

Якимов И.А.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

## ОБОСНОВАНИЕ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Рассмотрена силовая схема соединения обмоток трансформатора дуговой сталеплавильной печи рабочим объемом 180 т (ДСП-180) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Показано, что печной трансформатор представляет собой сложный агрегат, состоящий из трех электромагнитных единиц, а именно: реактора с железным сердечником, главного и вольтодобавочного трансформаторов. В свою очередь, главный трансформатор является трехобмоточным с возможностью регулирования напряжения под нагрузкой в третичной обмотке. Дана краткая характеристика системы управления электротехнологическим режимом  $\text{ArCOS}$ . Система осуществляет воздействие на гидравлическую систему регулирования положения электродов и переключение ступеней устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) трансформатора и реактора. Показано, что ухудшение качества управления и снижение надежности ДСП связаны с низким быстродействием системы. Представлены осциллограммы тока дуги при переключениях ступеней напряжения трансформатора, подтвердившие наличие продолжительных пауз при каждой коммутации. Это приводит к потере контроля над режимом плавки. Вторым недостатком исполнительных элементов системы  $\text{ArCOS}$  является низкое быстродействие, связанное с инерционностью гидравлической системы перемещения электродов. Представлены осциллограммы переходных процессов при различной настройке регулятора импеданса, подтвердившие данный вывод. В качестве перспективного направления отмечена разработка силовых схем печных трансформаторов с бесконтактным регулированием напряжения. Рассмотрена предложенная силовая схема трансформатора с тиристорным регулированием напряжения в третичной обмотке, реализующая известную концепцию регулирования напряжения ДСП с высокой динамикой. Представлены результаты исследований, выполненных методом математического моделирования, подтвердившие реализуемость плавного регулирования напряжения в заданном диапазоне. Дана оценка возможностей предложенной схемы в отношении регулирования основных режимных координат при установленных соотношениях напряжений и мощностей главного и вольтодобавочного трансформаторов. Обозначены направления дальнейшего повышения быстродействия системы управления электрическим режимом ДСП.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, электропечной трансформатор, силовая схема, устройство регулирования напряжения, гидравлическая система перемещения электродов, управление, быстродействие, исследования, бесконтактное регулирование, тиристорный регулятор напряжения, разработка.

### ВВЕДЕНИЕ

Дуговая сталеплавильная печь является несимметричной, нелинейной нагрузкой с резкопеременным характером потребления электрической энергии. Существуют различные варианты регулирования напряжения печных трансформаторов. Для ДСП сверхвысокой мощности оптимальной является схема регулирования напряжения с использованием вольтодобавочного трансформатора [1]. На **рис. 1** представлены упрощенная силовая схема и схема соединения обмоток печного трансформатора ДСП-180. Печной трансформатор (ПТ) представляет собой трансформаторный агрегат номинальной мощностью 150 МВА, состоящий из трех активных единиц (**рис. 1, а**):

- главного трансформатора (ГТ) номинальной мощностью 123 МВА;
- вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) номинальной мощностью 32 МВА;
- реактора (Р).

Главный трансформатор представляет собой трехобмоточный агрегат с возможностью регулирования напряжения под нагрузкой в третичной обмотке. Вольтодобавочный трансформатор – это двухобмоточный агрегат, который выполняет регулировочную функцию. Первичная обмотка высокого напряжения (ОВН) соединена по схеме «треугольник» с целью исключения попадания в питающую сеть гармоник, кратных трем (**рис. 1, б**). Вторичная обмотка низкого напряжения (НН) состоит из двух последовательно соединенных подобмоток: вторичной обмотки ГТ (НН<sub>ГТ</sub>) и вторичной обмотки ВДТ (НН<sub>ВДТ</sub>), которые образуют вторичную обмотку всего ПТ. Третичная обмотка выпол-

нена по схеме «звезда с заземленной нейтралью». Это обеспечивает более простое конструктивное исполнение контактного устройства РПН. Первичная обмотка ВДТ также соединена по схеме «звезда с заземленной нейтралью».

Регулирование напряжения и индуктивности реактора в современных ПТ осуществляют в третичной обмотке. Это является компромиссным решением между подключением к высоковольтной первичной либо силовоточной вторичной обмоткам. В данном варианте напряжение в третичной обмотке ниже первичного, а ток меньше вторичного. Такая схема регулирования представлена на **рис. 1, б**. Она была разработана фирмой SIEMENS в 1966 г. и впервые апробирована на ДСП металлургических заводов в Европе и Японии [2, 3].

Представленная схема нашла широкое применение на печах высокой и сверхвысокой мощностей. В ней устройство РПН установлено в промежуточном контуре между ГТ и ВДТ. Величина напряжения в этом контуре выбирается на среднем уровне по отношению к стороне высокого напряжения. С целью уменьшения габаритов и веса трансформатора, а также уменьшения разрывной мощности контактора, регулирование напряжения под нагрузкой осуществляется в двух диапазонах с использованием одной и той же регулировочной обмотки (РО). За счет этого осуществляется реверс вторичного напряжения ВДТ. В результате обеспечиваются широкий диапазон и глубина регулирования. Такой принцип регулирования используется в трансформаторе ДСП-180 электросталеплавильного цеха ОАО «ММК».

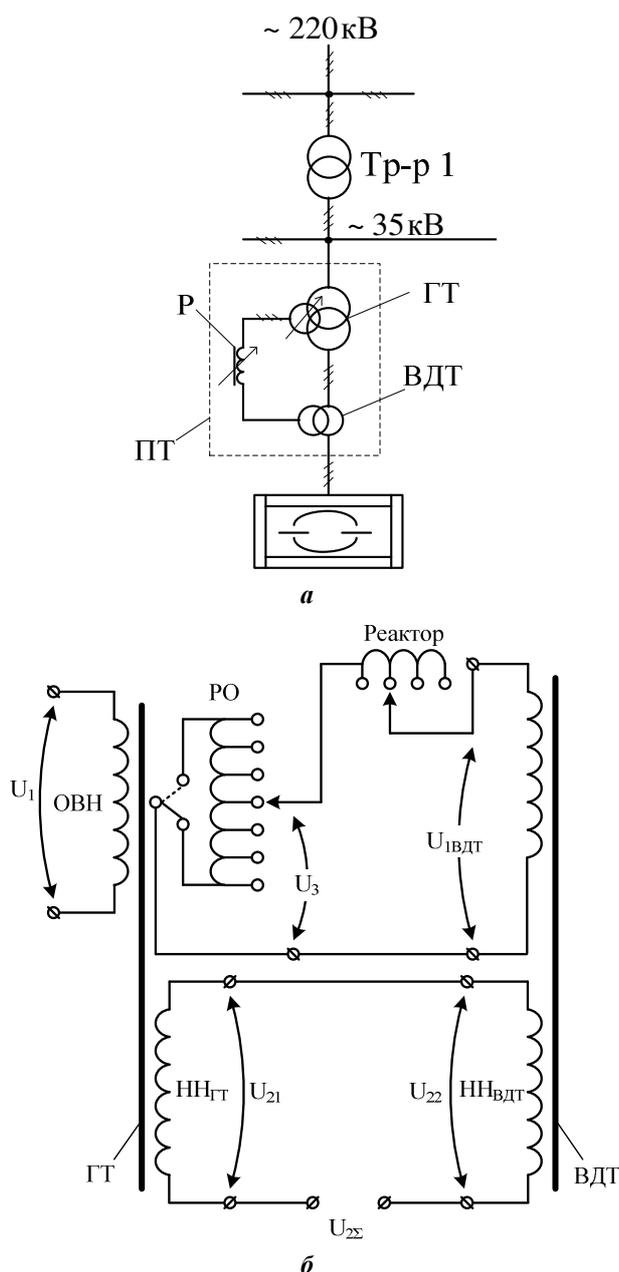


Рис. 1. Однолинейная схема (а) и схема подключения обмоток и РПН (б) печного трансформатора ДСП-180

Управление электрическим режимом ДСП-180 осуществляется интеллектуальной системой управления электродами ArCOS, функциональная схема и принцип работы которой рассмотрены в [4, 5]. Регулирование мощности ДСП осуществляется по двум каналам: воздействием на гидравлическую систему положения электродов и переключением ступеней устройств РПН трансформатора и реактора. Очевидно, что от быстродействия данных каналов зависит управляемость процесса и, в конечном счете, качество ведения плавки. Вместе с тем опыт эксплуатации ДСП позволяет сделать вывод о недостаточном быстродействии регулирования. Это приводит к появлению бестоковых пауз, продолжительность которых может составлять от 5 до 10% времени плавки. Такое положение не может считаться удовлетворительным, т.к. в течение этого времени технологический процесс неуправляем.

С целью повышения эффективности ДСП необходимо решить две взаимосвязанные задачи: сокращение вре-

мени переключения контактов РПН и обеспечение надежности работы печного трансформатора. Повышение быстродействия, а также необходимый диапазон регулирования вторичного напряжения могут быть обеспечены в схемах с бесконтактным регулированием в третичной обмотке на основе однооперационных тиристоров [6].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сложная конструкция печного трансформатора приводит к нарушениям его работы и внеплановым остановкам технологического агрегата. Актуальность повышения надежности ПТ ДСП-180 исследована, результаты представлены в [7–10]. В [11, 12] показано, что частыми причинами аварийных отключений являются повреждения РПН. Кроме того, возникают неисправности, вызванные повышенными вибрациями, увеличением концентраций горючих газов, разрядными явлениями. Это повышает вероятность возникновения наиболее опасных повреждений – коротких замыканий в обмотках трансформатора.

Желание снизить аварийность ПТ и повысить быстродействие системы управления позволяет обоснованно ставить вопрос о целесообразности замены механических устройств РПН на бесконтактные, выполненные на основе тиристоров или полностью управляемых транзисторов. Решение данной проблемы связано с решением комплекса задач, включающих разработку силовых схем трансформаторов ДСП с бесконтактным регулированием напряжения и совершенствование двухканальной системы регулирования положения электродов.

В публикациях [13, 14] показано, что основным недостатком исполнительных элементов системы регулирования ArCOS является низкое быстродействие, т.к. постоянная времени системы гидропривода составляет 0,2–0,4 с, а время переключения ступени трансформатора – 3–5 с. Этот недостаток является характерным для всех систем автоматического управления электрическим режимом ДСП с контактными РПН. При 15–20 коммутациях в течение плавки средней продолжительности система управления фактически не действует в течение 50–100 с. Таким образом, при теоретически непрерывной работе печи процесс неуправляем в течение полутора часов за сутки. На основании изложенного следует вывод о необходимости поиска путей повышения быстродействия регулирования режимных параметров за счет сокращения продолжительности неуправляемых бестоковых пауз.

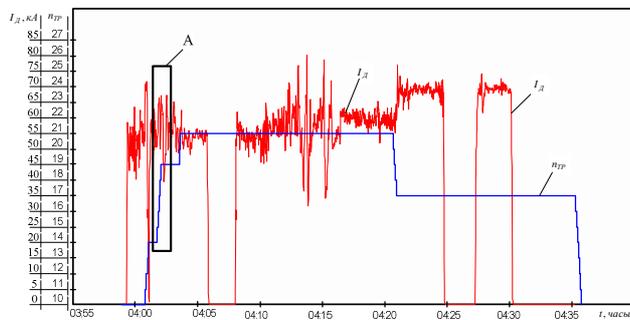
Во многих зарубежных публикациях, например [15–17], рассматриваются силовые схемы печных трансформаторов с тиристорным регулированием напряжения. Однако информация о промышленном внедрении таких разработок на сверхмощных ДСП отсутствует. Целью представленной публикации является анализ быстродействия РПН и гидравлического привода перемещения электродов. Поставлена задача оценки реализуемости тиристорного регулирования вторичного напряжения ПТ в разработанной автором силовой схеме [14, 18]. Вопросы повышения быстродействия системы и сокращения продолжительности неуправляемых интервалов рассматриваются с позиций исключения бестоковых пауз, вызванных коммутацией РПН. Поэтому данному вопросу уделено наибольшее внимание.

АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

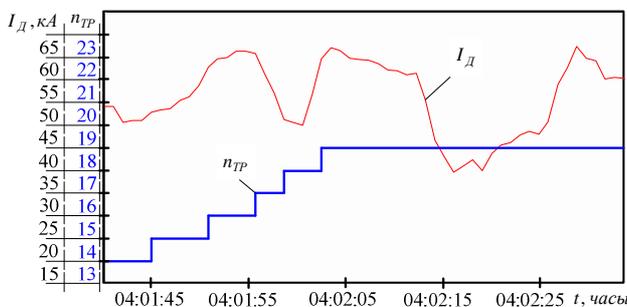
**Анализ быстродействия РПН.** На рис. 2, а представлены осциллограмма тока  $I_d$  фазы и профилограмма изменения номера  $n_{ТР}$  ступени напряжения печного трансформатора ДСП-180 за цикл плавки. Для детального рассмотрения процесса изменения тока при переключении ступеней РПН на рис. 2, б представлен фрагмент, ограниченный областью «А», в увеличенном масштабе времени. Из осциллограмм следует, что среднее время переключения ступени составляет 3–5 с. При этом ток дуги успевает измениться от максимального значения 67 кА до минимального 54 кА.

Представленная осциллограмма тока демонстрирует работу дискретной системы управления мощностью ДСП, в которой имеются нерегулируемые интервалы времени. В соответствии с программой плавки в области «А» происходит переход с 14-й на 19-ю ступени трансформатора, совокупная задержка времени 12–15 с. За одну плавку, длительность которой составляет примерно 30–40 мин, происходит 15–20 переключений. Следовательно, в течение 45–100 с система управления находится в разомкнутом состоянии и не контролирует параметры электрического режима.

На рис. 3, а представлена характерная диаграмма переключения ступеней устройств РПН трансформатора  $n_{СТ.ТР}$  и реактора  $n_{СТ.Р}$  за цикл плавки в ДСП-180. Обобщенные результаты исследований времени переключения приведены в виде диаграмм на рис. 3, б. Из них следует, что более 5% времени работы под током не контролируется системой управления печи.

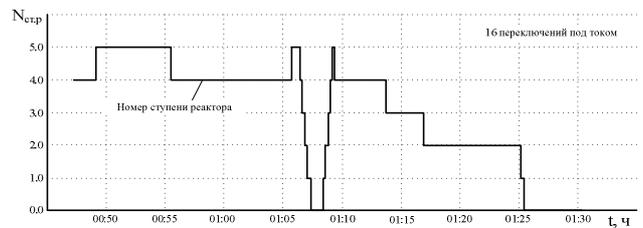
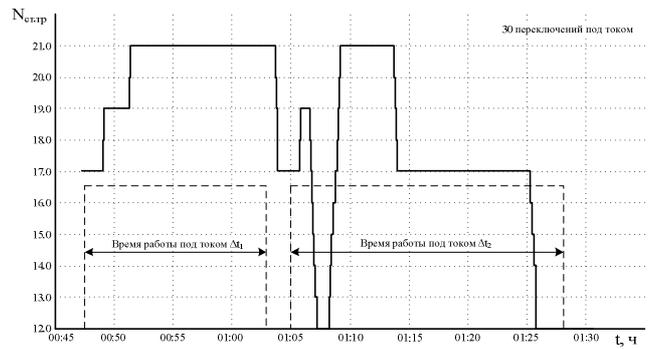


а

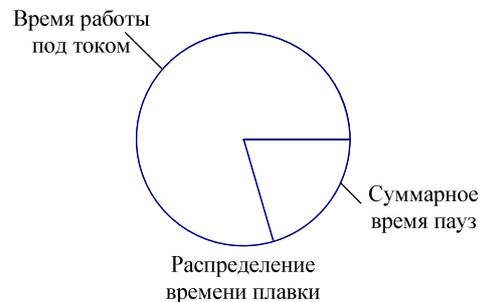


б

**Рис. 2.** Осциллограмма тока дуги и диаграмма переключения ступеней напряжения трансформатора ДСП-180: а – за цикл плавки; б – область «А» в увеличенном масштабе времени



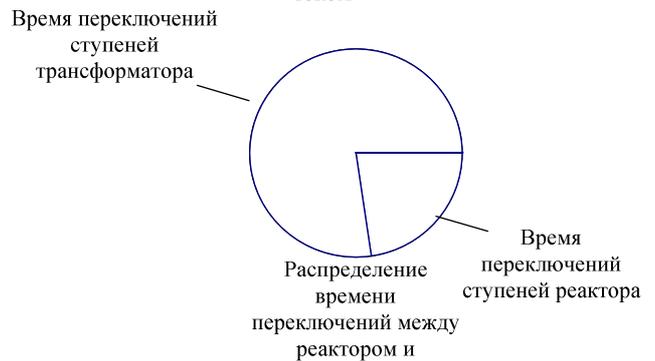
а



Распределение времени плавки



Распределение времени работы под током



Распределение времени переключений между реактором и

**Рис. 3.** Диаграммы переключения ступеней устройств РПН трансформатора и реактора (а) и распределения времени работы под током (б)

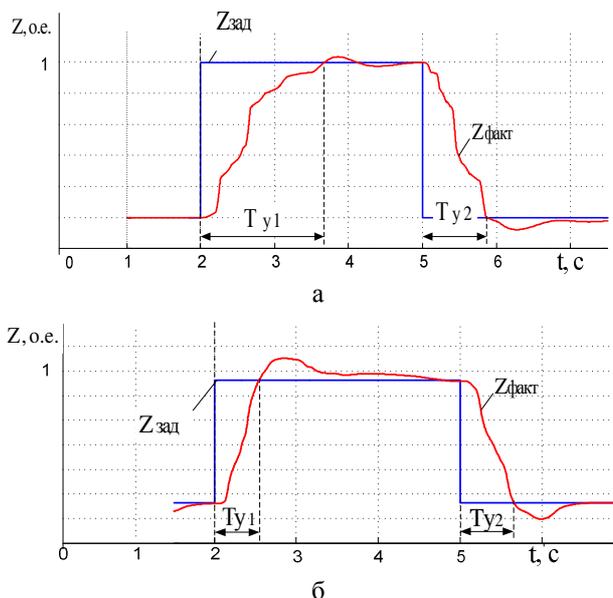
**Быстродействие гидропривода перемещения электродов.** Стабильность токов дуг во многом определяется быстродействием системы автоматического регулирования (САР) гидропривода перемещения электродов. Данный показатель определяется настройкой системы регулирования импеданса (тока дуг), исключаящей, с одной

стороны, рывки и динамические удары в системе с большими инерционными массами, а с другой – обеспечивающей достаточную динамику перемещения. Существует рациональный диапазон настройки пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) импеданса. На **рис. 4** показаны зависимости изменения полного сопротивления фазы от времени для различных настроек регулятора [19]. В первом случае (**рис. 4, а**) ПИ-регулятор не отвечает требуемым параметрам, поэтому время регулирования при отработке скачка задания  $Z_{зад}$  значительно. Так, при набросе сигнала задания время переходного процесса  $T_{y1}$  составляет около 3,5 с, при сбросе время запаздывания  $T_{y2}=0,8$  с. В связи с этим выход на заданное значение полного сопротивления фазы  $Z_{зад}$  происходит со значительной задержкой.

Известно несколько способов повышения быстродействия САР импеданса. В частности, некоторыми авторами [3] предлагается применять адаптивный ПИ-регулятор. С учетом того, что объект регулирования является существенно нелинейным, пропорциональную часть регулятора выбирают переменной в зависимости от текущего значения импеданса  $Z_{факт}$ , а постоянную времени интегральной части подбирают индивидуально для каждой печи. В этом случае отработка скачка задания импеданса  $Z_{зад}$  (**рис. 4, б**) происходит за меньшее время:  $T_{y1}=0,6$  с,  $T_{y2}=0,65$  с. Таким образом, сопоставление осциллограмм показывает, что применение адаптивного регулятора позволяет повысить эффективность работы электропечи.

В идеальном случае перемещение электродов можно существенно ограничить и сделать САР импеданса более динамичной. Для этого функцию поддержания заданного импеданса следует возложить на более быстродействующую систему регулирования напряжения, подводимого к электродам. Однако при применении механического устройства РПН использование данного потенциала САР практически неосуществимо. Это подтверждается следующими рассуждениями. Скорость протекания электрических процессов в печи на несколько порядков выше скорости перемещения электродов в гидравлической системе. Так, постоянная времени дуги находится в пределах  $100-600 \cdot 10^{-6}$  с, а время перемещения электродов при коротких замыканиях и обрывах дуг составляет несколько секунд (постоянная времени системы гидропривода 0,2–0,4 с). Очевидно, что случайные и быстрые изменения токов не могут быть отработаны системой без запаздывания, вызванного инерционностью перемещаемых масс. При этом время переключения каждой ступени трансформатора еще выше и составляет 3–5 с. Таким образом, существующая система управления электротехнологическим режимом ДСП с применением инерционной системы гидропривода электродов и механического переключателя РПН не обеспечивает достаточной динамики регулирования тока.

Вопросы разработки новых способов и устройств управления электротехнологическим режимом ДСП, позволяющих повысить стабильность работы и производительность печи, являются актуальными и требуют детального рассмотрения с учетом многофакторности самого объекта управления – электрической дуги. Вместе с тем очевидно, что применение бесконтактного регулятора напряжения позволит полностью исключить процессы коммутации. В результате будет исключен неконтролируемый период плавки продолжительностью 2–3 мин за цикл. Кроме сокращения времени работы под током данное решение позволит удалить из схемы механическое устройство РПН, которое имеет ограниченный ресурс и требует периодического профилактического обслуживания.



**Рис. 4. Изменения полного сопротивления фазы при отработке скачка задания:**  
**а – при оптимальной настройке ПИ-регулятора импеданса;**  
**б – при адаптивном регуляторе**

ТИРИСТОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Однофазная силовая схема.** С целью устранения рассмотренных выше недостатков автором ведется разработка силовых схем электропечного трансформатора с тиристорным регулированием напряжения. Перспективным техническим решением является подключение тиристорного регулятора в третичную обмотку ПТ (**рис. 5, а**) [4]. В основу разработки положена концепция тиристорного регулирования напряжения ДСП с высокой динамикой, изложенная в [20, 21]. Регулирование напряжения осуществляется в третичной обмотке ГТ с помощью тиристорного регулятора тока (ТРТ). Вторичное напряжение определяется в соответствии с выражением

$$U_2 = U_{2Г} \pm U_{2Б}. \tag{1}$$

Основная функция регулирования напряжения возложена на тиристорные ключи  $T1$  и  $T2$ . Посредством фазового управления можно изменять напряжение на зажимах первичной обмотки ВДТ. Тиристоры  $T3$  и  $T4$  предназначены для обеспечения дроссельного режима работы ВДТ в моменты закрытого состояния основных тиристоров. Они выполняют функцию снижения реактанса ВДТ со стороны нагрузки при закрытых тиристорах  $T1$  и  $T2$ . Это обеспечивает исключение режима короткого замыкания в момент перехода главных тиристоров в проводящее состояние. Обозначения дуги принято согласно уравнению Тельного С.И. [22]. Более подробно данная схема регулирования рассмотрена в [4].

На **рис. 5, б** представлена разработанная однофазная схема печного трансформатора с регулированием напряжения в третичной обмотке с помощью бесконтактных ключей. Такой вариант может быть относительно просто реализован в силовой схеме трансформатора, представленной на **рис. 3**, поскольку в ней также осуществляется регулирование напряжения в третичной обмотке. При наличии одной пары основных и одной пары шунтирующих тиристоров она позволяет плавно изменять напряжение вторичной обмотки от  $0,5 U_{ном}$  до  $U_{ном}$  и мощность, пропорциональную квадрату напряжения, – от 25 до 100% номинальной.

В данной схеме соотношение напряжений и мощностей ГТ и ВДТ принято таким же, как в трансформаторе ДСП-180 ОАО «ММК». Оно составляет 635:173 В и 50:12 МВА (соотношение мощностей приведено для одной фазы). Для ограничения тока короткого замыкания на допустимом уровне при закрытых тиристорах  $T1$  и  $T2$  и расширения диапазона регулирования последовательно с тиристорами  $T3$  и  $T4$  вводится токоограничивающий реактор  $L_p$ . Это является основным отличительным признаком предложенного технического решения.

**Исследование регулировочной способности.** Ниже рассматриваются возможности предложенной схемы в отношении регулирования основных режимных координат при указанных выше соотношениях напряжений и мощностей ГТ и ВДТ. Исследования проводились с помощью модели, разработанной в среде MATLAB [18, 23].

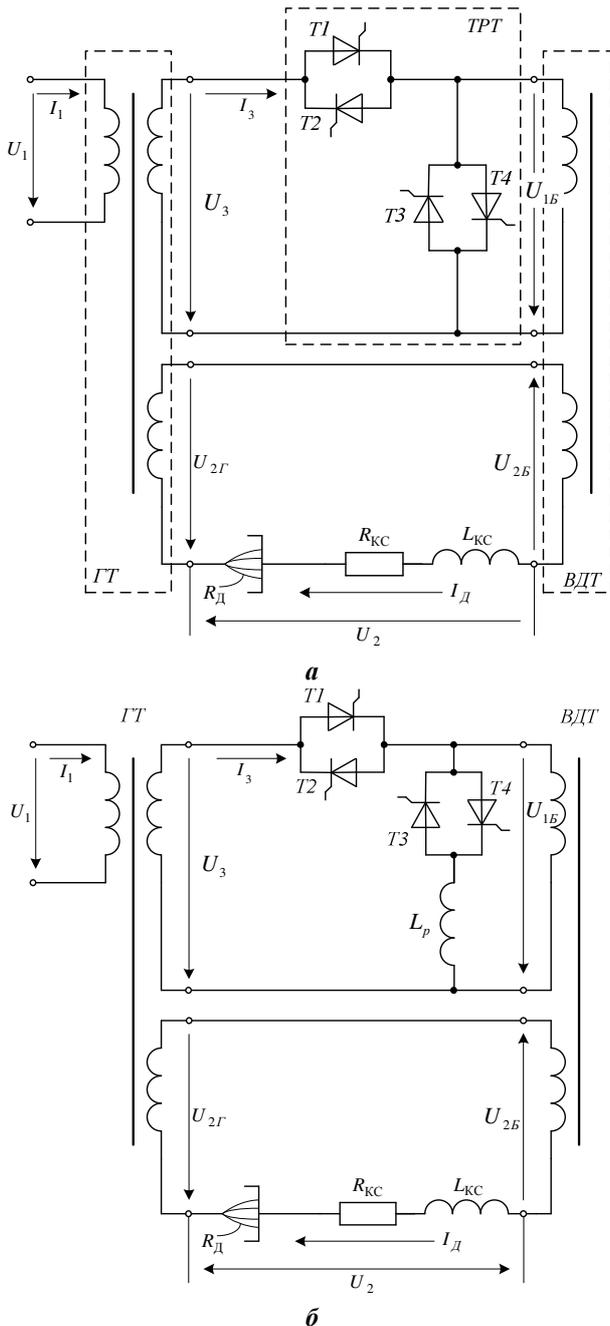


Рис. 5. Однофазные схемы ПТ с бесконтактным регулированием напряжения в третичной обмотке: а – схема, поясняющая принцип регулирования; б – предложенная схема

Из схемы, представленной на рис. 5, б, видно, что с помощью данного схемного решения можно поддерживать ток на уровне тока короткого замыкания, соответствующего максимальному углу управления  $\alpha_{max}$ . Причем этот ток определяется величиной индуктивности реактора  $L_p$ . Для оценки способности регулирования тока нагрузки на рис. 6 приведены внешние характеристики ДСП при трех значениях угла управления тиристорами  $T1$  и  $T2$ . На рис. 7 представлены зависимости активной мощности дуги от напряжения дуги при различных углах управления тиристорными ключами.

На рис. 8 представлена зависимость реактивной мощности, потребляемой из сети при различных углах управления тиристорными ключами. При максимальном угле управления, что соответствует закрытым ключам  $T1$  и  $T2$ , реактивная мощность изменяется по линии, обозначенной  $\alpha_{max}$ . По мере уменьшения угла управления увеличивается действующее значение напряжения, добавляемого в контур нагрузки, согласно (1). Поэтому при заданном значении напряжения дуги  $U_d$  потребление реактивной мощности увеличивается и в пределе при минимальном угле управления достигает максимального значения, определяемого по линии  $\alpha_{min}$ .

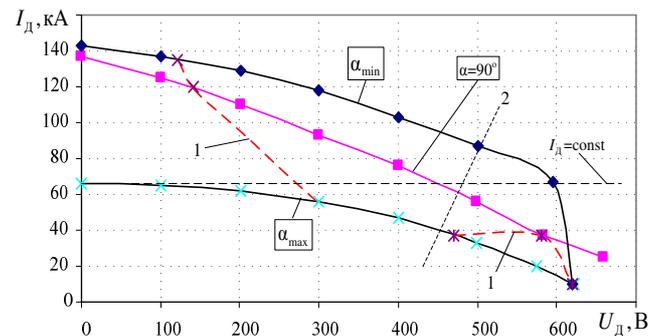


Рис. 6. Зависимости тока дуги от напряжения при изменении угла управления в третичной обмотке: 1 – кривая тока, соответствующая поддержанию активной мощности дуги на постоянном уровне; 2 – линия, соответствующая границе прерывистого тока дуги

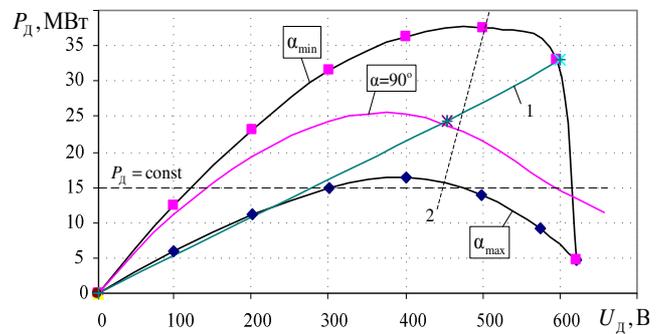
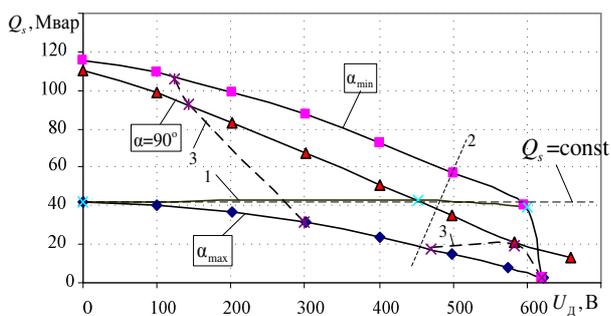


Рис. 7. Зависимости мощности дуги от напряжения при изменении угла управления в третичной обмотке: 1 – кривая активной мощности, соответствующая поддержанию тока дуги на постоянном уровне; 2 – линия, соответствующая границе прерывистого тока дуги



**Рис. 8.** Зависимость реактивной мощности, потребляемой из сети, от напряжения дуги при изменении угла управления в третичной обмотке: 1 – кривая мощности, соответствующая поддержанию тока дуги на постоянном уровне; 2 – линия, соответствующая границе прерывистого тока дуги; 3 – кривая реактивной мощности сети, соответствующая поддержанию активной мощности дуги на постоянном уровне

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам выполненных исследований сделан вывод, что регулирование напряжения с помощью тиристорных ключей, включенных по схеме на рис. 5, б, принципиально возможно. Диапазон регулирования основных режимных координат будет определяться соотношением напряжений главного и вольтодобавочного трансформаторов, а также значением индуктивности ограничивающего реактора. Из рис. 6 следует, для того чтобы иметь возможность поддерживать различные значения токов дуг, необходимо варьировать значения индуктивности ограничивающего реактора или уменьшать вторичное напряжение главного трансформатора. Увеличение вторичного напряжения вольтодобавочного трансформатора нецелесообразно, так как при этом увеличивается ток короткого замыкания. Это приведет к быстрому износу электродов и увеличенным электродинамическим нагрузкам. В случае если из схемы рис. 5, б исключить реактор  $L_p$ , значительно снизится граничное значение напряжения дуги, при достижении которого ток начинает протекать с паузами. Соответственно резко уменьшится диапазон регулирования режимных координат, что не является допустимым. Таким образом, дополнительное включение в силовую схему печного трансформатора токоограничивающего реактора с индуктивностью  $L_p$  является существенным отличительным признаком, обеспечивающим повышение устойчивости работы схемы и расширение диапазона регулирования напряжения дуги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение тиристорных регуляторов напряжения печного трансформатора обеспечит переход от одной стадии плавки к другой с минимальной задержкой. Это позволит исключить неконтролируемый процесс плавки продолжительностью 2–3 мин и в результате сократить время цикла плавки на 10–15%. Кроме сокращения времени работы под током предлагаемое решение позволяет исключить из схемы устройство РПН, которое имеет ограниченный ресурс и ухудшает показатели безаварийности агрегата. Наряду с этим введение бесконтактного регулирования напряжения снижает потери мощности в печи и улучшает динамические характеристики системы [19, 24].

В качестве способов, которые позволяют расширить диапазон регулирования основных режимных координат, рекомендуются:

1. Изменение величины индуктивности реактора.
2. Изменение соотношений напряжений главного и вольтодобавочного трансформаторов.

Для максимального использования регулировочных возможностей целесообразно комплексное применение этих методов. Для этого необходима разработка усовершенствованной системы управления электрическим режимом ДСП. При разработке системы следует принять за основу систему ArCOS, которая установлена на ДСП большинства отечественных металлургических предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Якимов И.А. Основные способы регулирования напряжения печного трансформатора // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2008. Вып. 15. С. 247–252.
2. Кемпф П., Маркворт Э., Мюленбек И. Дуговая печь 110 кВ с регулированием нагрузки в промежуточном контуре // Черные металлы. 1974. № 9. С. 27–28.
3. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Руссо Жан-Жак, Сцымански Винсент, П.Г. Тулупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 106–120.
4. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Якимов И.А. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового оборудования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2009. Вып. 11. №15. С. 32–38.
5. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Николаев Александр Аркадьевич. Магнитогорск, 2009.
6. Способы управления электрическим режимом электродуговых печей / Ю.П. Журавлев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмин, А.А. Николаев, Е.Б. Агапитов // Известия вузов. Электромеханика. 2006. №4. С. 76–81.
7. Карандаева О.И. Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2011. № 34 (251). С. 15–20.
8. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring /A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khramshin, O.I. Karandaeva // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. P. 273–279. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040896
9. Диагностические функции системы непрерывного контроля технического состояния трансформаторов агрегатов дуговых сталеплавильных печей / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмин, Р.А. Леднов // Металлург, 2014. №8. С. 53–59.
10. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 58–68.
11. Евдокимов С.А. Контроль технического состояния РПН трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 1. С. 22–30.

12. Система диагностического мониторинга технического состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, А.А. Сарлыбаев // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2014. №4. С. 27–33.
13. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, И.А. Якимов, Е.В. Повелица, А.В. Ануфриев // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Т.1. №1. С. 48–58.
14. Якимов И.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Исследование сверхмощных дуговых сталеплавильных печей с тиристорным регулятором напряжения в промежуточном контуре печного трансформатора // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Т.1. №1. С. 41–47.
15. Пат. 2086076 Российской Федерация, МПК Н 05 В 7/148, G 05 F 1/02, F 27 D 19/00. Способ регулирования тока трехфазной дуговой электропечи и установка трехфазной электродуговой печи прямого нагрева / Дж. Дженсини, Л. Морелло, Дж. Коассин, Р. Фраджаккомо. Опубл. 27.07.1997.
16. Patent 6603795 US, H05B 7/144, H05B 7/148. Power control system for arc electric arc furnace / Thomas Lai Wai Ma, Mohammad Sedighu, Brian Kenneth Perkins, Theodorus Anthonius Gerritsen, Janos Rajda. Aug. 5, 2003.
17. Patent 6226313 US, H0513 7/144. Power source circuit and its control for three-phase electric arc furnace to reduce flicker / Manoharan Thamodharan, Albrecht Wolf. May 1, 2001.
18. Исследование работы тиристорного регулятора напряжения печного трансформатора в режиме стабилизации первичного тока дуговой сталеплавильной печи / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Р.О. Барабаш, В.В. Анохин // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2016. Т.3. №4. С. 3–10.
19. Основные резервы повышения производительности электродуговой печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов, Е.В. Повелица, А.В. Ануфриев, Т.Е. Пелагеин, Т.Р. Храмшин // *Электротехнические системы и комплексы*. 2011. № 1. С. 89–95.
20. Бек Г.-П., Вольф А. Новая концепция питаемой от выпрямителя трехфазной дуговой электропечи с высокой динамикой регулирования // *Черные металлы*. 1998. № 2. С. 16–21.
21. New Converter-Fed Power Source to Increase the Dynamic Performance of the Three-Phase Electric Arc Furnace / A. Wolf, M. Thamodharan. *ETEP Vol. 10, No. 6, November/December 2000*, pp. 347–352.
22. Тельный С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной // *Электричество*. 1954. №12. С. 38–42.
23. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, И.А. Якимов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013. № 1 (41). С. 76–82.
24. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Якимов И.А. Регулирование напряжения мощных дуговых сталеплавильных печей // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. трудов VII междунар. науч. конф. молодых ученых*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. техн. ун-та, 2015. С. 66–69.

Поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### SUBSTANTIATION OF THYRISTOR REGULATION OF VOLTAGE OF ARC FURNACE TRANSFORMER

Ivan A. Yakimov

Senior Lecturer, Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University)

The power circuit of the connection of the transformer windings of a 180 t electric arc furnace (EAF-180) of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (OJSC "MMK") is considered. It is shown that the main transformer is a three-winding machine capable of regulating the voltage under load in the tertiary winding. The brief characteristic of the control system of the electro-technological regime ArCOS is given. The system acts on the hydraulic system to adjust the position of the electrodes and switch the stages of the voltage-controlled load-transfer devices (OLTP) of the transformer and the reactor. It is shown that the deterioration in the quality of control and the decrease in the reliability of the chipboard are associated with the low system speed. Oscillograms of the arc current are shown when switching the voltage stages of the transformer confirming the presence of long pauses with each switching. This leads to loss of control over the melting mode. The second drawback of the ArCOS system is low speed associated with the inertia of the hydraulic system of electrode movement. Oscillograms of transient processes are presented with different adjustment of the impedance controller, which confirmed this conclusion. As a promising direction, the development of power circuits for furnace transformers with non-contact voltage regulation was noted. The proposed power circuit of the transformer with thyristor voltage regulation in the tertiary winding is realized implementing the well-known concept of voltage control with high dynamics. The results of the studies performed by the

method of mathematical modeling are presented, which confirmed the feasibility of smooth regulation of voltage in the given range. The possibility of the proposed scheme for regulating the basic mode coordinates is determined at the established ratios of voltages and powers of the main and booster transformers. Directions for further improving the speed of the electrical control system are offered.

**Keywords:** Electric arc furnace, furnace transformer, power circuit, voltage regulation device, hydraulic electrode moving system, control, response speed, research, contactless regulation, thyristor voltage regulator, development, recommendations.

#### REFERENCES

1. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. Osnovnye sposoby regulirovaniya napryazheniya pechnogo transformatora [Main methods of regulating the voltage of the furnace transformer]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]. Magnitogorsk, MGTU, 2008, vol. 15, pp. 247–252. (In Russian)
2. Kempf P., Markvort E., Myulenbek I. Arc furnace 110 kV with load regulation in the intermediate circuit. *Ferrous metals* [Stahl and Eisen]. 1974, no. 9, pp. 27–28. (In Russian)
3. Nikolaev A.A., Jean-Jacques Rousseau, Vincent Szymanski, Tulupov P.G. Experimental study of electric arc currents harmonic composition for electric arc furnaces of various

- powers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 106–120. (In Russian)
4. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Yakimov I.A. Methods to increase the effectiveness of the electric arc furnaces by means of power electrical equipments. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Journal SUSU], 2009, no. 15, pp. 32–38. (In Russian)
  5. Nikolaev A.A. *Povysheniye effektivnosti raboty staticheskogo tiristornogo kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi. Kand. Diss.* [Increase of efficiency of operation of a static var compensator of a ultra-high power electric arc furnace. Ph.D. Diss.]. Magnitogorsk, 2009. (In Russian)
  6. Zhuravlev YU.P., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikolaev A.A., Agapitov Ye.B. Methods for controlling the electric mode of electric arc furnaces. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2006, no. 4, pp. 76–81. (In Russian)
  7. Karandayeva O.I. Characteristic of damages of network and block transformers of OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Journal SUSU], 2011, no. 34, pp. 15–20. (In Russian)
  8. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Karandaeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 273–279. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040896
  9. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Lednov R.A. Diagnostic functions of the system of continuous monitoring of technical condition of transformers of aggregates of arc steel furnaces. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 8, pp. 53–59. (In Russian)
  10. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Requirements for the monitoring system for the technical condition of the transformer of a super-power arc steel-smelting furnace. *Mashinostroyeniye: setevoj elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 58–68. (In Russian)
  11. Evdokimov S.A. Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya RPN transformatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi [Monitoring of the technical state of the RPN transformer of a super-power arc steel melting furnace]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Journal SUSU], 2014, no. 1, pp. 22–30. (In Russian)
  12. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. Diagnostic monitoring system for the technical condition of the transformer of an arc steel smelting furnace. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost* [ELEKTRO. Power engineering. Power industry], 2014, no. 4, pp. 27–33. (In Russian)
  13. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Yakimov I.A., Povelitsa E.V., Anufriev A.V. Design of the improved electric arc and ladle furnaces electrodes position automatic control system. *Elektrotehnika: setevoj elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, no. 1, pp. 48–58. (In Russian)
  14. Yakimov I.A., Nikolayev A.A., Kornilov G.P. Investigation of ultra-high power furnaces with thyristor voltage regulator in the intermediate circuit of the furnace transformer. *Elektrotehnika: setevoj elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, no. 1, pp. 41–57. (In Russian)
  15. Dzhensini, Dzh., Morello, L., Koassin, Dzh., Fradzhakomo, R. *Sposob regulirovaniya toka trekhfaznoy dugovoy elektropechi i ustanovka trekhfaznoy elektrodugovoy pechi pryamogo nagreva* [A method for regulating the current of a three-phase electric arc furnace and installing a three-phase electric arc furnace for direct heating]. Patent RF, no. 2086076, 1997.
  16. Thomas Lai Wai Ma, Mohammad Sedighu, Brian Kenneth Perkins, Theodorus Anthonius Gerritsen, Janos Rajda. Patent US 6603795, H05B 7/144, H05B 7/148. Power control system for arc electric arc furnace. Aug. 5, 2003.
  17. Manoharan Thamodharan, Albrecht Wolf. Patent US 6226313, H0513 7/144. Power source circuit and its control for three-phase electric arc furnace to reduce flicker. May 1, 2001.
  18. Yakimov I.A., Nikolaev A.A., Barabash R.O., Anohin V.V. Research of furnace transformer secondary voltage thyristor regulator working for electric arc furnace primary current stabilization. *Elektrotehnika: setevoj elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2016, no. 4, pp. 3–10. (In Russian)
  19. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A., Povelitsa Ye.V., Anufriyev A.V., Pelagein T.E., Ivanov V.A., Khramshin T.R. Main reserves of improving the productivity of an electric arc furnace as of the electrical complex. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы"* [Interuniversity Collection of Scientific Papers "Electrical Systems and Complexes"]. Magnitogorsk, MGTU, 2011, vol. 1, pp. 89–95.
  20. Bek G. –P., Volf A. A new concept of a three-phase rectifier supplied from an electric arc furnace with high dynamics control. *Chemyye metally* [Ferrous materials], 1998, no. 2, pp. 16–24.
  21. New Converter-Fed Power Source to Increase the Dynamic Performance of the Three-Phase Electric Arc Furnace / A. Wolf, M. Thamodharan. *ETEP*, vol. 10, no. 6, November/December 2000, pp. 347–352.
  22. Telnny S.I. About the theory of a three-phase arc furnace with a non-conducting bottom. *Elektrichestvo* [Electricity], 1954, no. 12, pp. 38–42. (In Russian)
  23. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu., Yakimov I.A. Details of modeling the electric arc furnace as a complex electrical. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 1, pp. 76–82.
  24. Kornilov G.P., Nikolayev A.A., Yakimov I.A. Regulation of voltage of ultra-high power electric arc furnaces. *Electrical engineering. Energetika: sb. nauch. trudov VII mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh* [Electrical engineering. Electrotechnology. Power engineering: Papers of VII International. Sci. Conf. Young scientists]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2015, pp. 66–69.

Якимов И.А. Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 41–48. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-41-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-41-48)

Yakimov I.A. Substantiation of Thyristor Regulation of Voltage of Arc Furnace Transformer. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 41–48. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-41-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-41-48)