

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Тулупова Платона Гарриевича «Улучшение энергетических показателей электродуговой печи за счет системы управления с анализом гармоник напряжений дуг», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

### 1. Актуальность темы

Актуальность избранной соискателем темы не вызывает сомнений. Автор в своей трактовке обоснования актуальности базируется на необходимости развития дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и решает задачу улучшения их энергетических показателей за счет применения новой системы управления с анализом гармоник напряжений дуг. Это в полной мере соответствует сформулированной цели работы, поставленным исследовательским задачам с последующей разработкой инженерных предложений по совершенствованию систем управления электрическим режимом ДСП, функционирующим на действующих металлургических предприятиях.

### 2. Общая характеристика диссертации

В настоящее время электрометаллургия является быстроразвивающейся отраслью современной промышленности. Значительная доля от общемирового объема производства жидкой стали приходится на выплавку в ДСП. При этом последние 10-15 лет на отечественных предприятиях наблюдается тенденция активного внедрения ДСП при освоении новых производственных мощностей, а также при реконструкции мартеновских и кислородно-конвертерных цехов. При этом важно отметить, что характерными особенностями ДСП как сталеплавильного агрегата является высокое потребление электрической энергии. В этих условиях особую актуальность приобретает задача поиска энергетических резервов для повышения эффективности работы печи.

Автор в своей диссертационной работе описывает способ повышения энергетической эффективности работы дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 (ЧерМК, ПАО «Северсталь», г. Череповец) за счет применения системы управления электрическим режимом с анализом гармонического состава напряжений электрических дуг.

В первой главе исходя из анализа опыта эксплуатации ДСП на различных металлургических предприятиях, а также исходя из требований, предъявляемых к архитектуре энергоэффективной системы управления электрическим режимом, был сформирован перечень критериев, соответствие которым позволяет судить о преимуществах и недостатках той или иной системы.



Проведён подробный анализ наиболее распространённых систем управления электрическим режимом. Для каждой из систем проведена оценка на предмет соответствия сформированному перечню критериев. Результаты оценки показали, что все системы управления имеют свои сильные и слабые стороны, но при этом для всех обозначенных систем характерен общий недостаток, связанный с отсутствием возможности диагностики стадий плавки в ДСП с целью энергоэффективного управления электрическим режимом в соответствии с критерием, позволяющим судить о реальных технологических процессах, протекающих в ванне печи.

Во второй главе рассмотрены основные конструктивные особенности дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 как объекта исследования в составе внутрицеховой системы электроснабжения. На основе исходных данных, собранных при анализе технической документации, а также с использованием результатов проведённых экспериментов, определены параметры схемы замещения электрического контура печи. С учётом данных параметров, разработана математическая модель электрического контура ШП-125. Отличительной особенностью данной математической модели является учёт эффекта переноса мощности и взаимной индуктивности между фазами. Адекватность разработанной модели подтверждается результатами проверок, выполненных с использованием средств математической статистики.

В третьей главе кратко рассмотрена существующая система управления электрическим режимом ДСП, в основе которой лежит анализ гармонического состава токов дуг. Обозначены основные преимущества и недостатки данной системы. Отмечено, что недостатки существующей системы могут быть скомпенсированы путём применения альтернативного подхода к управлению электрическим режимом, в основе которого лежит анализ гармонического состава напряжений дуг. С использованием математической модели, позволяющей рассчитывать мгновенные значения напряжений дуг на основе осциллограмм мгновенных значений токов дуг и фазных напряжений, научно обоснована эффективность предлагаемого подхода.

В четвёртой главе предложена новая система управления электрическим режимом, в основе которой лежит анализ гармонического состава напряжений дуг. Для данной системы разработан алгоритм функционирования, который позволяет осуществлять управление процессом переключения сочетаний ступени печного трансформатора и номера рабочей кривой в соответствии с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи.

В пятой главе представлены результаты работы новой системы на действующем технологическом оборудовании. С учётом подтверждённого актом

внедрения технического эффекта, выраженного в снижении величины удельного расхода электроэнергии на 1,75%, выполнен расчёт экономического эффекта. Сформированы рекомендации по внедрению новой системы на ДСП различной мощности и класса.

### **3. Наиболее существенные научные результаты**

К наиболее существенным научным результатам можно отнести:

1. Математическое описание электрического контура ДСП, обеспечивающее возможность расчёта мгновенных значений и гармонического состава напряжений дуг на основе осциллограмм мгновенных значений токов дуг и фазных напряжений на вторичной стороне печного трансформатора с учетом эффекта переноса мощности и взаимного влияния между фазами;

2. Научное обоснование эффективности применения информации о гармоническом составе напряжений дуг для энергоэффективного управления ДСП, выполненное с использованием математического моделирования и анализа реальных экспериментальных данных.

3. Разработка новой системы управления электрическим режимом ДСП в которой применяется новый алгоритм переключения ступени печного трансформатора и выбора номера рабочей кривой с использованием информации о гармоническом составе напряжения дуги.

### **4. Степень обоснованности и достоверности результатов, выводов и рекомендаций**

Достоверность теоретических положений, результатов исследований, разработанных рекомендаций и выводов, изложенных в диссертации, сомнений не вызывает, так как они получены в результате использования корректного математического описания и методов математического моделирования анализируемых процессов, подтверждаются аргументированным выбором исходных данных. В работе автором применены общепринятые допущения, а также произведён сопоставительный анализ теоретических и экспериментальных данных с хорошей сходимостью результатов.

### **5. Оценка внутреннего единства полученных результатов и направленность полученных результатов на решение актуальной проблемы, теоретической и прикладной задач**

Диссертация является законченной научной работой. Все задачи, определённые целью исследования, объединены общей идеей создания энергоэффективной системы управления электрическим режимом ДСП. Последовательность изложения результатов исследований логически обоснована, взаимосвязана и направлена на решение поставленной прикладной научной проблемы, которая является актуальной.

Значимость для науки результатов исследования заключается в том, что теоретические выводы соискателя развивают общую теорию электродуговых

сталеплавильных печей и позволяют практически реализовать создание промышленных электротехнологических комплексов высокого технического уровня.

Научные и практические результаты диссертации следует рекомендовать к применению на предприятиях, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией ДСП. Кроме того, представляется возможным и необходимым их использование при чтении ряда учебных курсов соответствующего профиля в высших учебных заведениях.

**6. Подтверждение достаточной полноты публикаций основных положений, результатов, выводов и заключение. Соответствие автореферата содержанию диссертации.**

Основные результаты исследований достаточно полно опубликованы в 12 научных трудах, неоднократно докладывались на научных конференциях различного уровня и в достаточной степени известны специалистам. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и в полной мере отражает ее основные положения.

#### **7. Замечания по диссертационной работе**

1. Определение величины взаимной индуктивности фаз электропечного контура осуществляется на основе данных полученных в результате опытов двухфазных и трехфазного коротких замыканий при строго выверенных положениях электрододержателей, однако в процессе работы электропечи такое положение электрододержателей в течение продолжительного времени является редким. Дифферент электрододержателей по высоте может составлять 200-300 мм в лучшем случае и достигать до 1000-1500 мм при низкой культуре производства (например, работа на поломанных и не перепущенных электродах). Кроме этого, в процессе работы электропечи, положение гибких кабелей не является вертикальным и зависит от величины протекающих в фазах токов (гибкие кабели крайних фаз могут отклоняться от вертикальной плоскости на углы вплоть до 10 градусов). На сколько, по Вашему мнению, пренебрежение этими факторами повлияло на точность вычисления мгновенного напряжения на дугах различных фаз?

2. Объясните правомерность ограничения десятью гармониками (см. рисунок 3.4 диссертации) при определении относительных действующих значений четных и нечетных гармоник токов и напряжений дуг. Современные системы позволяют контролировать гармонический состав сигналов тока и напряжения до 128 гармоники, кроме этого существуют субгармонические составляющие.

3. На странице 77 диссертации, в абзаце «Статистический анализ, результат которого сведён в таблице 3.3 диссертации, показал, что сигналы относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник напряжения дуги [52-58] более стабильны и в меньшей мере подвержены влия-

нию возмущающих воздействий по сравнению с аналогичными сигналами для напряжения дуги при общности тренда.», скорее всего, имеется случайная неточность и его следует читать следующим образом – «Статистический анализ, результат которого сведён в таблице 3.3 диссертации, показал, что сигналы относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник напряжения дуги [52-58] более стабильны и в меньшей мере подвержены влиянию возмущающих воздействий по сравнению с аналогичными сигналами для тока дуги при общности тренда.».

4. Не совсем понятно каким образом осуществлено подтверждение результатов, полученных на разработанной модели – вывод 3 по главе 3 диссертации. Дело в том, что на базе созданной модели проведено мощное исследование по выявлению воздействия тепловой постоянной времени дуги  $\Theta_d$ , коэффициента вентильного эффекта  $K_{вэ}$ , а также несимметричных режимов работы на четные и нечетные гармоники тока и напряжения дуги для моделируемых симметричного режима работы (воздействие  $\Theta_d$  и  $K_{вэ}$ ) и режима, в котором длина дуги в фазах 1 и 2 остается неизменной при варьировании длины дуги в фазе 3 (воздействие несимметричного режима). В это же время обрабатывались экспериментальные данные, полученные на интервале 12 минут после начала плавки в реальной электропечи – когда режим был явно несимметричным и длина дуг не соответствовала исходно принимаемым в модели.

5. На странице 94 диссертации при перечислении недостатков существующей системы управления электрическим режимом делается ссылка на рисунок 3.8 диссертации, на котором, по всей видимости, должен быть изображен профиль плавки, и которого реально нет. На рисунке 3.8 диссертации приведены осциллограммы относительных действующих значений суммарных четных и нечетных гармоник напряжения дуги для каждой из трех фаз полученные на модели в численном эксперименте – при ступенчатом изменении величины длины дуги в фазе 3.

6. Каким образом, по мнению автора, может измениться рекомендуемый алгоритм управления в электропечах, в которых установлены дополнительные реакторы, включенные последовательно с печным трансформатором, и кроме определения требуемой ступени напряжения трансформатора и требуемой рабочей кривой будет необходимо задавать ступень реактора? Введение дополнительной индуктивности минимизирует возможные паузы тока и влияет на гармонический состав напряжения на дуге.

7. Каким образом, по мнению автора, будут изменяться граничные значения относительных действующих значений суммарных четных и нечетных гармоник напряжения дуги, используемых в предлагаемом алгоритме для управления режимом работы печи, при распространении этого алгоритма для управления другими дуговыми электропечами, отличными от рассматриваемой

ШП-125 по конструктивному исполнению вторичного токоподвода и, как следствие, отличным по величине индуктивного сопротивления токоподвода, оказывающего влияние на гармонический состав напряжения на дуге? Не потребуется ли для корректной настройки предлагаемой системы регулирования проведения большого числа предварительных плавок на базе старой системы управления?

#### 8. Заключение и выводы

Изложенные замечания не снижают высокий научный и практический уровень представленной диссертации. В целом работа «Улучшение энергетических показателей электродуговой печи за счет системы управления с анализом гармоник напряжений дуг» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, обеспечивающую решение актуальной научно-технической проблемы, отвечает всем требованиям ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы, а её автор Тулупов Платон Гарриевич достоин присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по данной научной специальности.

Официальный оппонент  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры автоматизированных  
электротехнологических установок  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Новосибирский государственный технический университет»,  
научная специальность 05.09.10 - Электротехнология

Бикеев Роман Александрович

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20  
ФГБОУ ВО «НГТУ»  
Тел. +7 (383) 346-30-33, факс +7 (383) 346-30-33  
E-mail: bikeev@ngs.ru



О. К. Пустовалова