

# Способы улучшения эффективности работы сверхмощной дуговой печи за счет электрооборудования

Якимов И.А.

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)  
г. Челябинск, Российская Федерация

[yakimov\\_ivan@mail.ru](mailto:yakimov_ivan@mail.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрена специфика работы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей на примере ДСП-180 ПАО “Магнитогорский металлургический комбинат”, приведены основные способы регулирования вторичного напряжения печного трансформатора. На основе проведенного анализа авторами предложена усовершенствованная силовая схема тиристорного бесконтактного регулирования вторичного напряжения печного трансформатора, обеспечивающая повышение стабильности электрического режима печи. Отмечены вопросы выбора мощности элементов статического тиристорного компенсатора.

**Ключевые слова:** печной трансформатор, сверхмощная дуговая печь, система управления, электрический режим, тиристор, регулятор напряжения, вторичное напряжение.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются наиболее мощными, энергоемкими потребителями черной металлургии. ДСП четвертого поколения отличает высокая концентрация электрической мощности (примерно 1 МВт на 1 т жидкой стали), превышение вторичного напряжения граничного значения 1000 В и его регулирование в широких пределах (800-1600 В), наличие водоохлаждаемых панелей и дополнительных газокислородных горелок [1-2].

При эксплуатации столь мощных высокопроизводительных агрегатов наиболее актуальными и значимыми являются две проблемы:

- 1) обеспечение максимальной производительности на различных стадиях плавки при рациональном энергопотреблении;
- 2) ограничение воздействий несимметричной, нелинейной и резко-переменной нагрузки на питающую сеть.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ

В ДСП первого поколения электрическая мощность, вводимая в печь, регулировалась дискретно за счет ступенчатого изменения вторичного напряжения и плавно – за счет изменения силы тока посредством вертикального перемещения электродов. Регулирование напряжения, осуществляемое механическим переключением отпаек первичной обмотки трансформатора, не является достаточно быстродействующим и поэтому в ходе плавки бывает задействовано всего несколько ступеней в соответствии с принципом “трех максимумов” [3-5].

Для уменьшения воздействий на смежные потребители мощные ДСП подключают по схеме глубокого ввода че-

рез дополнительный трансформатор к шинам 110-220 кВ, а для улучшения энергетических показателей самой печи используют статический тиристорный компенсатор реактивной мощности (СТК) с быстродействующей системой управления. СТК состоит из фильтрокомпенсирующей цепи (ФКЦ), настроенной, как правило, на 2, 3, 4 гармоники и тиристорно-реакторной группы (ТРГ) - регулируемой индуктивности (рис. 1).

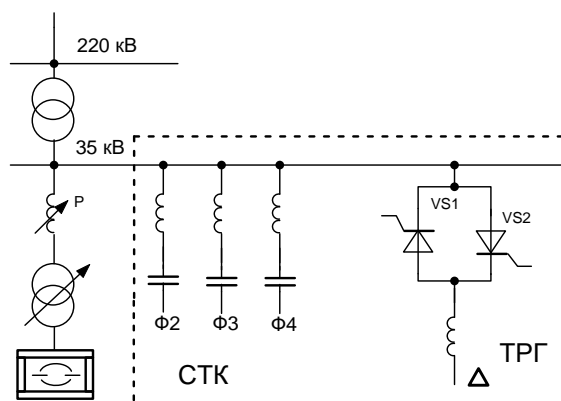


Рис. 1. Электрическая схема подключения СТК

Для того чтобы обеспечить поддержание напряжения на высокой стороне печного трансформатора (ПТ), должно выполняться условие поддержания постоянства реактивной мощности в узле нагрузки:

$$Q_{П} - Q_{\Phi} - Q_{ТРГ} \approx const, \quad (1)$$

где  $Q_{П}$ ,  $Q_{\Phi}$ ,  $Q_{ТРГ}$  – реактивная мощность соответственно печи, фильтров и ТРГ.

На рис. 2 приведены зависимости электрической мощности дуг от тока при отсутствии СТК – кривая 1, и при его наличии – кривая 2. Увеличение вводимой мощности за счет стабилизации напряжения, наблюдаемое из графиков, означает, что количество энергии, необходимое для расплава шихты, может быть передано за меньшее время, что способствует увеличению производительности печи.

В ДСП нового поколения печной трансформатор присоединяется к питающей сети через реактор (Р) (рис. 1) [6-10]. Это обусловлено следующими причинами: стандартные электроды диаметром 610 мм имеют ограничения по максимально допустимой силе тока в пределах от 82 кА (согласно российским ТУ [4]) до 100 кА (для зарубежных аналогов [7-15]).

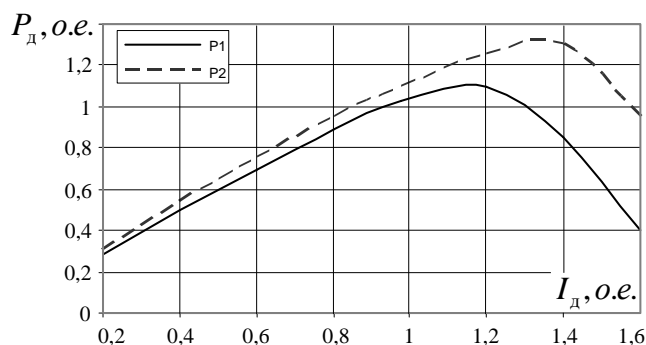


Рис. 2. Зависимость мощности дуги от тока

С учетом этих ограничений, увеличение электрической мощности, вводимой в печь, достигается за счет повышения напряжения на электродах. Повышение вторичного напряжения потребовало дополнительных мер для ограничения бросков тока при технологических коротких замыканиях, особенно в начальный период плавки. Одним из решений является включение реактора на высокой стороне печного трансформатора. Уменьшение колебаний силы тока способствует также снижению фликера, допустимая величина которого наиболее жестко регламентируется в стандартах качества на электроэнергию.

Повышение напряжения повлекло за собой изменение технологии, так как увеличилась длина дуги и для защиты футеровки от мощного светового излучения потребовалось экранирование дуг достаточным слоем вспененного шлака. В результате совокупность всех приведенных мероприятий (повышение вторичного напряжения, включение реактора, погружение дуг в шлак) обеспечила повышение электрического КПД печи за счет сокращения потерь электроэнергии на излучение, более устойчивого горения дуг и уменьшения дисперсии колебаний тока.

Возможности управления электрическим режимом ДСП заметно расширяются в случае применения реактора с регулируемой индуктивностью (индуктивным сопротивлением) и быстродействующей системой управления (СУ). Здесь возможны следующие варианты:

1. Двухмоточный реактор с подмагничиванием на постоянном токе (рис. 3, а) [16]; установлен на 90 т печи Danarc с трансформатором мощностью 55 МВА;
2. Реактор с шунтирующими тиристорами (рис. 3, б) [17]; опробован на печи емкостью 6 т;

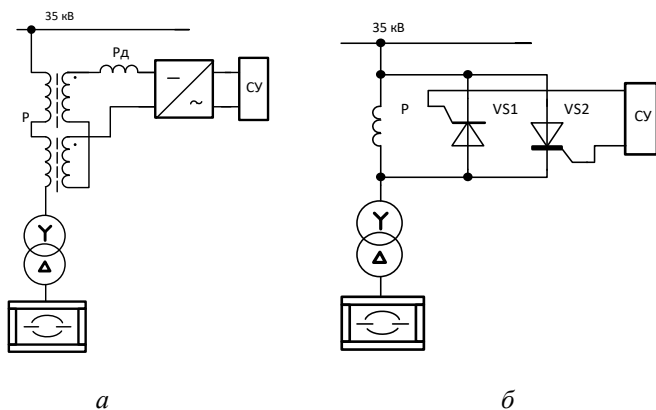


Рис. 3. Схемы подключения реактора с регулируемой индуктивностью

3. Реактор с отпайками; установлен в баке печного трансформатора ДСП-180 ОАО “ММК”, регулирование его индуктивного сопротивления и напряжения на дугах осуществляются одновременно.

Регулируемый реактор позволяет формировать искусственные характеристики печи, управляя током, напряжением и мощностью дуг. На рис. 4 показаны возможные электрические характеристики действующей ДСП-180 при одновременном регулировании вторичного напряжения печного трансформатора и индуктивности встроенного реактора, полученные на модели.

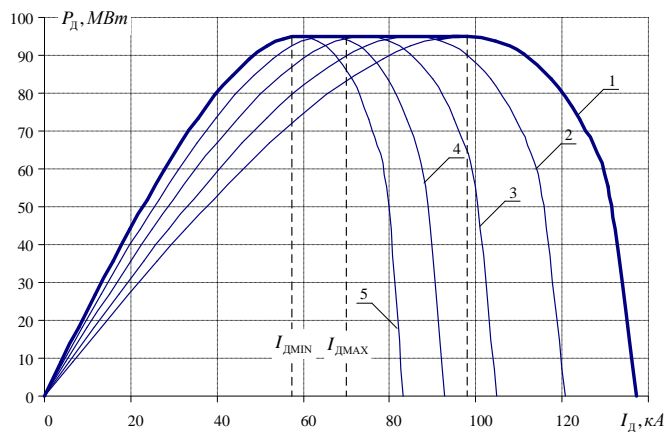


Рис. 4. Электрические характеристики ДСП при одновременном регулировании напряжения ПТ и встроенного реактора

Можно отметить, при реализации такого алгоритма управления значение активной мощности сохраняется на постоянном максимальном значении в широком диапазоне изменения тока дуг. Это создает возможность работы в одном из оптимальных технологических режимов печи – поддержание максимума активной мощности.

Наибольшие возможности в управлении электрическим режимом ДСП обеспечивает схема с дополнительным вольдобавочным трансформатором (ВДТ) [17-21] (рис. 5). В этой схеме напряжение на дуге  $U_2$  складывается из двух составляющих:  $U_{2H}$  – вторичного напряжения основного трансформатора и  $U_{2Z}$  – напряжения дополнительного трансформатора, которое регулируется в каждой фазе с помощью последовательно включенных тиристорных ключей НТ. Благодаря такой схеме, напряжение на дуге изменяется в пределах от  $0,5 \cdot U_{ном}$  до  $U_{ном}$ , а мощность, которая пропорциональна квадрату напряжения, изменяется соответственно, от 25% до 100%.

Здесь наблюдается принцип двойного использования оборудования для реализации: а) основной технологической задачи регулирования напряжения (мощности на дугах) и б) вспомогательной – поддержания постоянства реактивной мощности и уменьшения фликера в питающей сети.

ДСП с использованием ВДТ по своим регулировочным способностям управления электрическим режимом приближается к печам постоянного тока, поскольку в этом случае вторичное напряжение печного трансформатора регулируется в широких пределах и с достаточным быстродействием. Следует отметить, что эта конструкция лишена главного недостатка печей постоянного тока – подового электрода и проблем, связанных с его обслуживанием.

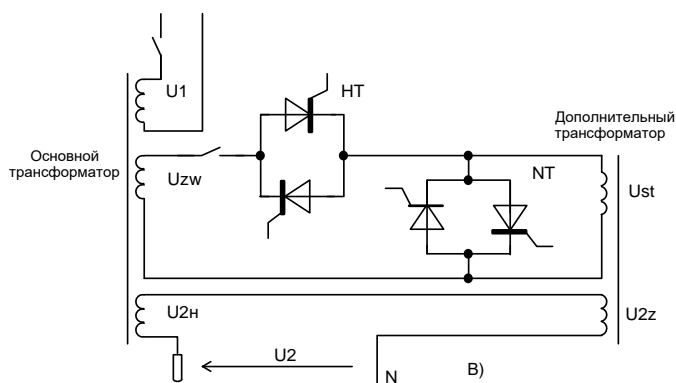


Рис. 5. Схема подключения ВДТ с тиристорными ключами в промежуточном контуре печного трансформатор

Также следует отметить, что в процессе работы ДСП часто ухудшаются показатели качества электроэнергии (ПКЭ) в точке общего подключения к энергосистеме. Для снижения вредного влияния (как выше было отмечено) и улучшения электромагнитной совместимости ДСП с питающей сетью параллельно ДСП в большинстве случаев подключается СТК. При этом возникает сложная задача выбора номинальной мощности элементов СТК. Процесс решения данной задачи можно разделить на следующие основные этапы:

1. Выбор номинальной мощности ТРГ;
2. Выбор номинальной мощности ФКЦ;
3. Выбор числа резонансных фильтров ( $\Phi$ ) и их тип, входящих в состав ФКЦ;
4. Рациональное распределение общей номинальной мощности ФКЦ по отдельным резонансным  $\Phi$ ;
5. Настройка резонансных  $\Phi$ .

Важной составляющей задачи выбора мощности СТК является выбор и распределение суммарной мощности ФКЦ по отдельным  $\Phi$ . Что касается вопросов выбора мощности ТРГ, суммарной мощности ФКЦ, а также выбора количества  $\Phi$  и их настройки, то они представляют собой самостоятельные задачи и заслуживают отдельного рассмотрения.

На рис. 6 показано распределение суммарной мощности ФКЦ по резонансным  $\Phi$ . Номинальная мощность ТРГ и ФКЦ составляет 180 Мвар. Значения мощностей отдельных  $\Phi$  указано в о.е. (за базовую принята величина  $Q_{\text{БАЗ}} = 180$  Мвар).

Введем два основных критерия, по которым будет произведена оценка распределения мощности ФКЦ по

отдельным  $\Phi$ :

- а) активные потери в фильтрах  $P_{\text{ФКЦ}}$ ;
- б) коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (КИН) в точке общего подключения  $K_U$ .

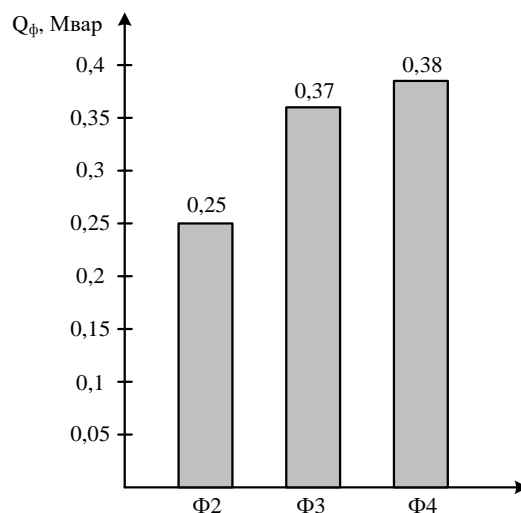


Рис. 6. Распределение мощности ФКЦ между резонансными фильтрами

Исследования зависимости значений вышеприведенных параметров от величины установленной мощности фильтров проведены методом наложения на упрощенной схеме замещения системы “ПИТАЮЩАЯ СЕТЬ-ФКЦ-ТРГ-ДСП” на основной гармонике, а также от высших гармоник (рис. 7).

Представляет интерес оценить существующее распределение мощностей  $\Phi$  (рис. 6) с точки зрения введенных критериев. Для этого мощность фильтра 2-ой гармоники выбрана на уровне  $0,25 \cdot Q_{\text{БАЗ}} = 45$  МВАр, а мощности фильтров 3-ей и 4-ой гармоник варьировались (рис. 8).

Точкой “А” отмечено существующее распределение мощностей по отдельным  $\Phi$  на СТК ДСП-180. Точкой “Б” отмечено распределение мощностей  $\Phi$  соответствующее минимуму активных потерь, и наконец, точкой “В” отмечено распределение мощностей  $\Phi$  соответствующее минимуму КИН. Как видно из рис. 8, б один и тот же показатель КИН можно получить при наибольшем значении активных потерь в фильтрах (точка “А”) и при наименьшем значении активных потерь (точка “В”).

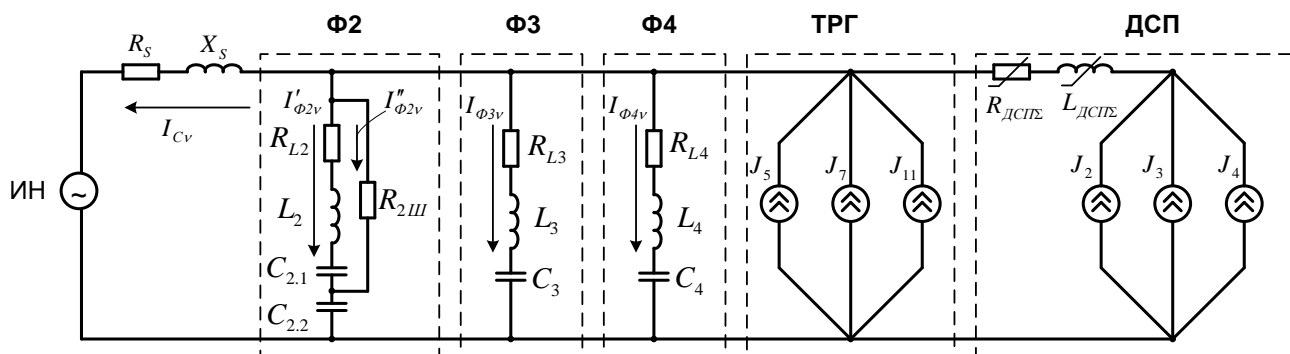


Рис. 7. Распределение мощности ФКЦ между резонансными фильтрами

Существующее распределение мощностей, которое отмечено точкой “А”, не является оптимальным с точки зрения минимума активных потерь и минимума КИН. Последующий анализ проведен с помощью частотных характеристик группы фильтров при существующем варианте распределения мощностей  $\Phi$  и при сочетании мощностей  $\Phi$ , соответствующие точкам “Б” и “В” (рис. 9).

### Выводы

1. Повышение эффективности работы ДСП можно обеспечить за счет быстройдействующего регулирования вторичного напряжения ПТ.

2. За счет одновременного регулирования напряжения ПТ и индуктивности реактора обеспечивается один из оптимальных электрических режимов ДСП – режим поддержания максимальной активной мощности дуг при изменении тока.

3. При решении задачи выбора мощности элементов СТК ввести обобщающий критерий убытков, объединяющий потери в фильтрах и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, а также следует учитывать дополнительный параметр, оценивающий сдвиг резонансного максимума относительно минимума.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А.А. Сравнительный анализ показателей качества электрической энергии в промышленности / А.А. Николаев, Н.Г. Емалеева, И.А. Якимов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2008. – Вып. 15. – С. 252-258.

2. Повышение качества внутривзаводского электропитания на примере ОАО “ММК” / А.Ю. Коваленко, Г.П. Корнилов, А.В. Русанов и др. // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сб. статей II Международной науч.-практ. конф. – Пенза, 2011. – С. 98-100.

3. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов // Электротехнология. – 2013. – №7. – С. 2-10.

4. Проблемы энергосбережения металлургического предприятия // Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – №3-4. – С. 45-52.

5. Пути совершенствования динамических характеристик дуговых сталеплавильных печей / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Д.А. Корнилов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2010. – Вып. 18. – С. 233-240.

6. Основные резервы повышения производительности электродуговой печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2010. – Вып. 18. – С. 233-240.

7. Анализ системы управления дуговой сталеплавильной печи с целью повышения ее эффективности / Г.П. Корнилов, И.А. Якимов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2012. – Вып. 20. – С. 89-95.

8. Корнилов Г.П. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового электрооборудования // Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2009. – №15. – С. 32-38.

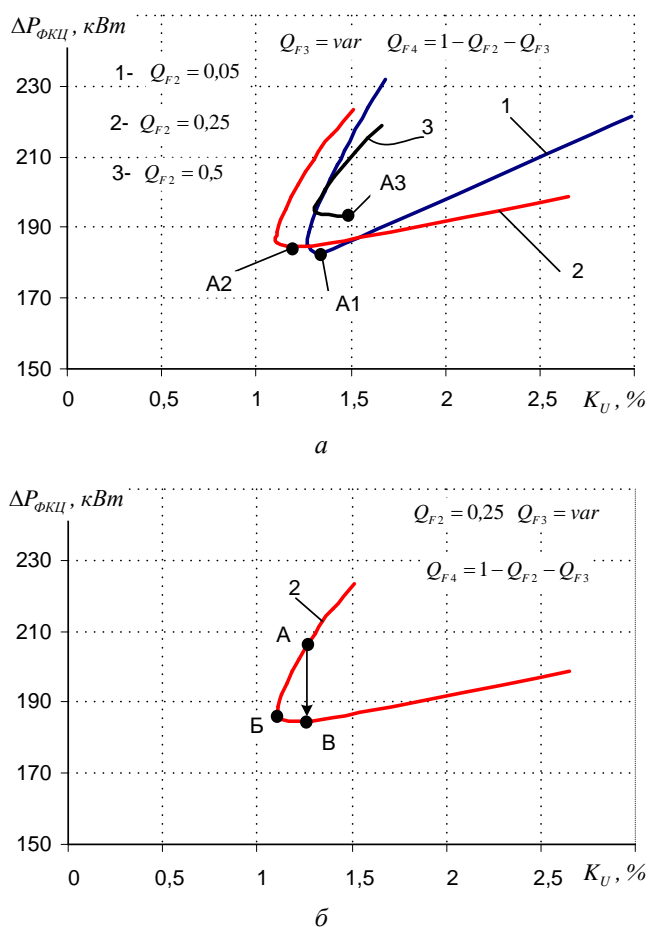


Рис. 8. Зависимость суммарных потерь в фильтрах от КИН

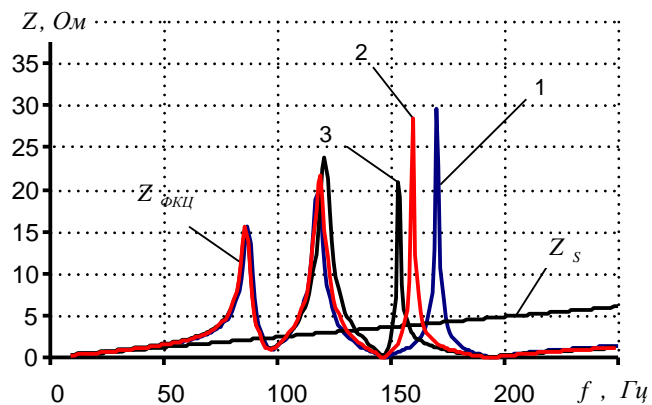


Рис. 9. Частотные характеристики сети и группы фильтров: кривая 1 соответствует точке “А” (рис.8); кривая 2 соответствует точке “Б”; кривая 3 соответствует точке “В”

9. Корнилов Г.П. Способы повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового электрооборудования / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин и др. // Труды X конгресса сталеплавыльщиков (Магнитогорск, 13-17 октября 2009 г.). – Магнитогорск, 2009. – С. 274-279.

10. Еланов А.Ю. Анализ колебаний тока дуговой сталеплавильной печи / А.Ю. Еланов, Ю.В. Путинцев, В.С. Чередниченко // Исследования в области промышленного электронагрева: Труды ВНИИЭТО. – 1974. – вып. 1(139).

11. Макаров А.Н. Анализ энергетических характеристик высокоомощных дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Макаров, Р.А. Макаров, В.В. Воропаев // Электричество. – 2014. – №5. – С. 34-36.

12. Анализ режимов работы статического тиристорного компенсатора реактивной мощности дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.Н. Шеметов и др. // Главный энергетик. – 2011. – №3. – С. 30-34.

13. Николаев А.А. Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 1 / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // Электрометаллургия. – 2014. – №5. – С. 15-22.

14. Выбор мощности статических тиристорных компенсаторов для сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, П.Ю. Полозюк, Т.Е. Пелагеин, Г.П. Корнилов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2011. – Вып. 19. – С. 80-84.

15. Экспериментальное исследование системы управления электрическим режимом сверхмощной ДСП // Д.А. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов, А.В. Ануфриев // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сб. статей II Международной науч.-практ. конф. – Пенза, 2011. – С. 103-107.

16. Корнилов Г.П. Основные способы регулирования напряжения печного трансформатора / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2008. – Вып. 15. – С. 247-252.

17. Якимов И.А. Повышение эффективности дуговой сталеплавильной печи за счет бесступенчатого регулирования напряжения печного трансформатора / И.А. Якимов, А.А. Николаев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Пятнадцатая международная науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: тез. докл. в 3-х т. Т.2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 177-178.

18. Мещеряков А.Ю. Задачи управления электрическим режимом дуговых печей / А.Ю. Мещеряков, И.А. Якимов // Современные методы конструирования и технологии металлургического машиностроения: Международный сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2006. – С. 137-141.

19. Vek G.P., Volf A. Новая концепция питаемой от выпрямителя трехфазной дуговой электропечи с высокой динамикой регулирования // Черные металлы. – 1998. – №2. – С. 16-24.

20. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – №1. – С. 76-82.

21. Моделирование электрического контура дуговой печи / Г.П. Корнилов, А.Ю. Мещеряков, А.А. Николаев и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2006. – Вып. 12. – С. 210-217.

DOI: 10.24892/RIJEE/20170203

## Methods for Improving the Efficiency of a Ultra-High Arc Furnace Due to Electrical Equipment

Yakimov I.A.

South Ural State University (National Research University)  
Chelyabinsk, Russian Federation  
[yakimov\\_ivan@mail.ru](mailto:yakimov_ivan@mail.ru)

**Abstract.** In this article, the specifics of the operation of ultra-high electric arc furnaces on the example of EAF-180 PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" are considered, the main methods for regulating the secondary voltage of the furnace transformer are given. Based on the analysis carried out by the authors, an improved power scheme for the thyristor contactless control of the secondary voltage of the furnace transformer is proposed, which ensures an increase in the stability of the electric regime of the furnace. The questions of the choice of the power of the elements of a static var compensator are noted.

**Keywords:** furnace transformer, ultra-high electric arc furnace, control system, electric mode, thyristor, voltage regulator, secondary voltage.

### REFERENCES

1. Nikolayev A.A., Yemaleyeva N.G., Yakimov I.A. Comparative Analysis of the Quality Metrics of Electric Power in Industry [Svravnitelnyy analiz pokazateley kachestva elektricheskoy energii v promyshlennosti], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniver-

sity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]. Magnitogorsk, MGTU, 2008, vol. 15, pp. 252-258.

2. Kovalenko A.Yu., Kornilov G.P., Rusanov A.V. et al. Improving the quality of in-plant power supply as an example of "MMK" [Povysheniye kachestva vnutrizavodskogo elektrooborudovaniya na primere OAO "MMK"], *Sbornik statey II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Energoberezeniye, elektromagnitnaya sovmestimost i kachestvo v elektricheskikh sistemakh"* [Collection of articles and the international scientific-practical conference "Energy saving, electromagnetic compatibility and quality in electrical systems"], Penza, 2011, pp. 98-100.

3. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu. Analysis and optimization of electric modes of ultra-high power electrical arc furnaces [Analiz i optimizatsiya elektricheskikh rezhimov sverkhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh pechey], *Elektrometallurgiya. [Electrometallurgy]*, 2013, no.7, pp. 2-10.

4. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A., Zhuravlev Yu.P., Kuznetsov Ye.A. Problems of energy saving steel plant [Problemy energoberezeniya metallurgicheskogo predpriyatiya], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki [Proceedings of the Tula State University. Engineering science]*, Tula, TulGU, 2010, no.3 (4), pp. 45-52.

5. Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Kornilov D.A. et al. Ways of improving the dynamic characteristics of the EAF [Puti sovershenstvovaniya dinamicheskikh kharakteristik dugovykh staleplavilnykh pechey], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MGTU, 2010, vol. 18, pp. 233-240.

6. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. et al. The main reserves increased productivity of the electric arc furnace as of the electrical complex [Osnovnyye rezervy povysheniya proizvoditelnosti elektrodugovoy pechi kak elektrotekhnicheskogo kompleksa], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MGTU, 2011, vol. 1, pp. 89-95.

7. Kornilov G.P., Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Anufriyev A.V. Analysis of the control system of the electric arc furnace in order to increase its effectiveness [Analiz sistemy upravleniya dugovoy staleplavilnoy pechi s tselyu povysheniya yeye effektivnosti], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MGTU, 2012, vol. 20, pp. 309-315.

8. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. Methods to increase the effectiveness of the electric arc furnaces by means of power electrical equipments, *Bulletin of South Ural State University*, 2009, no.15, pp. 32-38.

9. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khramshin T.R. et al. Ways to improve the efficiency of electric arc furnaces by a power electric equipment [Sposoby povysheniya effektivnosti dugovykh staleplavilnykh pechey za schet silovogo elektrooborudovaniya], *Proceedings of X Congress of Steelmakers [Trudy X kongressa staleplavilshchikov]*, Magnitogorsk, 13-17 oct., 2009, pp. 274-279.

10. Yelanov A.Yu., Putintsev Yu.V., Cherednichenko V.S. Analysis of the current oscillations of the electric arc furnace [Analiz kolebaniy toka dugovoy staleplavilnoy pechi], *Issledo-*

*vaniya v oblasti promyshlennogo elektronagreva. Trudy VNIIEТО [Research in the field of industrial electric heating. Proceedings VNIIEТО]*, 1974, vol. 1 (139).

11. Makarov A.N., Makarov R.A., Voropayev V.V. The analysis of the energy characteristics of ultra-high power electric arc furnaces [Analiz energeticheskikh kharakteristik vysokomoshchnykh dugovykh staleplavilnykh pechey], *Elektrichestvo [Electricity]*, 2014, no.5, pp. 34-36.

12. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Shemetov A.N. et al. Analysis of modes of static VAR compensator electric arc furnace [Analiz rezhimov raboty staticheskogo tiristorного kompensatora reaktivnoy moshchnosti dugovoy staleplavilnoy pechi], *Glavnyy energetik [Main power engineering]*, 2011, no.3, pp. 30-34.

13. Nikolayev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. Investigation of modes arc furnaces in the complex with static thyristor compensators of reactive power [Issledovaniye rezhimov raboty dugovykh staleplavilnykh pechey v komplekse so staticheskimi tiristornymi kompensatorami reaktivnoy moshchnosti], *Elektrometallurgiya [Electrometallurgy]*, 2014, no.5, pp. 15-22.

14. Nikolayev A.A., Polozhuk P.Yu., Pelagein T.E., Kornilov G.P. Selecting power static thyristor compensators for ultra-high power arc furnaces [Vybor moshchnosti staticheskikh tiristornykh kompensatorov dlya sverkhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh pechey], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MGTU, 2011, vol. 19, pp. 80-84.

15. Kornilov D.A., Nikolayev A.A., Yakimov I.A., Anufriyev A.V. Experimental research the control system of electric mode ultra-high power EAF [Eksperimentalnoye issledovaniye sistemy upravleniya elektricheskim rezhimom sverkhmoshchnoy DSP], *Energoberezeniye, elektromagnitnaya sovmestimost i kachestvo v elektricheskikh sistemakh: sb. statey II Mezhdunarodnoy nauchn.-prakt. konf. [Energy saving, electromagnetic compatibility and quality in electrical systems: a collection of articles II International Scientific and Practical Conference]*, Penza, 2011, pp. 103-107.

16. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. The main methods of regulating the voltage of the furnace transformer [Osnovnyye sposoby regulirovaniya napryazheniya pechnogo transformatora], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"], Magnitogorsk, MGTU, 2008, vol. 15, pp. 247-252.

17. Yakimov I.A., Nikolayev A.A. Improving the efficiency of the electric arc furnace by the stepless voltage furnace transformer [Povysheniye effektivnosti dugovoy staleplavilnoy pechi za schet besstupenchatogo regulirovaniya napryazheniya pechnogo transformatora], *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: Pyatnadsataya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov i aspirantov: tezisy dokladov v 3-kh tomakh [Radio electronics, electrical engineering and energy: Fifteenth International Scientific and Technical Conference of undergraduate and graduate students: abstracts in 3 volumes]*, Moscow (MEI), 2009, vol. 3, pp. 177-178.

18. Meshcheryakov A.Yu., Yakimov I.A. Control problems of electric arc furnaces regime [Zadachi upravleniya elektricheskim rezhimom dugovykh pechey], *Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov "Sovremennyye metody konstruirovaniya i tekhnologii metallurgicheskogo mashinostroyeniya"* [Intern-

*tional Collection of Scientific Papers "Modern construction methods and technologies of metallurgical machinery"*], Magnitogorsk, MGTU, 2006, pp. 137-141.

19. Bek G. –P., Volf A. A new concept of a three-phase rectifier supplied from an electric arc furnace with high dynamics control [Novaya kontsepsiya pitayemoy ot vupryamitelya trekhfaznoy dugovoy elektropechi s vysokoy dinamikoy regulirovaniya], *Chernyye metally [Ferrous materials]*, 1998, no.2, pp. 16-24.

20. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khramshin T.R. et al. Details of modeling the electric arc furnace as a complex electrical

[Osobennosti modelirovaniya dugovoy staleplavilnoy pechi kak elektrotekhnicheskogo kompleksa], *Vestnik MGTU [Bulletin of Nosov MSTU]*, 2013, no.1, pp. 76-82.

21. Kornilov G.P., Meshcheryakov A.Yu., Nikolayev A.A et al. Modeling of the electric arc furnace circuit [Modelirovaniye elektricheskogo kontura dugovoy pechi], *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskkiye sistemy i komplekсы" [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]*, Magnitogorsk, MGTU, 2006, vol. 12, pp. 210-217.

---

**Библиографическое описание статьи**

Якимов И.А. Способы улучшения эффективности работы сверхмощной дуговой печи за счет электрооборудования // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2017. – Т.4, №2. – С. 23-29. DOI: 10.24892/RIJEE/20170203

---

**Reference to article**

Yakimov I.A. Methods for improving the efficiency of a ultra-high arc furnace due to electrical equipment, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2017, vol.4, no.2, pp. 23-29. DOI: 10.24892/RIJEE/20170203

---