвекцией.

Для плавки стали применяются электропечи прямого нагрева, к которым относятся печи переменного тока и печи постоянного тока.

В печах первого типа трехфазный переменный ток промышленной частоты (50 Гц) подается в плавильное пространство через три электрода. Когда электроды, на которые подано напряжение, опущены вниз и кратковременно соприкасаются с загруженным в печь металлом, возникает короткое замыкание. В этот момент в электрической цепи протекает ток большой силы. Затем электроды немного приподнимаются, в результате между ними и верхним слоем шихты возникают электрические дуги. Аналогичным образом возникают электрические дуги в дуговых печах постоянного тока. В качестве катода выступает единственный электрод. Анод расположен в подине печи и находится в непосредственном контакте с расплавляемым металлом [4].

Применение печей постоянного тока, несмотря на ряд имеющихся преимуществ, которые подробно описаны в работе [5], сопровождается существенными затратами на установку тиристорного преобразователя, предназначенного для выпрямления переменного тока в постоянный, а также, как следствие, дополнительными затратами на необходимое удлинение короткой сети печи и усложнение системы охлаждения. При этом использование постоянного тока не обеспечивает повышения производительности печи относительно использования переменного. В связи с этим наибольшее

распространение в сталеплавильном производстве получили печи переменного тока. Именно этого типа дуговые электропечи рассматриваются в данной статье.

Устройство дуговых сталеплавильных печей

В общем виде устройство ДСП показано на рис. 1. Плавильное пространство электропечи заключено в железный цилиндрический кожух со сферическим днищем, который имеет внутри огнеупорную футеровку и закрывается съемный сводом, подвешенным на цепях. Емкость отечественных ДСП варьируется от 0,5 до 200 т и указывается в обозначении печи (например, ДСП-6).

Загруженные в электропечь шихтовые материалы нагреваются и плавятся, как было описано выше, под воздействием мощных электрических дуг, горящих между концами трех электродов и шихтой, находящимися в печи. Электроды помещаются в плавильное пространство через три отверстия, имеющих в кладке свода. Зажим электродов и подвод к ним электрического тока обеспечивается электрододержателем, который крепится на металлическом рукаве. Перемещение электродов в вертикальном направлении обеспечивает Г-образная подвижная стойка, которая скреплена с металлическим рукавом в единую жесткую конструкцию.

Легирующие элементы подгружаются через рабочее окно в кожухе, которое предназначено также для скачивания шлака, проведения осмотра, заправки, ремонта и загрузки шихты в печи малой емкости.

Слив выплавленного металла осуществляется через выпускное отверстие со сливным желобом. Для наклона печи в процессе слива и для опоры ее корпуса на фундамент служит люлька с двумя опорными сегментами, которые перекатываются по станине. Наклоняется печь с помощью реечного механизма.

Загрузка ДСП осуществляется после предварительного поднятия свода к portalу, который затем отворачивается (со сводом и электродной группой) в сторону сливного желоба [6].

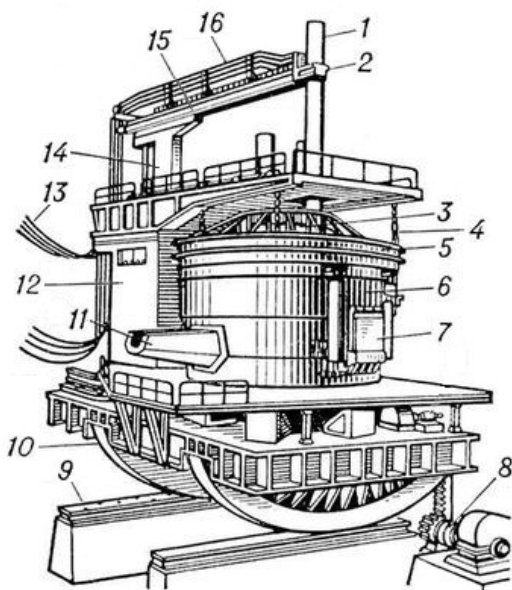


Рис. 1. Общий вид дуговой сталеплавильной печи:

1 — электрод; 2 — электрододержатель; 3 — свод; 4 — подвеска свода; 5 — сводное кольцо; 6 — цилиндрический кожух; 7 — дверца рабочего окна; 8 — механизм наклона печи; 9 — станина; 10 — люлька; 11 — сливной носок; 12 — портал; 13 — гибкий токопровод; 14 — стойка электрододержателя; 15 — рукав электрододержателя; 16 — трубошины токопровода [6]

Fig. 1. Layout of an electric arc furnace:

1 — electrode; 2 — electrode holder; 3 — roof; 4 — roof suspension; 5 — roof ring; 6 — furnace shell; 7 — slag door; 8 — mechanism of furnace tilt; 9 — rocker rail; 10 — rocker; 11 — pouring spout; 12 — roof removal jib structure; 13 — power cables; 14 — rack of electrode holder; 15 — power conducting arm; 16 — bus tubes [6]

Электроснабжение дуговых сталеплавильных печей

В нормальном режиме питание маломощной ДСП (или группы маломощных ДСП) производится от расщепленной обмотки силового трансформатора главной понизительной подстанции (ГПП) или от отдельного трансформатора. В первом случае к системе сборных шин 6–10 кВ ГПП печь (группа печей) подключается по двухступенчатой радиальной схеме, которая предполагает наличие дополнительной распределительной подстанции 6–10 кВ. На предприятиях с ДСП высокой мощности

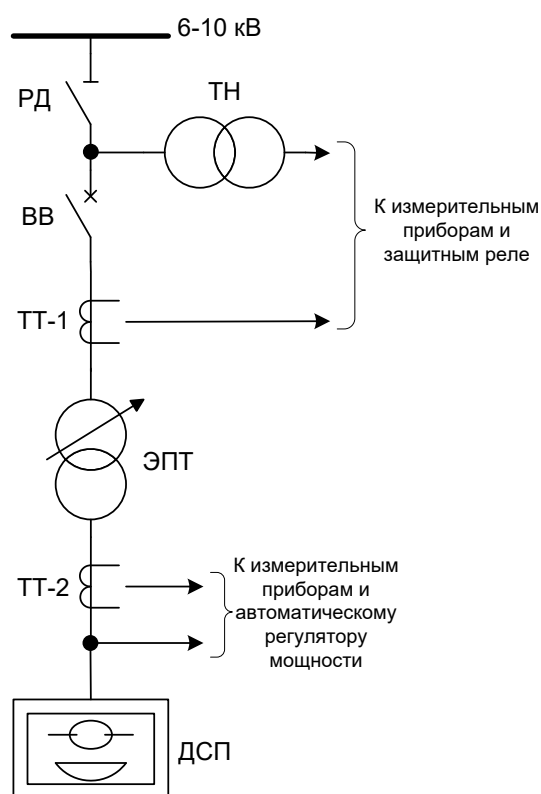


Рис. 2. Принципиальная схема электропитания дуговой сталеплавильной печи

Fig. 2. Diagram of an electric arc furnace power supply

обеспечивает возможность регулирования и стабилизации электрического режима ДСП за счет непрерывного и плавного изменения длин горящих дуг и, следовательно, токов фаз печи путем подъема и опускания электродов.

Ввиду особенностей технологического процесса электроплавки стали электрооборудование ДСП работает в более тяжелых условиях, чем оборудование общепромышленных электроустановок. Эти особенности включают, во-первых, многократные короткие замыкания (к. з.) электродов на расплавляемый металл, которые являются нормальным эксплуатационным явлением, во-вторых, высокие рабочие токи, сила которых достигает десятки тысяч ампер, что обусловлено низким напряжением горения дуг при высокой мощности печи, и, в-третьих, широкие пределы изменения мощности печи и подаваемого на нее напряжения на разных этапах плавки и в зависимости от марки выплавляемой стали.

Таким образом, электрооборудование, применяемое в установках ДСП, рассчитано для работы в условиях многочисленных перегрузок по току вследствие эксплуатационных к. з. и значительных перенапряжений, которые могут быть вызваны частыми колебаниями тока и коммутациями. В связи с этим электропечные трансформаторы имеют усиленную конструкцию, которая позволяет выдерживать возникающие при к. з. механические усилия, а также дополнительный нагрев обмоток, обусловленный толчкообразным режимом работы.

Ограничение толчков тока при эксплуатационных к. з. приемлемыми для нормального функционирования электрооборудования значениями, а также устойчивость горения электрических дуг достигается за счет включения реактора (дополнительной индуктивности) последовательно с печным трансформатором со стороны высшего напряжения. Это мероприятие является необходимым для малых ДСП емкостью до 12 т с трансформаторами мощностью до 9 МВА. В случае использования

может быть организована локальная питающая сеть 35 кВ. Некоторые крупные ДСП получают питание от систем шин 110 кВ [7].

На рис. 2 приведена упрощенная схема электропитания дуговых электропечей от сети 6–10 кВ. Поскольку рабочее напряжение печи составляет 100–800 В и изменяется в указанном диапазоне в зависимости от периода плавки и марки изготавливаемой стали, каждая ДСП снабжается электропечным понижающим трансформатором со ступенчатым регулированием вторичного напряжения (ЭПТ). Переключение обмоток, а следовательно, и регулирование напряжения осуществляется под нагрузкой.

Трансформатор подключается к сборным шинам распределительного устройства через разъединитель (РД) и автоматический вакуумный выключатель (ВВ) с трансформаторами тока (ТТ-1). В электрооборудование ДСП, помимо печного трансформатора и коммутационной аппаратуры, входят защитные реле, а также различная измерительная аппаратура, присоединяемая к сети через трансформаторы тока (ТТ-1 и ТТ-2) или напряжения (ТН). Здесь же необходимо указать быстродействующую систему автоматического регулирования процесса плавки. Данная система, наряду с переключением ступеней низшего напряжения электропечного трансформатора,

печей большей мощности достаточной и даже избыточной является индуктивность электропечного трансформатора и короткой сети [8].

Защиту от перегрузок обеспечивают реле максимального тока, от аварийных к. з. — реле мгновенного действия, при этом уставка последнего выбирается так, чтобы отсутствовал отклик на эксплуатационные к. з., которые устраняются поднятием электродов [9].

Подводя итог приведенному выше краткому описанию особенностей процесса электроплавки и работы печного электрооборудования, можем дать следующую характеристику ДСП как потребителя электроэнергии:

1. Установка работает с низким коэффициентом мощности, который обусловлен высокой индуктивностью печного трансформатора и токоподводов.

2. Нагрузка электропечи является нелинейной вследствие нелинейности сопротивления электрических дуг и резкопеременной, так как во время работы изменяется мощность печи и возникают частые толчки тока.

3. ДСП отличается беспокойным режимом работы, особенно на начальной стадии плавки (этапе расплавления), что обусловлено многократными к. з. электродов на металл, а также неустойчивостью и обрывами дуг.

В совокупности эти факторы определяют ДСП как мощный источник возмущений, оказывающих негативное влияние на питающую сеть, что выражается в нарушении условий электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования системы электроснабжения.

Влияние дуговых сталеплавильных печей на качество электроэнергии в системах электроснабжения

С точки зрения надежного функционирования систем электроснабжения ЭМС электроприемников имеет весомое практическое значение. И поскольку дуговые электропечи являются одной из типовых специфических нагрузок в сетях промышленных предприятий, вопросу отрицательного влияния ДСП на других потребителей уделяется значительное внимание [10–20].

Контроль соблюдения условий обеспечения ЭМС в сетях, питающих дуговые сталеплавильные печи, осуществляется посредством проведения анализа качества электрической энергии, который заключается в установлении степени соответствия совокупности определенных параметров, характеризующих электрическую энергию (напряжение, номинальное значение частоты, форма кривой напряжения и др.), действующих в РФ стандартам [21–24]. Для определения отклонений этих параметров от значений, регламентированных требованиями ГОСТ, производят мониторинговые регистрации показателей качества электроэнергии (ПКЭ).

Согласно результатам исследований, опубликованных в источниках [25–27], в сетях, обеспечивающих электропитание ДСП, наблюдается существенное несоответствие значений ПКЭ установленным нормам. В наибольшей мере проявляются такие искажения, как несинусоидальность и несимметрия напряжений и токов, а также отклонения, провалы и колебания напряжения.

Причиной искажения синусоидальной формы кривых напряжения и тока являются высшие гармоники, генерация в питающую сеть которых связана с задержкой зажигания дуг и нелинейностью их вольт-амперной характеристики [28]. Электрические дуги, кроме того, горят во время работы печи несимметрично, вследствие чего нагрузка ДСП распределяется по фазам неравномерно, вызывая тем самым перекося фаз. Следует отметить, что наибольшие значения коэффициента несимметрии напряжений фиксируются при осуществлении питания ДСП от сетей 6–10 кВ [26].

Отклонения, провалы и значительные колебания напряжения являются следствием колебаний нагрузки электропечи (в особенности потребляемой реактивной мощности), а также колебаний токов дуг при эксплуатационных коротких замыканиях [29]. При этом указанные возмущения, как правило, регистрируются не только на питающей ДСП секции шин, но и на других связанных с ней секциях шин системы электроснабжения. Колебания напряжения, в свою очередь, обуславливают появление фликера, что оказывает неблагоприятное воздействие на электронную технику и осветительные приборы, особенно лампы накаливания [30].

Важно подчеркнуть, что возникновение перечисленных выше искажений наиболее характерно для этапа расплавления металла и начала этапа окисления, поскольку именно в эти периоды плавки нагрузка печи изменяется наиболее резко. На стадии рафинирования электрические дуги горят более равномерно, что приводит к снижению негативного влияния нагрузки ДСП на системы электроснабжения.

Таким образом, работа дуговых сталеплавильных печей вносит значимый вклад в снижение качества электроэнергии в питающих сетях предприятий, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на функционировании других электроприемников, приводит к сбою или отказу систем автоматики и релейной защиты, а также существенно увеличивает потери электроэнергии.

Заключение

Дуговая сталеплавильная печь является одним из наиболее распространенных промышленных потребителей электрической энергии, нагрузка которого носит нелинейный резкопеременный характер, что обусловлено специфичными условиями работы установки. Из-за особенностей технологического процесса плавки ДСП является источником мощных электромагнитных помех, оказывая тем самым неблагоприятное влияние на потребителей, которые получают питание от той же сети. Другими словами, работа ДСП вызывает нарушение условий электромагнитной совместимости оборудования систем электроснабжения.

Соблюдение ЭМС технических средств является значимым аспектом обеспечения устойчивости и безопасности электроэнергетических систем, поскольку предупреждает возникновение серьезных сбоев в работе электрооборудования и аварийных режимов сети. В связи с этим проблема обеспечения ЭМС дуговых электропечей и систем электроснабжения имеет решающее значение при проектировании питающих сетей предприятий. Также очень важно учитывать то, что искажения, вносимые работой ДСП, носят случайный характер и некоторые из них являются быстрыми процессами. Поэтому усреднение произведенных измерений ПКЭ, согласно регламентированной методике, может не в полной мере охарактеризовать текущую электромагнитную обстановку в сети. Кроме того, такой характер оказываемого нагрузкой печи воздействия накладывает определенные трудности на сглаживание возмущений, которые в первую очередь связаны со скоростью ответной реакции установленных компенсирующих устройств.

Таким образом, задача соблюдения соответствия ПКЭ в сетях, питающих ДСП, установленным нормам является достаточно сложной и трудоемкой, поскольку необходимо произвести подробный анализ текущих режимов исследуемой системы электроснабжения и дать взвешенную оценку целесообразности и эффективности тех или иных предлагаемых мероприятий по улучшению качества электроэнергии. Однако эта задача является приоритетной и требует обязательного выполнения в целях обеспечения надежности систем электроснабжения.

Список источников

1. Строганов А. И., Сергеев Г. Н., Лабунович А. И. Дуговые электропечи. М.: Металлургия, 1972. 288 с.
2. Дуговая сталеплавильная печь // Научно-технический портал о металлургии, горной промышленности, машиностроении, обработке металлов, энергетике. URL: <https://metallolome.ru/dugovaya-staleplavilnaya-pec/> (дата обращения: 07.04.2023).
3. Дуговая сталеплавильная печь // Научно-технический портал о металлургии, горной промышленности, машиностроении, обработке металлов, энергетике. URL: <https://metallurgist.pro/dugovaya-staleplavilnaya-pec/> (дата обращения: 07.04.2023).
4. Дуговая печь // Горная промышленность. URL: <http://mining-prom.ru/rud/zhelez/dugovaya-pec/> (дата обращения: 25.04.2023).
5. Афонаскин А. В., Дудоров В. И. Что такое электродуговые печи постоянного тока // Вестник КГУ. 2008. № 3. С. 60–66.

6. Линчевский Б. В., Соболевский А. Л., Кальменев А. А. *Металлургия черных металлов: учебник для техникумов*. 2-е изд. М.: Металлургия, 1986. 360 с.
7. Ополева Г. Н. *Электроснабжение промышленных предприятий и городов: учеб. пособие*. М.: Форум, 2019. 416 с.
8. Бозжанова Р. Н., Живаева О. П. *Общепромышленные потребители систем электроснабжения. Конспект лекций для студентов всех форм обучения специальности 050718 — Электроэнергетика*. Алматы: АИЭС, 2008. 49 с.
9. *Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов* / И. П. Евтюкова [и др.]; под ред. А. Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
10. Ярошевич В. В., Карпов А. С. Влияние нестационарных электромагнитных воздействий на силовые трансформаторы // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2014. № 8. С. 54–62.
11. Проблемы локализации источников искажений электроэнергии и определение вклада подключенных потребителей в искажение или нормализацию качества электроэнергии / В. В. Ярошевич [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2010. № 1. С. 126–138.
12. Singh A., Singh R. K., Singh A. K. Power quality issues of electric arc furnace and their mitigations — a review // *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.* 2017. Vol. 4, No. 4. P. 22–41.
13. Русских П. О., Ярошевич В. В., Карпов А. С. Основные причины сокращенного срока службы силовых трансформаторов // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2016. № 13. С. 72–84.
14. Ласица В. В. Колебания напряжения. Влияние дуговых сталеплавильных печей на колебания напряжения // *Актуальные проблемы энергетики. СНТК-78*. 2020. С. 58–62.
15. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling // *Energy*. 2016. Vol. 115. P. 830–839.
16. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. Power quality and electrical arc furnaces / ed. A. Eberhard. Rijeka: InTech, 2011. 362 p.
17. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques // *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2014. Vol. 3, No. 1. P. 1121–1124.
18. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Юртаев С. Н. Электромагнитная совместимость дуговых печей и систем электроснабжения // Труды Нижегородского технического университета имени Р. Е. Алексеева. 2010. Т. 81, № 2. С. 202–210.
19. Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and static VAR compensator / B. S. Jebaraj [et al.] // *Electronics*. 2021. No. 10. P. 1125.
20. Cano Plata E. A., Tacca H. E. Arc furnace modeling in ATP-EMTP // *International Conference on Power Systems Transients*. Montreal, 2005. IPST05-067.
21. 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. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 40 с.
22. ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.
23. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.
24. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
25. Гаврилов Ф. А., Цыбуля В. В. Влияние дуговых сталеплавильных печей малых объемов на работу электрооборудования // *Вестник Приазовского государственного технического университета*. Серия: Технические науки. 2010. № 20. С. 241–246.

26. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электрической энергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
27. Электромагнитная совместимость потребителей: монография / И. В. Жежеленко [и др.]. М.: Машиностроение, 2012. 351 с.
28. Арриллага Д., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
29. Ершов А. М. Системы электроснабжения: курс лекций: в 4 ч. Ч. 2: Электрические нагрузки. Компенсация реактивной мощности. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2018. 230 с.
30. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М. Справочник по проектированию электрических сетей. 4-е изд. М.: ЭНАС, 2012. 376 с.

References

1. Stroganov A. I., Sergeev G. N., Labunovich A. I. *Dugovye jelectropechi* [Electric arc furnaces]. Moscow, Metallurgija, 1972, 288 p.
2. *Dugovaja staleplavil'naja pech'* [Electric arc furnace]. *Nauchno-tehnicheskij portal o metallurgii, gornoj promyshlennosti, mashinostroenii, obrabotke metallov, jenergetike* [Scientific and technical portal on metallurgy, mining, mechanical engineering, metal processing, power engineering]. (In Russ.). Available at: <https://metallolome.ru/dugovaya-staleplavilnaya-pech/> (accessed 07.04.2023).
3. *Dugovaja staleplavil'naja pech'* [Electric arc furnace]. *Nauchno-tehnicheskij portal o metallurgii, gornoj promyshlennosti, mashinostroenii, obrabotke metallov, jenergetike* [Scientific and technical portal on metallurgy, mining, mechanical engineering, metal processing, power engineering]. (In Russ.). Available at: <https://metallurgist.pro/dugovaya-staleplavilnaya-pech/> (accessed 07.04.2023).
4. *Dugovaja pech'* [Electric arc furnace]. *Gornaja promyshlennost'* [Mining]. (In Russ.). Available at: <http://mining-prom.ru/rud/zhelez/dugovaya-pech/> (accessed 25.04.2023).
5. Afonaskin A. V., Dudorov V. I. Chto takoe jelektrodugovye pechi postojannogo toka [What are DC electric arc furnaces]. *Vestnik KGU* [Bulletin of Kazan State University], 2008, No. 3, pp. 60–66. (In Russ.).
6. Linchevskij B. V., Sobolevskij A. L., Kal'menev A. A. *Metallurgija chernyh metallov* [Metallurgy of ferrous metals]. Moscow, Metallurgija, 1986, 360 p.
7. Opoleva G. N. *Jeletrosnabzhenie promyshlennyh predpriyatij i gorodov* [Electrical power supply of industrial enterprises and cities]. Moscow, Izdatel'skij Dom Forum, 2019, 416 p.
8. Bozzhanova R. N., Zhivaeva O. P. *Obshhepromyshlennye potrebiteli sistem jeletrosnabzhenija* [General industrial consumers of power supply systems]. Almaty, AIJeS, 2008, 49 p.
9. Evtjukova I. P., Kacevich L. S., Nekrasova N. M., Svenchanskij A. D. *Jeletrotehnologicheskie promyshlennye ustanovki* [Electro-technological industrial installations]. Moscow, Jenergoizdat, 1982, 400 p.
10. Jaroshevich V. V., Karpov A. S. Vlijanie nestacionarnyh jelektromagnitnyh vozdeystvij na silovye transformatory [Influence of non-stationary electromagnetic influence on power transformers]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2014, No. 8, pp. 54–62. (In Russ.).
11. Jaroshevich V. V., Nevretdinov Ju. M., Fastij G. P., Karpov A. S. Problemy lokalizacii istochnikov iskazhenij jelektroenergii i opredelenie vklada podkljuchennyh potrebitelej v iskazhenie ili normalizaciju kachestva jelektroenergii [Problems of localization of power distortion sources and determining the contribution of connected consumers to distortion or normalization of power quality]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2010, No. 1, pp. 126–138. (In Russ.).
12. Singh A., Singh R. K., Singh A. K. Power quality issues of electric arc furnace and their mitigations — a review. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 2017, Vol. 4, No. 4, pp. 22–41.

13. Russkih P. O., Jaroshevich V. V., Karpov A. S. Osnovnye prichiny sokrashennogo sroka sluzhby silovykh transformatorov [Main causes of shortened service life of power transformers]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Jenergetika* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2016, No. 13, pp. 72–84. (In Russ.).
14. Lasica V. V. Kolebanija naprijazhenija. Vlijanie dugovykh staleplavil'nyh pechej na kolebanija naprijazhenija [Voltage fluctuations. Influence of electric arc furnaces on voltage fluctuations]. *Aktual'nye problemy jenergetiki* [Topical problems of power engineering], 2022, pp. 58–62. (In Russ.).
15. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. *Energy*, 2016, Vol. 115, pp. 830–839.
16. Andrei H., Cepisca C., Grigorescu S. Power quality and electrical arc furnaces. Rijeka, InTech, 2011, 362 p.
17. Sajeesh D., Seema J. Research on power quality issues in electric arc furnace and its mitigation techniques. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, Vol. 3, No. 1, pp. 1121–1124.
18. Vagin G. Ja., Sevost'janov A. A., Jurtaev S. N. Jelektromagnitnaja sovместimost' dugovykh pechej i sistem jelektrosnabzhenija [Electromagnetic compatibility of electric arc furnaces and power supply systems]. *Trudy Nizhegorodskogo tehničeskogo universiteta im. R. E. Alekseeva* [Transactions of Nizhny Novgorod Technical University named after R.E. Alekseev], 2010, Vol. 81, No. 2, pp. 202–210. (In Russ.).
19. Jebaraj B. S., Bennet J., Kannadasan R., Alsharif M. H., Kim M., Aly A. A., Ahmed M. H. Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and static VAR compensator. *Electronics*, 2021, No. 10, 1125.
20. Cano Plata E. A., Tacca H. E. Arc furnace modeling in ATP-EMTP. *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients*. Montreal, 2005, IPST05-067.
21. GOST 30804.4.7-2013. *Sovместimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Obshhee rukovodstvo po sredstvam izmerenij i izmerenijam garmonik i intergarmonik dlja sistem jelektrosnabzhenija i podključaemykh k nim tehničeskikh sredstv* [Electromagnetic compatibility of technical means. General guidelines for measuring instruments and measurements of harmonics and interharmonics for power supply systems and technical facilities connected to those]. Moscow, Standartinform, 2013, 40 p.
22. GOST 33073-2014. *Jelektricheskaja jenergija. Sovместimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Kontrol' i monitoring kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Control and monitoring of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2015, 46 p.
23. GOST 30804.4.30-2013. *Jelektricheskaja jenergija. Sovместimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Metody izmerenij pokazatelej kachestva jelektricheskoi jenergii* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices]. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p.
24. GOST 32144-2013. *Jelektricheskaja jenergija. Sovместimost' tehničeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p.
25. Gavrilov F. A., Cybulja V. V. Vlijanie dugovykh staleplavil'nyh pechej mal'nykh ob'ёмov na rabotu jelektrooborudovanija [Influence of electric arc furnaces of small volumes on the electrical equipment operation]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Tehničeskije nauki* [Bulletin of Priazov State Technical University. Technical Sciences], 2010, No. 20, pp. 241–246. (In Russ.).
26. Zhezhelenko I. V., Saenko Ju. L. *Pokazатели kachestva jelektricheskoi jenergii i ih kontrol' na promyshlennykh predpriyatijah* [Power quality indices and control of those at industrial enterprises]. Moscow, Jenergoatomizdat, 2000, 252 p.

27. Zhezhelenko I. V., Shidlovskij A. K., Pivnjak G. G., Saenko Ju. L., Nojberger M. A. *Jelektromagnitnaja sovmestimost' potrebitelej* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow, Mechanical engineering, 2012, 351 p.
28. Arrillaga D., Bradley D., Bodger P. *Garmoniki v jelektricheskikh sisitemah* [Harmonics in electrical systems]. Moscow, Jenergoatomizdat, 1990, 320 p.
29. Ershov A. M. *Sistemy jelectrosnabzhenija. Chast' 2: Jelektricheskie nagruzki. Kompensacija reaktivnoj moshhnosti* [Power supply systems. Part 2: Electrical loads. Reactive power compensation]. Chelyabinsk, Publishing Center of South Ural State University, 2018, 230 p.
30. Karapetjan I. G., Fajbisovich D. L., Shapiro I. M. *Spravochnik po proektirovaniju jelektricheskikh setej* [Handbook for designing electrical networks]. Moscow, ENAS, 2012, 376 p.

Информация об авторе

Е. И. Губская — инженер.

Information about the author

E. I. Gubskaya — Engineer.

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.
The article was submitted 11.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.