

# Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 621.365.2:681.325

DOI: 10.14529/ctcr170413

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ПО КРИТЕРИЮ ПОСТОЯНСТВА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Г.П. Корнилов<sup>1</sup>, А.А. Николаев<sup>1</sup>, И.М. Ячиков<sup>1</sup>,  
А.С. Карандаев<sup>2</sup>, И.А. Якимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассматриваются вопросы повышения эффективности сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. Отмечены особенности эксплуатационных режимов печей рабочим объемом 180 т (ДСП-180), представлен график изменения потребляемой активной мощности. Приведена функциональная схема и рассмотрен принцип действия двухканальной системы управления электрическим режимом  $\text{ArCOS}$ . Отмечены недостатки, связанные с регулированием импеданса вторичного контура и низким быстродействием системы. Рассмотрены стадии технологического процесса и типовые диаграммы переключения регулируемых параметров. Отмечена перспективность разработки трехканальной системы управления электротехнологическим режимом ДСП с автоматическим регулированием напряжения трансформатора, индуктивного сопротивления реактора и импеданса вторичного контура. Поставлена задача реализации данного принципа на действующем силовом электрооборудовании с использованием алгоритмов системы  $\text{ArCOS}$ . На основе анализа графиков активной мощности определены индуктивные сопротивления реактора для конкретных значений тока дуги при фиксированном вторичном напряжении. Предложен алгоритм расчета оптимальных соотношений вторичного напряжения трансформатора и индуктивного сопротивления реактора. С его использованием определены номера ступеней трансформатора и реактора, которые обеспечивают поддержание фиксированных значений потребляемой активной мощности. Данные соотношения рекомендованы для использования при разработке оптимальных электрических режимов ДСП-180. В качестве перспективного направления определена разработка системы управления электротехнологическим режимом ДСП с бесконтактным регулированием вторичного напряжения трансформатора и индуктивного сопротивления реактора.

*Ключевые слова:* дуговая сталеплавильная печь, стадии плавления, электрический режим, управление, система, совершенствование, активная мощность, автоматическое регулирование, способ, техническая реализация, силовое оборудование, параметры, оптимальный режим, промышленное использование, рекомендации.

### Введение

Работа дуговой сталеплавильной печи сопровождается значительными колебаниями токов электрических дуг, активной и реактивной мощностей, потребляемых из сети. Это подтверждают временные зависимости активной мощности, потребляемой ДСП-180 электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат (ОАО «ММК»)), представленные на рис. 1. В технологическом процессе плавки выделено шесть рабочих режимов: зажигание дуги, проплавление колодцев, окончание плавления колодцев, основной период плавки, доплавление шихты, горение дуг под слоем шлака при жидком металле.

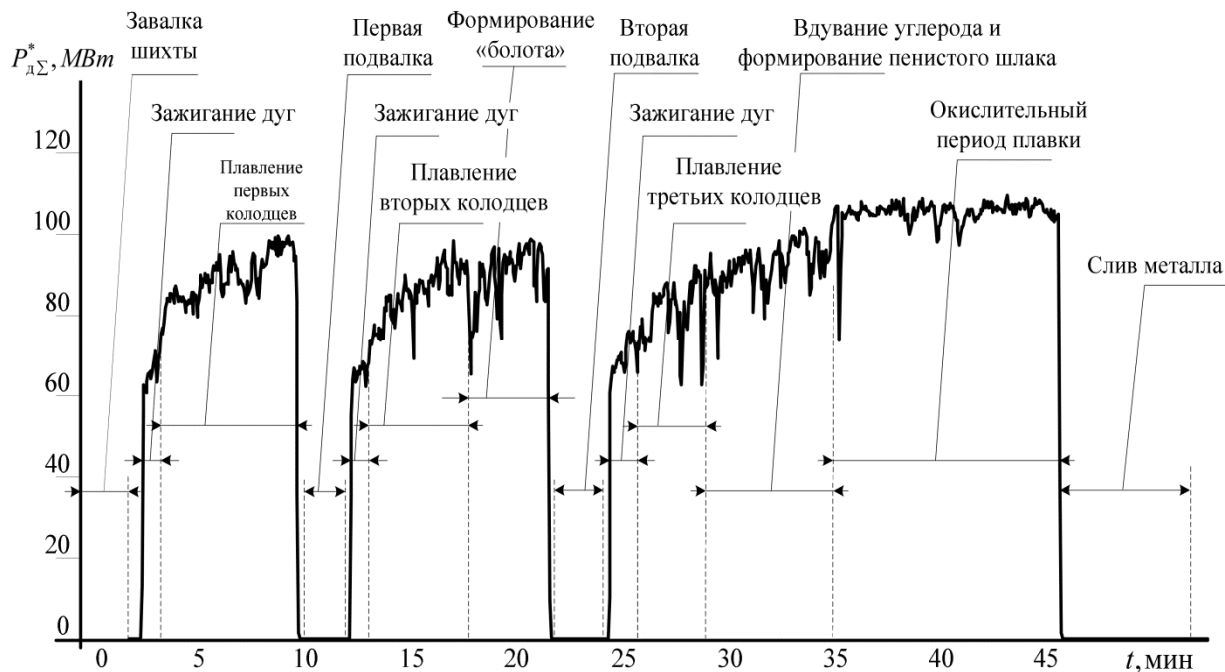


Рис. 1. Основные технологические стадии ДСП-180

Спецификой электрических режимов ДСП являются ударные нагрузки, возникающие во время плавления при подключении электродов практически на короткое замыкание, резкопеременные, неравномерные нагрузки по фазам вторичной обмотки трансформатора [1–4]. Это приводит к снижению качества электроэнергии в точке присоединения, создает проблемы компенсации реактивной мощности, увеличивает потребление энергии и установленную мощность регулируемых компенсирующих устройств [5]. Размах колебаний тока имеет различную величину в зависимости от стадии плавления металлической шихты. В начальный период, когда шихта находится в твердой фазе, амплитуда колебаний тока имеет наибольшее значение. По мере ее расплавления и перехода в жидкую фазу амплитуда колебаний тока уменьшается, что вызвано снижением вероятности обвалов лома и эксплуатационных коротких замыканий.

Применяемые системы управления электротехнологическим режимом ДСП не обеспечивают поддержания заданных значений активной мощности дуг. Так, в двухуровневой системе ArCOS управления электрическим режимом ДСП-180 предусмотрено регулирование одной из трех координат: импеданса вторичного контура, активного сопротивления дуги или напряжения дуги. Выбор регулируемого параметра выполняется путем переключений в системе управления. Предполагается, что таким образом осуществляется косвенное регулирование мощности в зависимости от технологических условий плавления. При этом предпочтение отдается системе регулирования импеданса (суммарного сопротивления короткой сети, электродов, активного сопротивления расплава и электрической дуги).

В публикациях [6, 7] показано, что данная система не обеспечивает быстрого действия, необходимого для компенсации динамических изменений токов дуг. С позиций поддержания устойчивости процесса плавления и качества металла наиболее эффективным является режим постоянства активной мощности дуги, потребляемой на каждой стадии плавки.

### Постановка задачи

На рис. 2 представлена упрощенная схема электроснабжения ДСП-180 ЭСПЦ. Подключение печи выполнено по схеме глубокого ввода от воздушно-кабельной линии напряжением 220 кВ с помощью сетевого трансформатора (СТ). Печной трансформатор (ПТ) номинальной мощностью 150 МВА состоит из главного трансформатора (ГТ) номинальной мощностью 120 МВА, вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) номинальной мощностью 30 МВА и реактора (Р).

Трансформатор и реактор снабжены индивидуальными устройствами переключения числа витков под нагрузкой (РПН). Регулирование напряжения и индуктивности реактора в современных

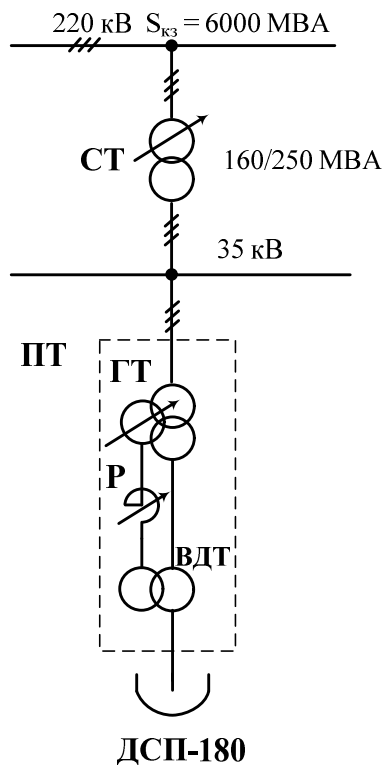


Рис. 2. Однолинейная силовая схема электроснабжения ДСП-180

дуг. Здесь же по мгновенным значениям фазных токов и напряжений рассчитывается фактическое полное сопротивление  $Z_{факт}$ , которое сравнивается с заданным значением. Ошибка устраняется с помощью пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора импеданса, выход которого через задатчик интенсивности (ЗИ) соединен с двухкаскадным сервоклапаном, осуществляющим регулирование расхода рабочей жидкости в гидроцилиндрах приводов перемещения электродов.

конструкциях ПТ осуществляется в третичной обмотке, это компромиссный вариант между высоковольтной первичной и сильноточной вторичной обмотками. Поэтому напряжение в третичной обмотке меньше первичного, а ток – меньше вторичного.

На рис. 3 представлена функциональная схема системы ArCOS [8]. Автоматическое регулирование осуществляется перемещением электродов гидравлическими устройствами (первый канал) и за счет переключения отпаяк трансформатора и реактора устройствами РПН (второй канал). Соответственно исполнительными органами, помимо гидропривода перемещения электродов, являются печной трансформатор и реактор. В системе ArCOS, как и большинстве известных систем, более быстродействующим является первый канал, переключение отпаяк осуществляется в промежутках между стадиями плавки.

Система ArCOS не обеспечивает доступа к информации и, по существу, представляет собой «черный ящик». Блок задания уставок, являющийся ее основным управляющим устройством, имеет закрытую структуру, алгоритм работы которого нигде не прописан.

Исходными параметрами системы первого уровня являются номера: ступени трансформатора  $n_{тр}$ , ступени реактора  $n_r$  и рабочей кривой  $n_{рк}$ . В соответствии со значениями этих параметров формируется сигнал задания на рабочий импеданс вторичного контура ДСП  $Z_{зад}$  или задания на активные сопротивления

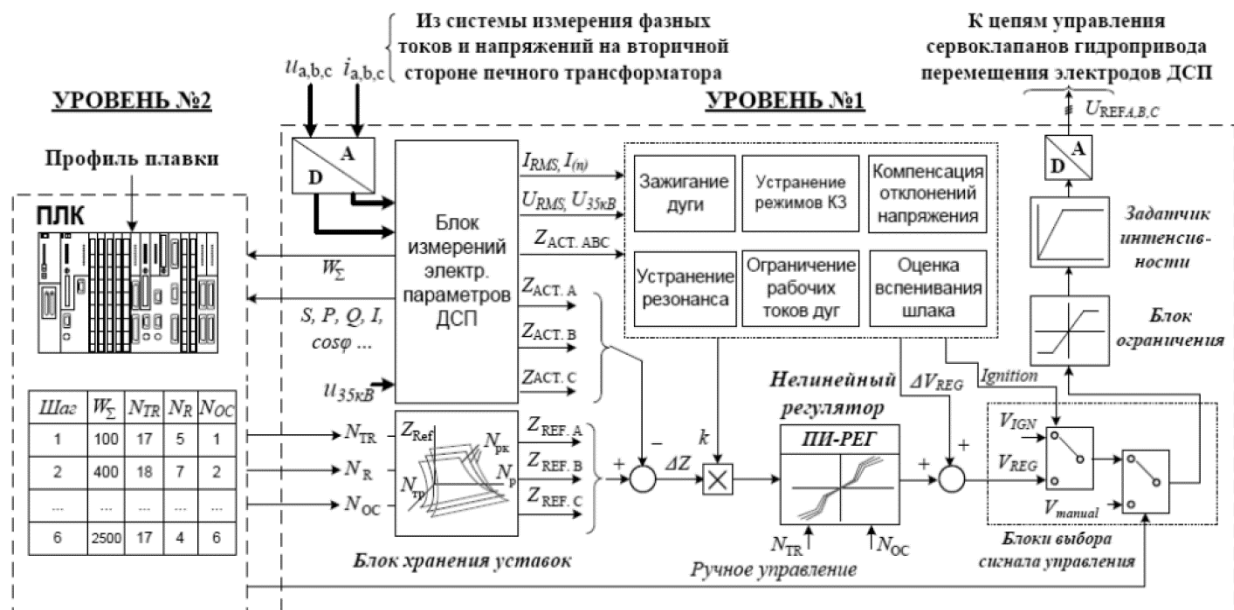


Рис. 3. Упрощенная функциональная схема системы управления электрическим режимом ArCOS

В системе первого уровня заложено 23 ступени регулирования напряжения, 20 ступеней регулирования сопротивления реактора и 6 рабочих кривых. Под термином «рабочая кривая» понимается величина тока дуги, заданная для каждой ступени трансформатора и реактора. На втором уровне происходит идентификация стадий плавки, а по ней – выбор рабочей кривой, ступеней трансформатора и реактора, которые формируют задание для системы нижнего уровня. Управляющая программа составлена на основе экспериментального опыта и предварительно записана в память контроллера Simatic S7-400. Входными сигналами являются номер профиля плавки, задаваемый оператором в зависимости от состава шихты, и количество электроэнергии, введенной в печь от начала плавки.

Анализ работы двух ДСП-180 ЭСПЦ показывает, что представленная система управления электротехнологическим режимом, по своему принципу, не может обеспечить оптимальный энергетический режим плавления и соответственно качественное протекание технологического процесса [9]. Высокие значения дисперсии и среднеквадратического отклонения токов дуг приводят к увеличению потребления энергии и времени плавки, что снижает производительность печи. Известно, что с точки зрения качества технологического процесса целесообразно поддерживать постоянство активной мощности в дуге на каждой стадии плавки. Наряду с улучшением параметров технологического процесса постоянство активной мощности, потребляемой печью, способствует улучшению электромагнитной совместимости ДСП с сетью и повышению эффективности работы регулируемых компенсирующих устройств.

Для решения данной задачи целесообразна разработка способа и системы управления электротехнологическим режимом ДСП, которые обеспечили бы реализацию данного принципа. Наиболее эффективной представляется трехканальная система с автоматическим регулированием напряжения трансформатора, индуктивного сопротивления реактора и импеданса вторичного контура. Вместе с тем проведенные исследования показали, что реализация принципа возможна на действующем оборудовании с использованием алгоритмов системы ArCOS. Это обеспечивается путем выбора оптимальных соотношений вторичного напряжения трансформатора и индуктивного сопротивления (числа витков) реактора, осуществляемого автоматическим переключением ступеней устройств РПН.

Ниже представлены результаты, полученные при решении поставленной задачи. Первоначально дается анализ электротехнологического режима ДСП-180, который позволяет определить оптимальные напряжения трансформатора и индуктивности реактора для каждой стадии технологического процесса.

## Основная часть

### *Анализ технологического режима ДСП-180*

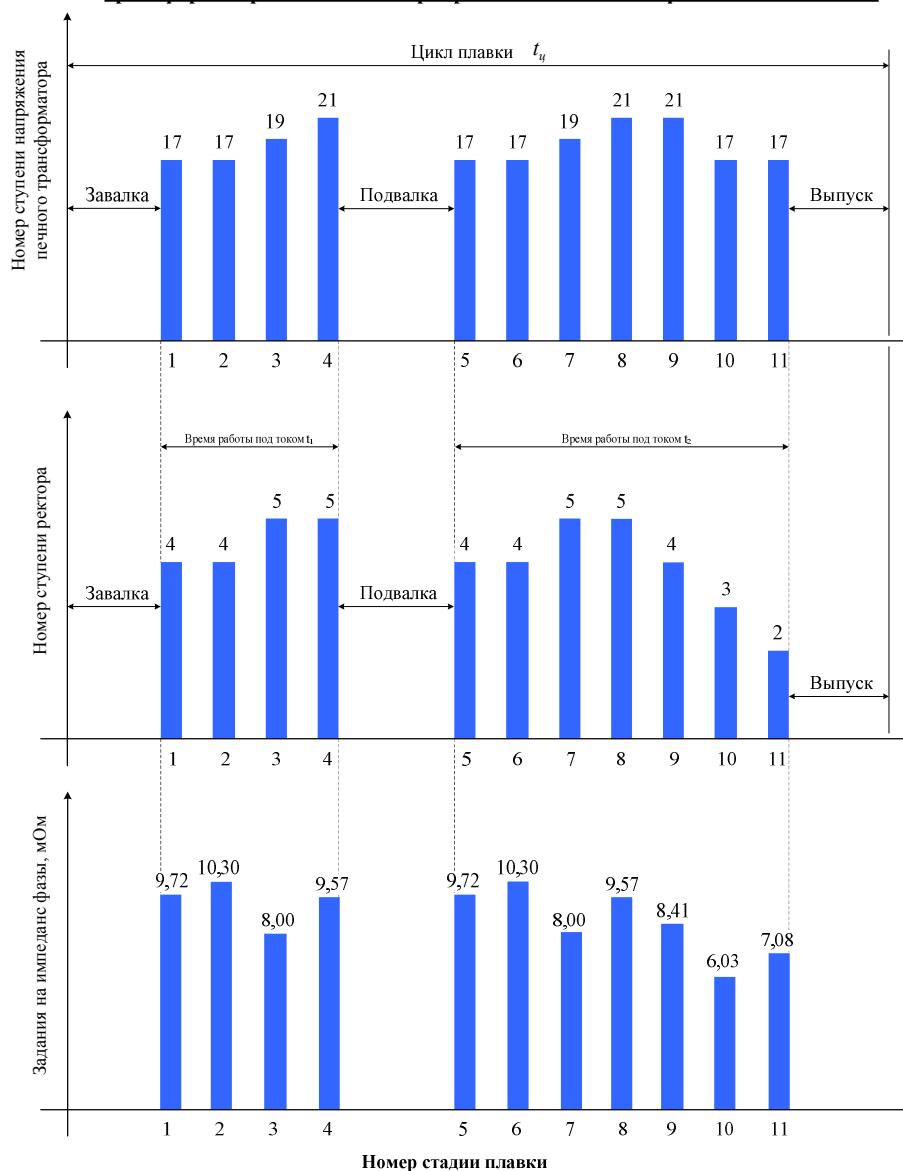
На рис. 4 представлены диаграммы изменения номера ступени печного трансформатора, ступени реактора и задания на импеданс вторичной цепи на каждой стадии за цикл плавки. Плавка осуществляется в две корзины:

1. Завалка металлического лома.
2. Подвалка лома.

Корзине № 1 соответствует время работы под током  $t_1$ , корзине № 2 – время работы под током  $t_2$ . На первой корзине осуществляют проплавление металлического лома (160 т) и доведение его до состояния жидкой фазы. После этого печь отключается и производится подвалка скрапового материала (50 т). В течение второй корзины производится доплавление шихты и нагрев до заданной температуры (1600 °С). Первая корзина включает в себя 4 стадии, вторая – 7.

Анализ рис. 4 показывает, что в процессе плавки используются три ступени напряжения трансформатора 17, 19, 21 и четыре ступени реактора 2, 3, 4, 5. Соответствующие им значения напряжений и индуктивных сопротивлений приведены в табл. 1. Индуктивные сопротивления реактора, указанные в табл. 1, приведены к первичному напряжению трансформатора. На рис. 3 и в табл. 1 также указаны величины заданий на вход регулятора импеданса для каждой стадии.

**Типовые диаграммы изменения номера ступени реактора, напряжения трансформатора и задание гидропривода на импеданс фазы за цикл плавки**



**Рис. 4. Изменения ступеней печного трансформатора, реактора и задания на импеданс за цикл плавки**

Таблица 1

**Параметры управления электрическим режимом ДСП-180**

Параметр	Корзина № 1				Корзина № 2						
	Номер стадии				Номер стадии						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$n_{тр}$	17	17	19	21	17	17	19	21	21	17	17
$U_2, В$	1236	1236	1291	1345	1236	1236	1291	1345	1345	1236	1236
$U_{2ф}, В$	713,6	713,6	745,4	776,5	713,6	713,6	745,4	776,5	776,5	713,6	713,6
$n_p$	4	4	5	5	4	4	5	5	4	3	2
$X_p, МОм$	2,8	2,8	3,2	3,2	2,8	2,8	3,2	3,2	2,8	2,3	1,4
$Z_{зад}, МОм$	9,72	10,3	8,00	9,57	9,72	10,3	8,00	9,57	8,41	6,03	7,08

На рис. 5 представлены рабочие характеристики ДСП-180 для 7 различных ступеней трансформатора из интервала № 10–№ 21 и 6 рабочих кривых (№ 1–№ 6). При этом ступень реактора

принята постоянной (№ 16). Если разделить технологическую стадию плавки на шесть участков согласно рабочим режимам, показанным на рис. 1, то каждая рабочая кривая (выделены точками) отвечает за определенную стадию. Таким образом, на каждой ступени трансформатора может быть реализовано 6 рабочих режимов с различными уровнями токов и мощностей в зависимости от стадии плавки. Чем точнее рассчитана рабочая точка для каждого из режимов, тем эффективнее использование мощности, вводимой в печь.

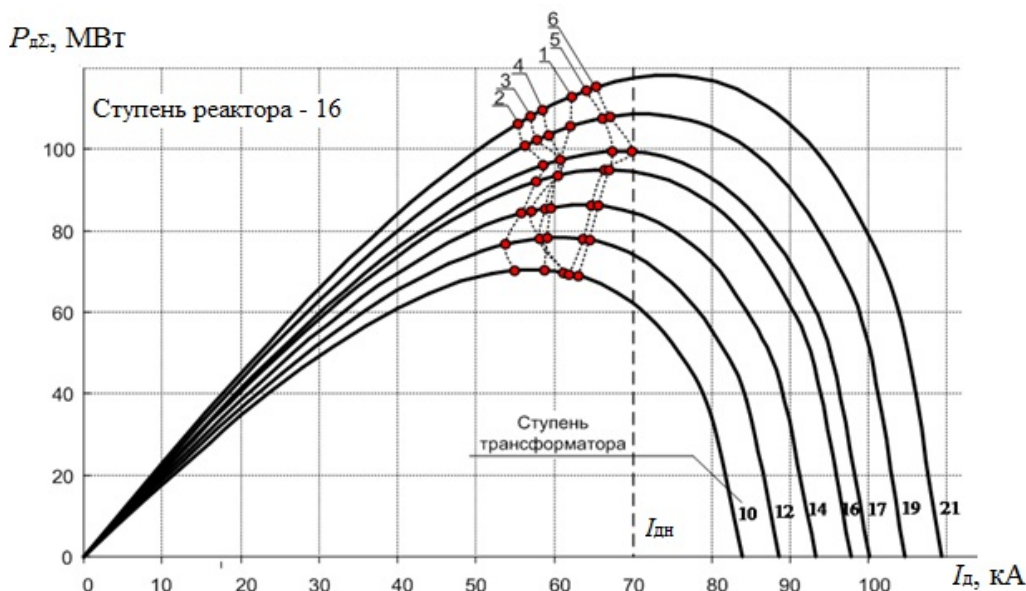


Рис. 5. Рабочие характеристики ДСП-180 на различных ступенях трансформатора

В рассмотренной выше системе управления электрическим режимом ДСП (см. рис. 3) динамика исполнительных устройств низкая. Это не позволяет использовать индуктивность реактора и вторичное напряжение трансформатора в качестве оперативных управляющих воздействий, поэтому они являются лишь настроечными параметрами. В пределах этих параметров оперативный контур регулирования положения электродов поддерживает оптимальный электрический режим печи. Однако в процессе расплавления шихты происходят случайные изменения длины дуги, соответственно изменяются условия горения, что особенно актуально для первых стадий плавки. В связи с этим происходит смещение рабочей точки на кривой мощности от заданного положения.

Показанные в табл. 1 значения импеданса фаз рассчитываются таким образом, чтобы при любом режиме плавания максимальный рабочий ток дуги не превышал номинального тока электродов (вторичного тока трансформатора). Вместе с тем видно, что реализованный алгоритм не обеспечивает постоянства потребляемой активной мощности, так как большинство рабочих точек на рис. 5 находятся левее экстремумов характеристик. Это приводит к снижению мощности дуг.

#### Обоснование оптимальных параметров трансформатора и реактора

В [10] доказана принципиальная возможность подбора оптимальных соотношений вторичного напряжения  $U_{2\phi}$  трансформатора (номера ступени  $n_{тр}$ , рис. 2) и индуктивного сопротивления  $X_p$  реактора (номера ступени  $n_p$ ), обеспечивающих поддержание постоянства активной мощности  $P_d$  в дуге на заданном уровне. С этой целью выполнены исследования на однофазной схеме замещения электрического контура ДСП, предложенной в [11].

На рис. 6 представлен трехмерный график (поверхность), характеризующий зависимость активной мощности от тока дуги и напряжения вторичной обмотки трансформатора. Он построен при фиксированном значении вторичного напряжения  $U_{1\phi} = 1000$  В и варьировании регулируемых параметров в пределах  $X_p = 0 - 2$  мОм,  $I_d = 0 - 80$  кА. Расчеты и построение диаграмм выполнены с помощью программы, разработанной в среде Excel.

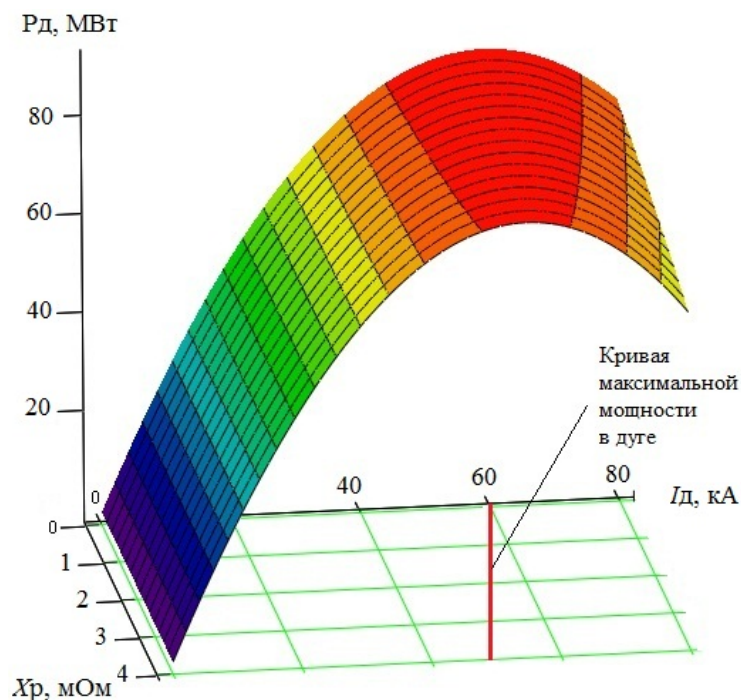


Рис. 6. Зависимость активной мощности от тока дуги и индуктивного сопротивления реактора

Поверхность имеет линию экстремумов, что поясняется электрическими характеристиками печи, представленными на рис. 7. С увеличением тока электрической КПД печи и ее коэффициент мощности (на рисунке не показаны) уменьшаются. Электрические потери  $P_{пот}$  возрастают пропорционально квадрату тока. Полная активная мощность  $P$  и мощность дуг  $P_d$  сначала увеличиваются, а затем, пройдя максимум, начинают уменьшаться. Поэтому увеличивать ток печи имеет смысл лишь до предела, соответствующего максимуму мощности дуг (в данном случае до 70 кА). При дальнейшем повышении тока электрические потери будут увеличиваться, а электрический КПД,  $\cos \varphi$  (на рисунке не показан) и мощность дуг будут уменьшаться.

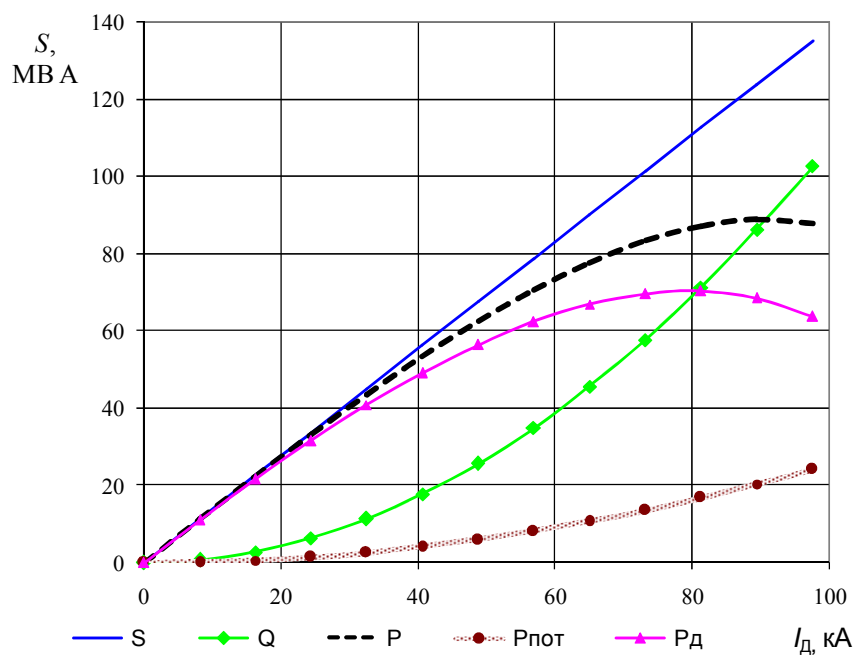


Рис. 7. Электрические характеристики ДСП

На рис. 8 приведены проекции максимальных значений активной мощности дуги на горизонтальную плоскость  $[I_d, X_p]$ . Каждая кривая представляет собой геометрическое место точек, характеризующих соотношение данных параметров при постоянстве потребляемой мощности и различных напряжениях первичной обмотки  $U_{1ф}$ . Кривые 1–3 построены при напряжениях 900, 1100 и 1300 В, обеспечиваемых на 5, 9 и 19-й ступенях устройства РПН трансформатора. Для того чтобы получить аналогичные зависимости при напряжениях, соответствующих другим ступеням РПН, необходимо повторить расчеты и построения, аналогичные представленным на рис. 6.

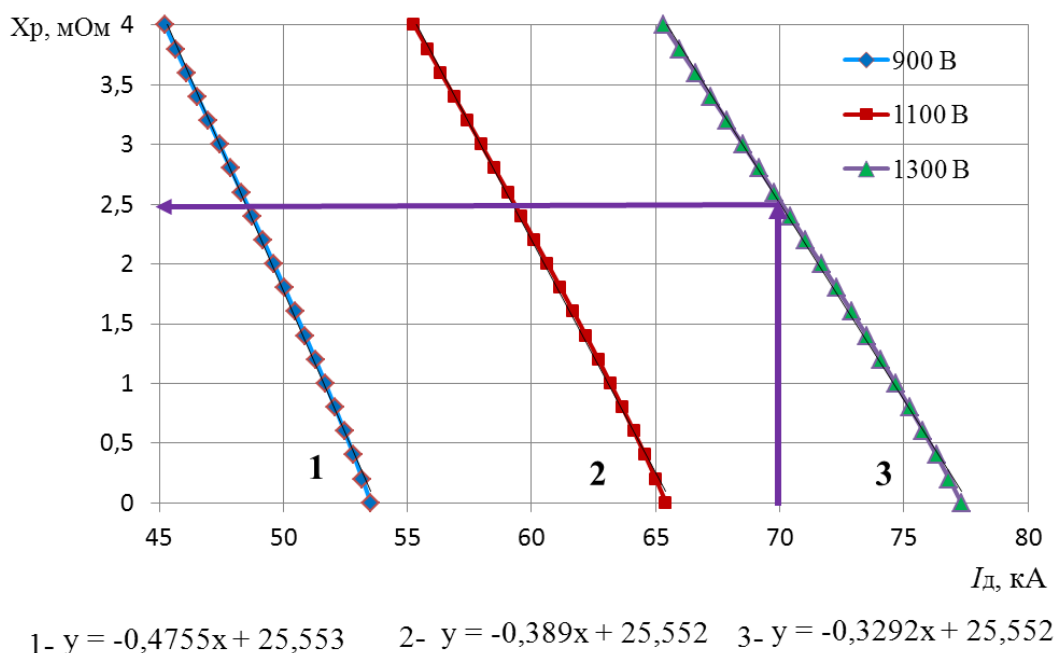


Рис. 8. Зависимости индуктивного сопротивления реактора от тока при максимальной мощности дуги и фиксированных напряжениях  $U_{1ф}$

В нижней части рис. 8 записаны выражения линейной аппроксимации данных графиков. Они позволяют определить оптимальные индуктивные сопротивления реактора для любого значения тока дуги при фиксированных вторичных напряжениях. Линиями со стрелками показаны графические пояснения к определению индуктивного сопротивления  $X_p$  при номинальном токе 70 кА и напряжении 1300 В, которому соответствует кривая 3.

Эмпирические зависимости, показанные на рис. 8, могут быть достаточно просто введены в алгоритм управления печью в контроллере Simatic S7-400. Семейство таких зависимостей в сочетании с соответствующими им значениями вторичных напряжений трансформатора позволит определить номера ступеней РПН трансформатора и реактора, которые обеспечат оптимальное управление электрическим режимом печи по критерию  $P_d = P_{max} = const$ . Изменения алгоритма управления, заложенного в «черный ящик» блока выбора уставок (см. рис. 3), не потребуются.

### Обобщение результатов

В табл. 2 представлены рекомендуемые сочетания номеров ступеней устройств РПН трансформатора и реактора, которые обеспечат поддержание заданных значений потребляемой активной мощности в диапазоне от 70 до 140 МВт. Расчетные величины  $U_{2расч}$ ,  $X_{p,расч}$  получены с помощью упомянутой выше программы, фактические значения  $U_{2факт}$ ,  $X_{p,факт}$  принимались по паспортным данным трансформатора. Процентные отклонения этих величин (погрешности) указаны в табл. 2.



Оптимальные соотношения вторичного напряжения трансформатора и индуктивности реактора

$P_A$ , МВт	№ ступени РПН трансформатора	$U_{2\text{факт}}$ , В	$I_2$ , А	$U_{2\text{расч}}$ , В	Погр., %	№ ступени РПН реактора	$X_{p.\text{факт}}$ , Ом	$X_{p.\text{расч}}$ , мОм	Погр., %
70	8	991	70 200	960	3,1	5	0,505	0,46	8,9
80	12	1100	70 200	1035	5,9	7	0,804	0,75	6,7
81	14	1155	70 200	1100	4,8	9	1,327	1,22	8,1
84,8	16	1209	70 200	1160	4,0	10	1,548	1,41	8,9
86,7	18	1264	68 600	1195	5,8	10	1,417	1,43	-0,9
86,7	20	1318	65 800	1230	6,7	12	1,623	1,64	-1,0
86,7	22	1373	63 200	1285	6,4	12	1,497	1,50	-0,2
86,7	23	1400	61 900	1325	5,3	16	2,004	1,95	2,6

Из табл. 2 следует, что отличия расчетных напряжений от их значений на выбранных отпайках трансформатора не превышают 6,7 %. Различия расчетных и реальных индуктивных сопротивлений реактора находятся в пределах от -1 до 8,9 %. Это подтверждает возможность реализации режимов, близких к оптимальным, практически во всем диапазоне регулирования активной мощности на существующем силовом оборудовании ДСП-180. Большие количества ступеней устройств РПН трансформатора (23 ед.) и реактора (20 ед.) обеспечат высокую точность соответствия реальных значений  $U_{2\text{факт}}$  и  $X_{p.\text{факт}}$  расчетным значениям  $U_{2\text{расч}}$ ,  $X_{p.\text{расч}}$ .

Указанные соотношения использованы при разработке оптимальных режимов ведения плавки и рекомендованы к внедрению на ДСП-180 в усовершенствованных алгоритмах управления электрическим режимом.

### Заключение

Представленный алгоритм расчета параметров трансформатора и реактора позволяет реализовать на действующем оборудовании предложенный принцип управления электротехнологическим режимом, обеспечивающий постоянство активной мощности дуги с погрешностью в пределах 7–9 %. Для его реализации целесообразна разработка системы управления электротехнологическим режимом ДСП с бесконтактным регулированием вторичного напряжения трансформатора и индуктивного сопротивления реактора. Разработки в данном направлении ведутся зарубежными фирмами, однако информация об их промышленном внедрении отсутствует. В отечественной практике в данном направлении проводятся совместные исследования Магнитогорским государственным техническим университетом им. Г.И. Носова, Южно-Уральским государственным университетом и ОАО «ММК» при непосредственном участии авторов представленной статьи.

Работа выполняется в рамках гранта МД-979.2017.8.

### Литература

1. 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 электрон. науч. журн.* – 2013. – № 2. – С. 58–68.
2. *Diagnostic Functions of a System for Continuous Monitoring of the Technical Condition of the Transformers of Arc Steelmaking Furnaces* / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khramshin, R.A. Lednov // *Metallurgist.* – 2014. – Vol. 58, no. 7–8. – P. 655–663. DOI: 10.1007/s11015-014-9972-5
3. Моделирование электромагнитных процессов в электродуговых печах постоянного тока / И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина, И.В. Портнова. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – 139 с.
4. *System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace* / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khramshin, A.A. Sarlybaev // *Metallurgist.* – 2015. – Vol. 58, no. 9–10. P. 872–879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z

5. Якимов, И.А. Исследование сверхмощных дуговых сталеплавильных печей с тиристорным регулятором напряжения в промежуточном контуре печного трансформатора / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Г.П. Корнилов // *Электротехника: сетевой электрон. науч. журн.* – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 41–47.

6. Якимов, И.А. Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи / И.А. Якимов // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2017. – № 2. – С. 41–48.

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.* – 2012. – № 20. – С. 309–315.

8. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов и др. // *Электротехника: сетевой электрон. науч. журн.* – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 48–58.

9. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмынин и др. // *Известия вузов. Электромеханика.* – 2009. – № 1. – С. 55–59.

10. Yakimov, I.A. *Methods of Improvement of Dynamic Properties of Electric Arc Furnaces* / I.A. Yakimov, A.A. Radionov, O.S. Malahov // *Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus).* – 2017. – P. 1081–1084. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910743

11. *Электрические промышленные печи* / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.

**Корнилов Геннадий Петрович**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn\_mgn@mail.ru.

**Николаев Александр Аркадьевич**, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; alexniko@inbox.ru.

**Ячиков Игорь Михайлович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; jachikov@mail.ru.

**Карандаев Александр Сергеевич** – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник НИС кафедры мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; karandaevas@susu.ru.

**Якимов Иван Александрович**, соискатель кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; yakimov\_ivan@mail.ru.

*Поступила в редакцию 2 июня 2017 г.*

**AUTOMATIC CONTROL OF ARC STEEL-MAKING FURNACE POWER MODE BASED ON ACTIVE POWER UNIFORMITY**

**G.P. Kornilov**<sup>1</sup>, *korn\_mgn@mail.ru*,  
**A.A. Nikolaev**<sup>1</sup>, *alexniko@inbox.ru*,  
**I.M. Yachikov**<sup>1</sup>, *jachikov@mail.ru*,  
**A.S. Karandaev**<sup>2</sup>, *karandaevas@susu.ru*,  
**I.A. Yakimov**<sup>1</sup>, *yakimov\_ivan@mail.ru*

<sup>1</sup> *Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation*,

<sup>2</sup> *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The paper considers the issues of improving performance of ultra-high power arc steel-making furnaces. It highlights special aspects of 180 t furnace (DSP-180) operation modes and provides a curve of varying active power consumption. It offers a flowchart and operation principle of the ArCOS two-channel power mode control system as well. Its drawbacks mentioned in this paper include the need for regulation of the secondary circuit impedance and a slow system response. Process stages and standard diagrams of controlled parameter changeover are under consideration. A three-channel system may efficiently regulate the process power mode of arch steel-making furnace with automated control of transformer voltage, reactor inductance and secondary circuit impedance. The authors set a challenge to implement this principle at operated electric equipment with the aid of the ArCOS algorithms. Analysis of active power curves helped determining reactor inductances for a certain arch current values at the specified secondary voltage. The authors also propose the formula to calculate the best ratios of transformer secondary voltage and reactor inductance. It enabled determining numbers of transformer and reactor stages that maintain the specified active power consumption. These ratios are recommended for development of the best DSP-180's power modes. Development of power mode control of arc steel-making furnaces with non-contact regulation of transformer voltage and reactor inductance is a promising trend.

*Keywords: arc steel-making furnace, melting stages, power mode, control, system, improvement, active power, automated control, method, engineering implementation, power equipment, parameters, best mode, commercialization, recommendations.*

**References**

1. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. [Requirements to the Monitoring System of Ultrahigh Power Electric Arc Furnace Transformer Performance]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 58–68 Available at: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2013/2013-2-9.pdf> (in Russ.)
2. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V. R., Lednov R.A. Diagnostic Functions of a System for Continuous Monitoring of the Technical Condition of the Transformers of Arc Steelmaking Furnaces. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, no. 7–8, pp. 655–663. DOI: 10.1007/s11015-014-9972-5
3. Yachikov I.M., Karandaeva O.I., Larina T.P., Portnova I.V. *Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v elektrodugovykh pechakh postoyannogo toka* [Simulation of Electromagnetic Processes in DC Arc Furnaces]. Magnitogorsk, MSTU, 2005. 139 p.
4. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. *Metallurgist*, 2014, vol. 58, no. 9–10, pp. 872–879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z
5. 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]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 41–47. Available at: <http://electrical-engineering.ru/issues/2014/2014-1.pdf> (in Russ.)
6. Yakimov I.A. [The Substantiation of Thyristor Regulation of Voltage of Arc Furnace Transformer]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2017, no. 2, pp. 41–48. (in Russ.)

7. Kornilov G.P., Yakimov I.A., Nikolaev A.A., Anufriev A.V. [Analysis of Arc Steel-Making Furnace Control Aimed at Its Performance Improvement]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2012, no. 20, pp. 309–315. (in Russ.)

8. 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]. *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 48–58. Available at: <http://electrical-engineering.ru/issues/2014/2014-1.pdf> (in Russ.)

9. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Shemetov A.N., Yakimov I.A. [Performance Improvement of Ultra-Power Arc Steel-Making Furnace]. *Bulletin of the Higher Institutions. Electromechanics*, 2009, no. 1, pp. 55–59. (in Russ.)

10. Yakimov I.A., Radionov A.A., Malahov O.S. Methods of Improvement of Dynamic Properties of Electric Arc Furnaces. *Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus)*, 2017, pp. 1081–1084. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910743

11. Svenchansky A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. *Elektricheskie promyshlennye pechi* [Industrial Electric Furnaces]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 296 p.

*Received 2 June 2017*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Автоматическое управление электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи по критерию постоянства активной мощности / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.М. Ячиков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 122–133. DOI: 10.14529/cter170413

#### FOR CITATION

Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Yachikov I.M., Karandaev A.S., Yakimov I.A. Automatic Control of Arc Steel-Making Furnace Power Mode Based on Active Power Uniformity. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 122–133. (in Russ.) DOI: 10.14529/cter170413

---