

---

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Администрация Правительства Кузбасса**

**Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

*Посвящается 100-летию  
со дня рождения ректора СМИ,  
доктора технических наук,  
профессора Н.В.Толстогузова*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:  
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО  
«Металлургия – 2021»**

*Труды*

*XXII Международной научно-практической конференции*

*10 – 11 ноября 2021 г.*

**Часть 2**

**Новокузнецк  
2021**

---

8. Астановский Д.Л., Астановский Л.З., Кустов П.В., Бурданов А.В. Переработка угля в местах его добычи по технологии ФАСТ инжиниринг® // Кокс и химия. 2020. №7. С.8-13.

9. Степанов С.Г., Логинов Д.А., Кочетков В.Н. Термическое обогащение угля как инструмент повышения эффективности угольного бизнеса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S45-2. С. 7-14.

10. Угольные мини-ТЭС с производством побочных продуктов [Электронный ресурс]: URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/ugol-nye-minites-s-proizvodstvom-pobochnyh-produktov>.

11. Мурко В.И., Протопопов Е.В., Темлянец М.В., Чаплыгин В.В., Литвинов Ю.А., Волков М.А. Разработка и создание инновационного научно-образовательного кластера по комплексному использованию угля и продуктов его переработки // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019. Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. 2019. С. 48-53.

12. Андреев Е.Е., Тихонов О.Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: учебник / Е. Е. Андреев, О. Н. Тихонов ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высшего проф. образования Санкт-Петербургский гос. горный ин-т им. Г. В. Плеханова (ТУ). Санкт-Петербург, 2007, 439 с.

УДК621.3.051

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
Новокузнецк, Россия, vladimir.kuznezoff@yandex.ru, kuzlena00@yandex.ru*

***Аннотация.** Рассмотрена актуальность компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения дуговой электросталеплавильной печи, резкопеременная электрическая нагрузка которой искажает синусоидальность сети и вызывает значительные колебания реактивной мощности. Разработана математическая модель СТК в среде «Matlab Simulink», получены осциллограммы переходных процессов для различных режимов работы сталеплавильного производства, выполнен их анализ. Рекомендовано внедрение СТК в производство.*

***Ключевые слова:** дуговая электросталеплавильная печь, энергосбережение, резкопеременная нагрузка, математическая модель, компенсация реактивной мощности, качество электрической энергии, статический тиристорный компенсатор.*

## **DEVELOPMENT OF A MODEL OF AN ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM FOR ELECTRIC STEELMAKING PRODUCTION IN ORDER TO SAVE ENERGY AND IMPROVE THE QUALITY OF ELECTRICITY**

**Kuznetsov V.A., Kuznetsova E.S.**

*Siberian State Industrial University,  
Novokuznetsk, Russia, vladimir.kuznezoff@yandex.ru, kuzlena00@yandex.ru*

***Abstract.** the relevance of reactive power compensation in the power supply system of an electric arc furnace is considered, the sharply alternating electric load of which distorts the sinusoidal nature of the network and causes significant fluctuations in reactive power. A mathematical model of the STC was developed in the Matlab Simulink environment, transient waveforms for various operating modes of steelmaking production were obtained, and their analysis was performed. The introduction of the STC into production is recommended.*

**Keywords:** *electric arc furnace, energy saving, abruptly variable load, mathematical model, reactive power compensation, quality of electrical energy, static thyristor compensator,*

В настоящее время потребление энергоресурсов в металлургической области России значительно превышает количество потребляемой энергии на ведущих зарубежных предприятиях. Электрометаллургия относится к одной из самых энергоемких производств.

Схема электроснабжения дуговых электропечей (ДСП) ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» сформировалась около 40 лет назад и сохранилась практически в прежнем виде. В процессе реконструкции электросталеплавильного производства проводилась только замена трансформаторного и коммутационного оборудования.

Схема электроснабжения электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» приведена на рис. 1. Трансформаторы дуговых электропечей, установленные на «печных» подстанциях, расположенных в непосредственной близости от сталеплавильных агрегатов, получают питание от двух силовых трансформаторов металлургического исполнения типа ТДЦНМ-160000/250000/220, 230/38,5 кВ, размещенных на опорной подстанции ОП-9. Силовые сетевые трансформаторы подстанции работают отдельно.

Напряжение короткого замыкания трансформатора - 13,5%, потери короткого замыкания и холостого хода — 464 кВт и 117 кВт соответственно. Подвод электроэнергии от ОП-9 к ДСП № 1, 2 и АКОС-100 осуществляется по шинпроводам 35 кВ, выполненным алюминиевыми шинами сечением 100x10 мм, длиной 240, 250 и 370 м. Агрегат АКП-130 получает питание по кабельной линии.

В настоящий момент в силу экономических причин цех работает на одной либо на двух печах с использованием одного или двух сетевых трансформаторов.

Значения токов трехфазного короткого замыкания на шинах 220 кВ подстанции ОП-9 следующие: максимальный режим энергосистемы - 9870 А, минимальный режим энергосистемы - 8140 А.

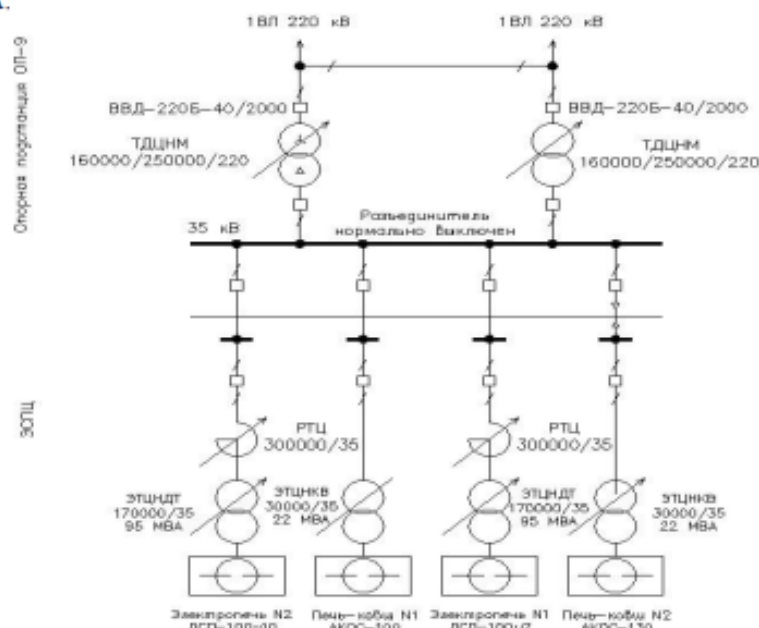


Рисунок 1 - Упрощенная схема электроснабжения дуговых электропечей ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

На основании исходных данных расчетными методами определены мощности трехфазного короткого замыкания и приведенные сопротивления в узлах электрической сети питания дуговых электропечей ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК».



Таблица 1 - Мощности трехфазного короткого замыкания в узлах электрической сети, питающей дуговые электропечи

Узел электрической сети	Максимальный режим энергоси-		Минимальный режим энергосистемы	
	Приведенное реактивное сопротивление X, Ом	Мощность короткого замыкания $S_{кз}$ , МВА	Приведенное реактивное сопротивление X, Ом	Мощность короткого замыкания $S_{кз}$ , МВА
Узел отпайки от линии 220 кВ ПС "Новокузнецкая" - ПС КМК-1 (общая точка)	11,61	4560	14,47	3660
Шины 220 кВ подстанции ОП-9	13,45	3930	16,31	3240
Шины 35 кВ подстанции ОП-9	1,63	910	1,71	870

Рациональный уровень и диапазон изменений напряжений на шинах печных подстанций определяется из условий обеспечения эффективной и надежной работы электропечей и высоковольтного оборудования электрической сети [1].

Дуговые электропечи, сетевые и печные трансформаторы, а также электрические сети 220 и 35 кВ, включенные в единую систему, оказывает взаимное влияние на элементы этой системы. Воздействие питающей сети на печи проявляются через напряжение на шинах печной подстанции [2].

Работа электропечных агрегатов оказывает ощутимое влияние на производственные показатели современных дуговых печей. Изменяются рабочие характеристики электропечей, нарушаются оптимальные режимы работы, искажаются уставки регуляторов электрического режима, увеличивается продолжительность плавки, удельные расходы электроэнергии и расход электродов [4,5].

ДСП являются причиной возникновения колебаний и несинусоидальности напряжения, снижения коэффициента мощности, а также статической и динамической несимметрии токов и напряжений.

Низкие значения коэффициента мощности приводят к необходимости применять в схемах электроснабжения ДСП компенсацию реактивной мощности. Применение средств компенсации позволяет:

- уменьшить нагрузку на трансформаторы, увеличить срок их службы;
- повысить производительность печи и снизить межремонтные сроки;
- улучшить качество электроэнергии у электроприемников за счёт уменьшения искажения формы напряжения;
- уменьшить нагрузку на коммутационную аппаратуру за счет снижения токов в цепях;
- снизить расходы на электроэнергию и электроды.

На промышленных предприятиях со специфическими электроприемниками, к которым относится ДСП, применение традиционных средств компенсации реактивной мощности (батареи конденсаторов, синхронный электромашинный компенсатор) неэффективно т.к. они являются быстродействующими. Характер потребления активной и реактивной электроэнергии печными агрегатами является резкопеременным, повторно кратковременным режимом работы и сильно влияет на качество электрической энергии. Для таких электроприемников необходимо применять устройства, позволяющие в комплексе решать проблему компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии (пассивные, активные и гибридные фильтры, статические тиристорные компенсаторы и корректоры коэффициента мощности).

К таким устройствам относится статический тиристорный компенсатор (СТК), использование в сетях мощных ДСП способствует улучшению производственных показателей процесса выплавки стали [6]. Увеличивается вводимая в ДСП мощность за счет стабилизации напряжения питания, снижается расход электродов вследствие повышения устойчивости горения дуг. Достоинством статического тиристорного компенсатора является также быстродействующая пофазная компенсация реактивной мощности дуговых электросталеплавильных печей; при этом отсутствуют режимы перекомпенсации (повышения напряжения при отключении нагрузки, неблагоприятные для электрических сетей).

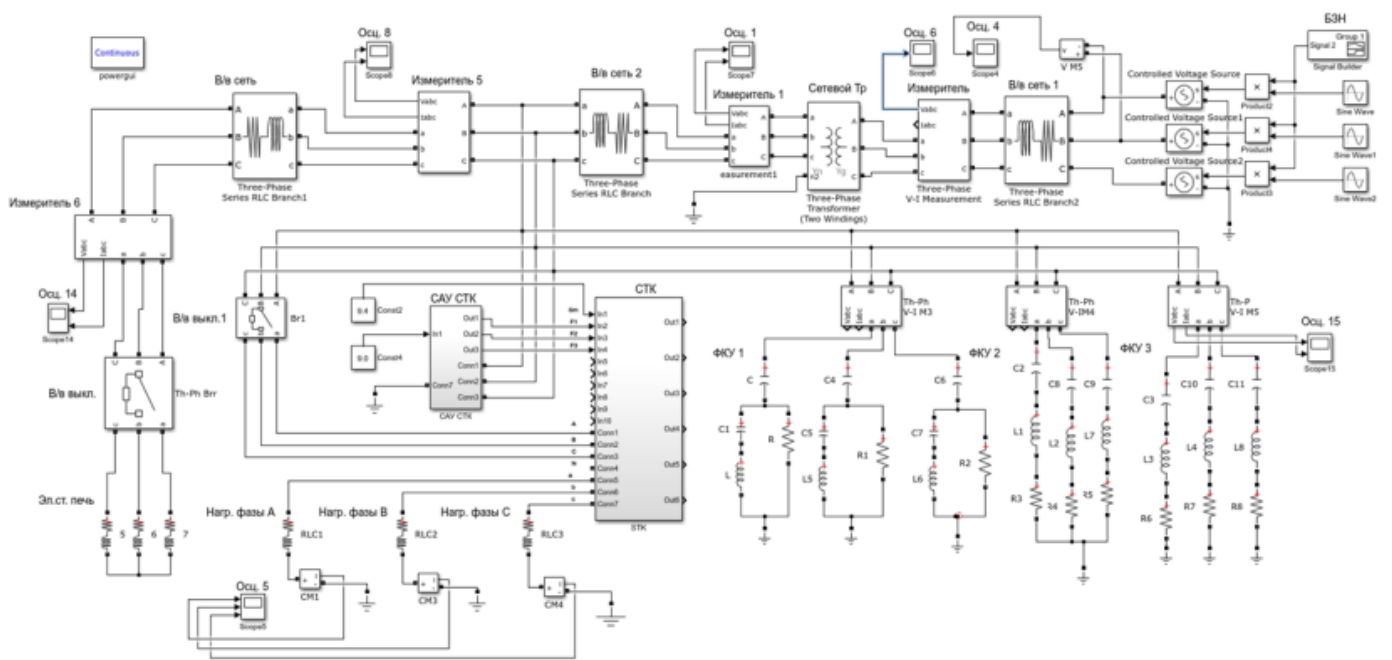


Рисунок 2 - Математическая модель CTK в Matlab Simulink



Для резкопеременных нагрузок, таких как ДСП, характерны несимметрия потребляемой мощности по фазам и броски реактивной мощности, в 1,5-2 раза превышающие номинальную мощность электропечных трансформаторов. При этом в питающей сети возникают колебания напряжения (фликер), отрицательно воздействующие на других потребителей электроэнергии. Исследования, проведенные Международным союзом по электротермии [3], показали, что мощность трехфазного короткого замыкания энергосистемы в точке подключения ДСП к шинам общего назначения должна быть в 80... 100 раз больше мощности эквивалентной электропечи. В противном случае обеспечить допустимый уровень фликера можно применением быстродействующей пофазной компенсации реактивной мощности, с помощью СТК. Обычно это условие и является критерием необходимости установки СТК.

Для исследования качества работы сети 35 кВ с резкопеременной нагрузкой с применением и без применения статического тиристорного компенсатора разработана математическая модель СТК в «Matlab Simulink». Модель, представленная на рисунке 2, реализована с использованием типовых а также оригинальных функциональных блоков и содержит: электрическую сеть 220 кВ, по которой получает питание сталеплавильный комплекс, включающую понижающий трансформатор 220/35 кВ, воздушные и кабельные линии электропередачи; СТК, а также фильтры высших гармоник, печной трансформатор, измерительные устройства. На схеме модели представлены: блок заданий напряжений «БЗН»; высоковольтные сети 220 и 35 кВ, соответственно «В/в сеть 1» и «В/в сеть»; сетевой трансформатор «Сетевой Тр»; эквивалентная печная нагрузка «Эл.ст.печь»; СТК; система автоматического управления СТК «САУ СТК»; фильтр-компенсирующие устройства «ФКУ»; высоковольтные выключатели «В/в выкл»; измерители; осциллографы «Осц.».

После разработки модели были сняты осциллограммы режимов работы системы, представленные на рисунках 3-4.

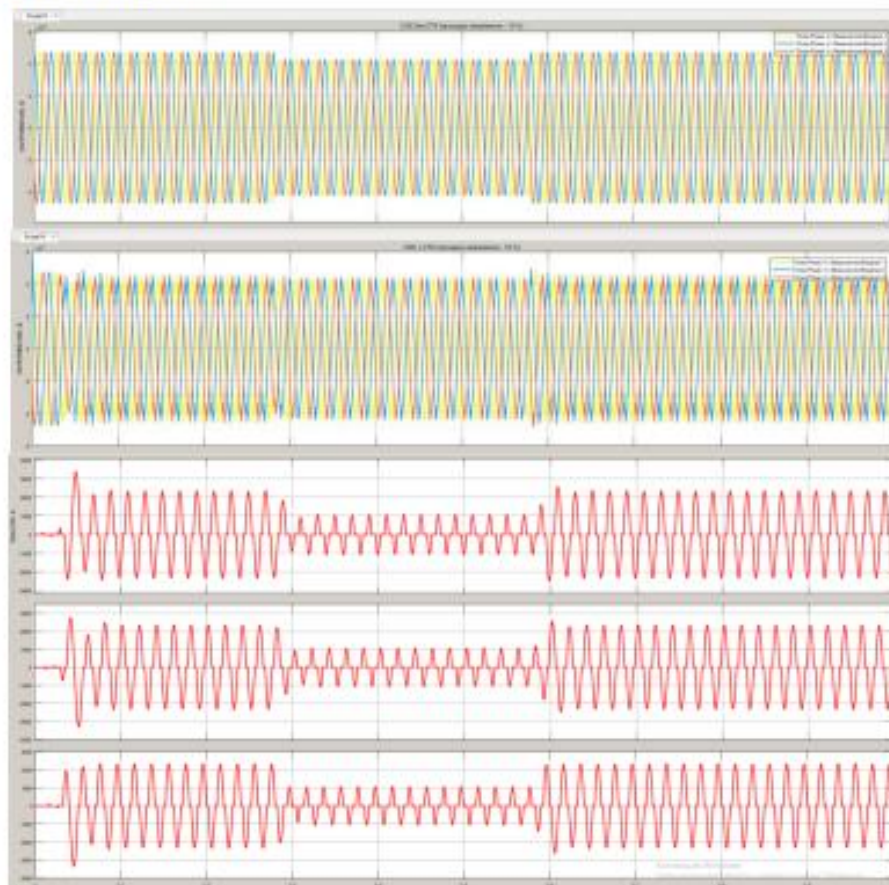


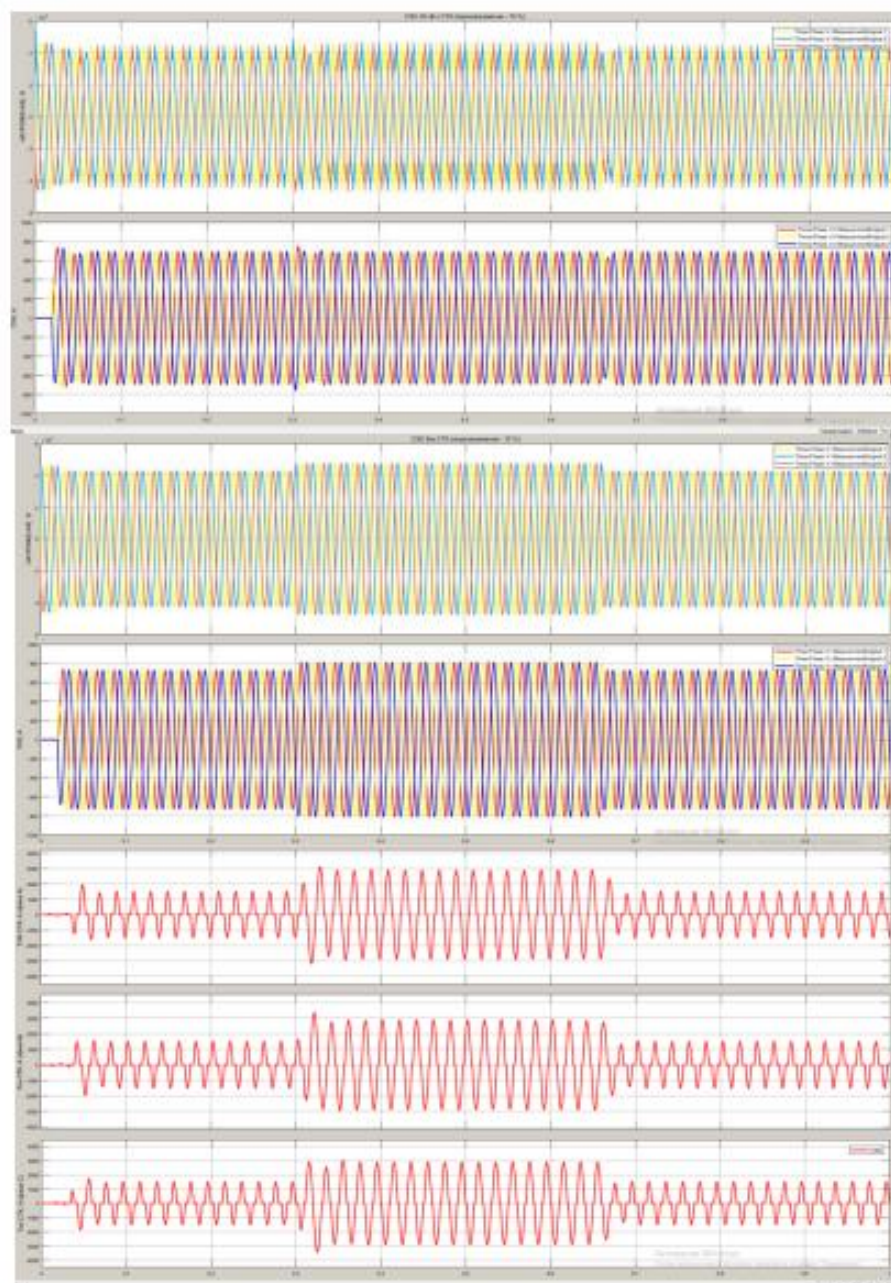
Рисунок 3 – Осциллограммы режима работы системы при просадке напряжения 220 кВ: 1 – напряжение СЭС 35 кВ без СТК с просадкой 10 %; 2 – напряжение СЭС 35 кВ с СТК с просадкой 10 %; 3 – фазные токи СТК.



1 – напряжение СЭС 35 кВ без СТК с просадкой 10%; 2 – фазный ток печной нагрузки без СТК; 3 – напряжение СЭС 35 кВ с СТК; 4 – фазный ток печной нагрузки с СТК; 5 – фазные токи СТК

Рисунок 4 – Осциллограммы режима работы системы при печной нагрузке





1 – напряжение СЭС 35 кВ с СТК при перенапряжении 10%; 2 – фазный ток печной нагрузки с СТК;  
 3 – напряжение СЭС 35 кВ без СТК;  
 4 – фазный ток печной нагрузки без СТК; 5 – фазные токи СТК  
 Рисунок 5 – Осциллограммы режима работы системы при возникновении перенапряжения:

**Выводы:**

1. По результатам анализа осциллограмм выявлено, что при возникновении возмущений применение СТК приводит к стабилизации напряжения на шинах СЭС 35 кВ, что обеспечивает увеличение вводимой в рабочее пространство печи активной мощности и соответственно производительности; при этом снижаются удельные расходы электроэнергии и электродов.
2. Расчеты показывают, что внедрение СТК в электросталеплавильном производстве



---

АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволит увеличить производительность печей до 8 %, снизить расход электродов до 6 %, удельный расход электроэнергии до 5 % [2].

Библиографический список

1. Рабинович В.Л., Захаров З.Р., Ушаков В.И. Критерии нормирования допустимого диапазона изменений напряжения питания установок ДСП. I Всесоюзный научно-технический симпозиум "Электроснабжение и электрооборудование дуговых электропечей". Тезисы докладов. М., Информэлектро, 1988, с. 12-13.
2. Захаров З.Р., Рабинович В.Л., Ушаков В.И. Влияние параметров питающих сетей на производственные показатели электропечей. В сб. "Дуговые сталеплавильные печи". ВНИИЭТО. М., Энергоатомиздат, 1991, с. 54-64.
3. Lemmenmier J. Report in UTE/UNTPEDE Enquire about the Effect of Electrical Arc Furnaces on Power Systems. - VII Международный конгресс по электротермии, Варшава, 1972. Перевод ВНИИЭТО № Ц-7976.
4. Катайцева (Кузнецова) Е.С., Кузнецов В.А., Катунин А.И. Анализ электропотребления технологических периодов плавки в электродуговых печах / Проблемы электроснабжения и электросбережения горнорудных и металлургических предприятий Кузбасса: тез. док. Всерос. научно-практ. конф. 11-12 апр. 2000, Новокузнецк. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2000. – С.91-93.
5. Кузнецова Е.С., Кузнецов В.А., Катунин А.И., Родина Т.Н. О резервах экономии электроэнергии в электросталеплавильных цехах Изв. вуз. Черная металлургия. – 2001. – № 6. – С.18 – 20.
6. Кузнецов В.А. Миронов М.С. Сигачев Н.А. Внедрение статического тиристорного преобразователя в высоковольтных сетях с резкопеременной нагрузкой / Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. тр. VII Всерос. научн. – практ. конф., 2016 / под ред. В.Ю. Островляничка, – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2016. – С.249 – 251.