

**АННОТАЦИЯ РАБОТ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ НА ПРОМЕЖУТОЧНОМ ЭТАПЕ № 4**  
«Разработка комплекса технических мероприятий, обеспечивающих  
снижение потерь электрической энергии за счет применения регулируемых  
устройств компенсации реактивной мощности»  
государственного контракта с Министерством образования и науки  
Российской Федерации от 12 апреля 2010 г. № 02.740.11.0755

Шифр заявки: «2010-1.1-230-056-007»  
Период выполнения этапа: 01 июня 2011 г. - 01 ноября 2011 г.  
Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
Цель работы: Разработка и промышленное внедрение комплекса научно обоснованных, концептуально связанных технических решений, обеспечивающих энергосбережение при производстве, распределении и потреблении электрической энергии на металлургическом предприятии с полным технологическим циклом

### **1. Наименование разрабатываемой продукции**

– математическая модель регулируемых компенсирующих устройств (на базе батарей статических конденсаторов и синхронного двигателя); результаты исследования показателей качества напряжения на шинах 10 кВ, а также устойчивости синхронного двигателя в динамических режимах;

– результаты исследования режимов работы комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статическое компенсирующее устройство» («ДСП-СТК»), обеспечивающие разработку способов повышения энергетической эффективности;

– математическая модель комплекса ДСП-СТК, результаты исследования установившихся и динамических режимов, а также энергетических характеристик комплекса методами математического моделирования;

– отчет о НИР, содержащий обоснование развиваемого направления исследований, изложение методик проведения исследований, а также описание полученных результатов.

### **2. Характеристика выполненных на этапе работ по созданию продукции**

#### **2.1. Результаты работы на 4 этапе:**

– разработана математическая модель регулируемого компенсирующего устройства на базе синхронного двигателя;

– проведено исследование устойчивости синхронного двигателя в дина-

мических режимах;

– разработана математической модели комплекса ДСП-СТК, проверка адекватности. Исследование установившихся и динамических режимов комплекса методами математического моделирования;

– проведено исследование энергетических характеристик комплекса «ДСП-СТК» при генерации реактивной мощности в питающую сеть;

– выполнено математическое моделирование электрических нагрузок на шинах 10 кВ широкополосного стана;

– выполнено моделирование режимов компенсации реактивной мощности ДСП с учетом несимметричной нагрузки.

Данные разработки полностью соответствуют требованиям задания.

**2.2. Научная новизна работ**, выполненных по текущему этапу, заключается в следующем:

1. Разработана новая динамическая модель комплекса «ДСП – статический тиристорный компенсатор», адекватно отражающая реальные физические процессы. Её особенность состоит в том, что учитывается постоянная времени дуги, кривая намагничивания трансформатора, гидравлическая система перемещения электродов, а также тиристорно – реакторная группа с цифровой системой управления тиристоров. Случайные возмущения задают формирующие фильтры, передаточные функции которых синтезированы на основе статистической обработки экспериментальных данных действующей ДСП.

2. Теоретически обоснован способ регулирования реактивной мощности статического компенсатора дуговой печи, как в режиме генерирования, так и её потребления. В первом случае достигается повышение производительности за счёт увеличения мощности, вводимой в печь, во втором случае создаются условия для снижения бросков тока при включении печного трансформатора.

3. Разработана методика расчёта генерирующей способности статического компенсатора при несимметричных режимах работы ДСП, включая и аварийные. Она основана на построении фактической области распределения токов прямой и обратной последовательностей работающей печи во всех технологических режимах и наложении на неё расчётной области ограничений при различных уровнях генерирования реактивной мощности.

4. Определены уровни располагаемой реактивной мощности синхронных двигателей черновой группы при различных программах прокатки при условии, что среднеквадратичный ток возбуждения за рабочий цикл не превысит номинального значения.

5. В результате теоретических исследований доказано, что разработанная система автоматического управления реактивной мощностью обеспечивает снижение потребления реактивной мощности, улучшение гармонического состава тока и стабилизацию напряжения в узле нагрузки. Разработанная система автоматического регулирования возбуждения СД обеспечивает повышение динамической устойчивости при одновременном использовании его компенсирующей способности.

**2.3. Особенности проведенных исследований** заключаются в использовании современных методов математического моделирования сложных электротехнических комплексов. В работе использованы базовые положения теории автоматического управления, автоматизированного электропривода и силовой электроники, методы математической статистики и операционного исчисления. Решения отдельных задач получены с применением аппарата передаточных функций и математического моделирования в среде Matlab-Simulink. Моделирование выполнялось на основе прямого решения системы интегро-дифференциальных уравнений, в том числе нелинейного уравнения Касси для проводимости дуги. Полученные результаты базируются на достаточно большом объеме экспериментальных данных, обработанных при различных условиях работы исследуемых комплексов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена достаточно малым расхождением между результатами теоретических и экспериментальных исследований, полученных на действующем оборудовании.

В рамках решения поставленных задач с помощью математического моделирования выполнены следующие исследования: 1) проанализированы переходные процессы синхронного двигателя, возникающие при набросе нагрузки и изменениях напряжения сети и тока возбуждения; 2) проведены исследования статических и динамических режимов электротехнического комплекса «ДСП-СТК»; 3) исследованы основные энергетические показатели комплекса «ДСП-СТК» при использовании нового способа регулирования реактивной мощности; 4) на основе разработанной методики оценки генерирующей способности СТК выполнен анализ оптимального диапазона генерирования реакторной мощности статического компенсатора с учетом несимметричных режимов дуговой печи.

**2.4. В ходе выполнения работ** в период с 01 июня по 01 ноября 2011 г. объекты интеллектуальной собственности созданы не были.

### **3. Области и масштабы использования полученных результатов**

**3.1. Разработанные мероприятия внедряются** в электросталеплавильном цехе ОАО «ММК» и в образовательный процесс ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», в частности:

– разработанный способ управления реактивной мощностью статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи, позволяющий более эффективно использовать установленную мощность элементов компенсатора за счет генерирования избыточной реактивной мощности в энергоузел промышленного предприятия, находится на стадии внедрения на двух ДСП-180 электросталеплавильного цеха ОАО «ММК»; ожидаемый технико-экономический эффект от внедрения результатов работы на составляет более 1,4 млн. руб. в год.

– разработанные математические модели синхронного двигателя, тиристорного преобразователя, комплекса «ДСП-СТК», а разработанные способы и методики управления реактивной мощностью и оценки генерирующей спо-

способности СТК, внедрены в образовательный процесс и используются при подготовке бакалавров, инженеров и магистров по направлению 140400 «Энергетика и электротехника».

Результаты рекомендуются для практического внедрения на аналогичных металлургических предприятиях с полным технологическим циклом, имеющих в своем составе сверхмощные ДСП, прокатные станы и сетевые синхронные двигатели, а также рекомендуются для использования в учебном процессе других высших учебных заведений при подготовке специалистов энергетических и электротехнических направлений.

**3.2. Разработанные мероприятия используются** электротехническим персоналом различных цехов ОАО «ММК» (ЛПЦ-10, ЭСПЦ, ЦЭСиП), а также специалистами центральной электротехнической лаборатории. Изучение мероприятий, обеспечивающих снижение потерь электрической энергии за счет применения регулируемых устройств компенсации реактивной мощности включено в рабочие программы дисциплин «Электромагнитная совместимость», «Оптимальные режимы систем электроснабжения» при подготовке инженеров по специальности 140211 – «Электроснабжение», бакалавров и магистров направления 140200 – «Электроэнергетика» в ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**3.3. При выполнении четвертого этапа НИР достигнуты следующие индикаторы и показатели:** 6 молодых кандидатов наук, 5 аспирантов и 4 студента приняли участие в выполнении этапа НИР; один соискатель защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук, один соискатель – кандидата наук; по результатам НИР опубликованы 3 научные статьи; доля привлеченных на реализацию 4 этапа НИР внебюджетных средств от объема средств федерального бюджета составила 44,4 %.

Достигнутые результаты полностью соответствуют запланированным программным индикаторам на 2011 год.

#### **4. Выводы**

В ходе выполнения работы была разработана математическая модель синхронного двигателя, в основу которой положены уравнения Парка-Горева, представленные в матричной форме. Получены передаточные функции контуров и регуляторов разработанной системы автоматического регулирования возбуждения СД, содержащей внутренний контур регулирования тока возбуждения, контур регулирования реактивного тока СД и внешний контур регулирования напряжения узла нагрузки. Также разработана математическая модель электропривода постоянного тока чистовой клетки стана 2000 с двухконтурной системой подчиненного регулирования параметров и двухзонным зависимым регулированием скорости. С помощью разработанных моделей были проведены исследования переходных процессов синхронного двигателя, возникающих при набросе нагрузки, изменениях питающего напряжения и тока возбуждения. В результате моделирования показано, что при применении

усовершенствованной системы АРВ с переключающейся структурой динамическая устойчивость СД значительно повышается. Также выполнена оценка колебаний и отклонений напряжения на шинах 10 кВ при ударном приложении нагрузки к ТП в замкнутой системе управления реактивной мощностью. Отмечено снижение отклонений напряжения с 7,2 % до 0,4 % и колебаний напряжения – с 8 % до 2 %.

Разработана математическая модель комплекса «ДСП-СТК», включающая в себя следующие подсистемы: печной трансформатор со встроенным реактором, электрический контур ДСП, статический тиристорный компенсатор в составе фильтрокомпенсирующих цепей и тиристорно-реакторной группы, система управления электрическим режимом ДСП и САР СТК. Разработанная модель позволяет в полном объеме проводить исследования динамических и статических режимов СТК при аварийных и несимметричных режимах работы дуговой печи, исследовать основные энергетические параметры комплекса, оценивать показатели качества напряжения на шинах 35 и 220 кВ, а также исследовать переходные процессы при включении печного трансформатора на холостом ходу. На разработанной математической модели проведены исследования статических и динамических режимов комплекса «ДСП-СТК». Для статических режимов исследовались электрические характеристики дуговой печи на основных стадиях плавки, а также изменение основных энергетических показателей комплекса: мощностей дуг, действующих значений токов, уровней напряжения в электрическом контуре, коэффициентов искажения синусоидальности кривой тока и т.д. При изучении динамических режимов комплекса анализировался характер изменения основных динамических параметров системы управления перемещением электродов ArCOS NT.

Проведено исследование основных энергетических показателей комплекса «ДСП-СТК» для новых режимов работы СТК. Установлено, что диапазон изменения напряжения на шинах 35 и 220 кВ не превышает допустимых значений и составляет 3 и 0,5 % соответственно. Показано, что предлагаемые режимы приводят к уменьшению искажения синусоидальности напряжения. Дан анализ изменения суммарных потерь в комплексе «ДСП-СТК» и показано, что в предлагаемые режимы обеспечивают их снижение. Также проведено исследование влияния новых режимов работы СТК на величину и частоту колебаний напряжения, которые оцениваются интегральным показателем – дозой фликера. Установлено, что в режиме генерации реактивной мощности в диапазоне 0 – 30 Мвар кратковременная доза фликера снижается на 17 % (с 2,67 до 2,2 единиц).

Далее с использованием технологических параметров прокатки и координат главных электроприводов получены математические модели расчета электрических нагрузок РУ-10 кВ для нормального режима (при питании от трех трансформаторов) и утяжеленного – при отключении одного из трансформаторов. Доказана адекватность данных, полученных при моделировании, и реальных графиков нагрузки (погрешность моделирования не превышает 10%).

Проведено математическое моделирование режимов компенсации реактивной мощности ДСП с учетом несимметричной нагрузки. Результаты ис-

следований позволили оценить области устойчивой работы ТРГ в трех различных режимах: 1) полная компенсация реактивной мощности (нулевое задание регулятора РМ); 2) режим генерирования избыточной реактивной мощности СТК в питающую сеть 220 кВ; 3) режим потребления реактивной мощности из питающей сети. На основе математического моделирования был определен оптимальный диапазон генерирования реактивной мощности СТК в питающую сеть с учетом несимметричных режимов ДСП-180.

Результаты работ внедрены в образовательный процесс и эффективно используются при подготовке бакалавров, инженеров и магистров, а также кадров высшей квалификации в ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Руководитель работ по проекту**

Главный научный сотрудник  
кафедры электротехники и  
электротехнических систем  
ФГБОУ ВПО «МГТУ»

Карандаев А.С.

\_\_\_\_\_ октября 2011 г.  
М.П.