

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.365.22+681.515.4

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ И УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ

Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Повелица Е.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены различные варианты построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь. Для каждой системы проведена оценка показателей качества регулирования, выделены преимущества и недостатки, определены условия эксплуатации на действующем производстве.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, система автоматического управления перемещением электродов, адаптивный регулятор импеданса, гидропривод перемещения электродов.

Введение

В настоящее время происходит постепенное замещение кислородно-конвертерного и мартеновского производств электросталеплавильным. Данный факт обуславливает появление на рынке различных производителей металлургического оборудования дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). Как правило, каждый производитель в комплекте с основным оборудованием поставляет систему автоматического управления перемещением электродов. При этом алгоритмы регулирования для каждой системы могут быть различны.

Наиболее широкую известность на российских металлургических предприятиях получили системы управления положением электродов ARCOS и HIREG, которые используются в электросталеплавильном цехе (ЭСПЦ) ОАО «ММК» (г. Магнитогорск, Россия) и ЭСПЦ ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция). В качестве их альтернативы можно выделить SIMETAL Simelt, MeltNet Ferrotron и E.M.P.E.R.E. Основные сведения о производителях и параметрах регулирования для данных систем приведены в **табл. 1**.

Также в некоторых старых аналоговых системах управления в качестве параметра регулирования использовался дифференциальный параметр $D = U_{2\phi} - aI_{ARC}$ [1], где $U_{2\phi}$ – фазное напряжение, I_{ARC} – ток дуги, a – коэффициент пропорциональности. Данный способ в настоящее время устарел и практически не применяется.

Таблица 1
Основные сведения о системах управления перемещением электродов ДСП и УКП, используемых на отечественных металлургических предприятиях

Система управления	Производитель	Параметр регулирования
HIREG	Danieli Automation, Италия	Адмитанс вторичного контура ДСП (УКП) $Y_{2\phi}$
ARCOS, ArCOS Light	Siemens VAI, Германия	Импеданс вторичного контура ДСП (УКП) $Z_{2\phi}$, на поздних стадиях плавки – активное сопротивление электрической дуги R_{ARC} ; в некоторых случаях – напряжение дуги U_{ARC}
SIMETAL Simelt		
DECTEQ™ MeltNet	Ferrotron, Германия	Импеданс вторичного контура ДСП (УКП) $Z_{2\phi}$
E.M.P.E.R.E	Amec Spie, Франция	Импеданс вторичного контура ДСП (УКП) $Z_{2\phi}$

Выбор алгоритма регулирования, адаптированного под конкретные производственные условия, является актуальной задачей, которая требует проведения комплексного анализа с целью выделения преимуществ и недостатков различных систем. В данной статье рассмотрены системы регулирования напряжения дуги U_{ARC} , сопротивления дуги R_{ARC} , тока дуги I_{ARC} , импеданса фазы $Z_{2\phi}$ и адмитанса фазы $Y_{2\phi}$ применительно к ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji».

1. Описание математической модели электрического контура ДСП-250 с гидроприводом перемещения электродов

В качестве объекта исследования выбрана самая мощная в мире дуговая сталеплавильная печь ДСП-250, функционирующая в ЭСПЦ ЗАО «ММК Metalurji» в г. Искендерун (Турция). Схема замещения электрического контура приведена на рис. 1.

Схема замещения электрического контура включает в себя: 1) активное сопротивление и индуктивность питающей сети 34,5 кВ R_S и L_S , сопротивление и индуктивность короткой сети R_{KC} и L_{KC} , а также приведённые к вторичной обмотке сопротивления и индуктивности печного трансформатора и реактора R_p, R_{mp}, L_p, L_{mp} . Электрическая дуга представляется нелинейным дифференциальным уравнением мгновенной проводимости – уравнением Касси [2]. Для повышения точности расчетов в схеме замещения также может быть учтена взаимная индукция между фазами короткой сети M .

В процессе исследования использованы фактические параметры электрического контура ДСП-250, соответствующие 10-й ступени печного трансформатора и 6 ступени реактора:

$$R'_{TP} = 0,029 \text{ мОм}, L'_{TP} = 0,00395 \text{ мГн},$$

$$R'_p = 0,00215 \text{ мОм}, L'_p = 0,00108 \text{ мГн},$$

$$R_{KC} = 0,27 \text{ мОм}, L_{KC} = 0,0135 \text{ мГн},$$

$$R'_S = 0,1 \text{ мОм}, L'_S = 0,0032 \text{ мГн}.$$

Состав структурной схемы трёхфазного электрического контура на примере сверхмощной ДСП подробно описан в [2]. Общий подход к построению структурной схемы и подробное исследование системы гидропривода перемещения электродов (рис. 2) ДСП-250 приведены в [3–5].

Структурная схема электрического контура (рис. 3) одной фазы основывается на дифференциальном уравнении Касси

$$\Theta_{ARC} \frac{dg_{ARC}(t)}{dt} = \left(\frac{U_{ARC}^2(t)}{E_{ARC}^2} - 1 \right) g_{ARC}(t), \quad (1)$$

где Θ_{ARC} – тепловая постоянная времени дуги, которая изменяется в течение плавки в пределах 0,2–5 мс; $g_{ARC}(t)$ – проводимость дуги; $U_{ARC}(t)$ – напряжение дуги; $E_{ARC} = \alpha + \beta L_{ARC}$ – противоЭДС дуги, где $\alpha = 40$ В – падение напряжения на анодно-катодной области электрода, $\beta = 1$ В/мм – градиент напряжения столба дуги, L_{ARC} – длина дуги.

Также в модели электрической дуги учитывается начальная проводимость g_{ARC0} .

На основе ранее проведённых исследований была разработана общая структурная схема, включающая в себя как систему гидропривода перемещения электродов (с учётом нелинейных свойств сервоклапана), так и трёхфазный электрический контур ДСП-250 (рис. 4).

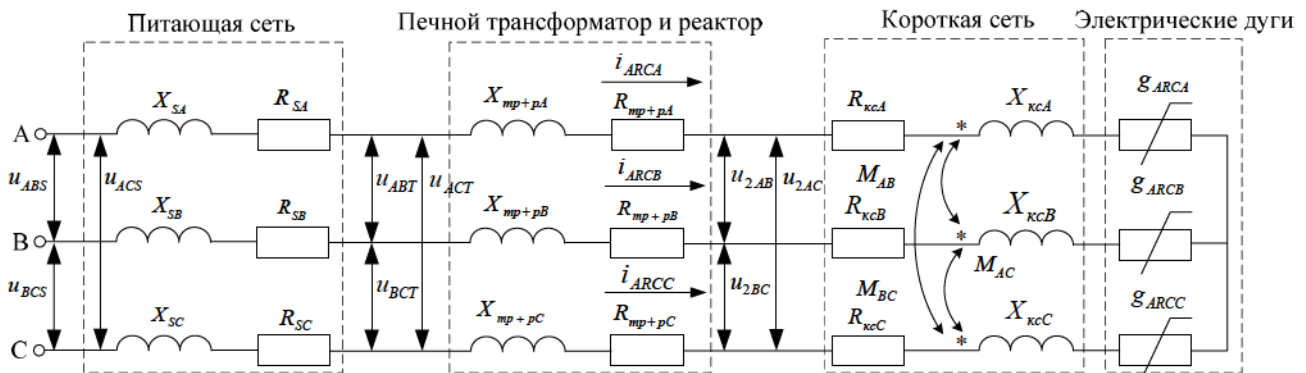


Рис. 1. Схема замещения трёхфазного электрического контура ДСП-250

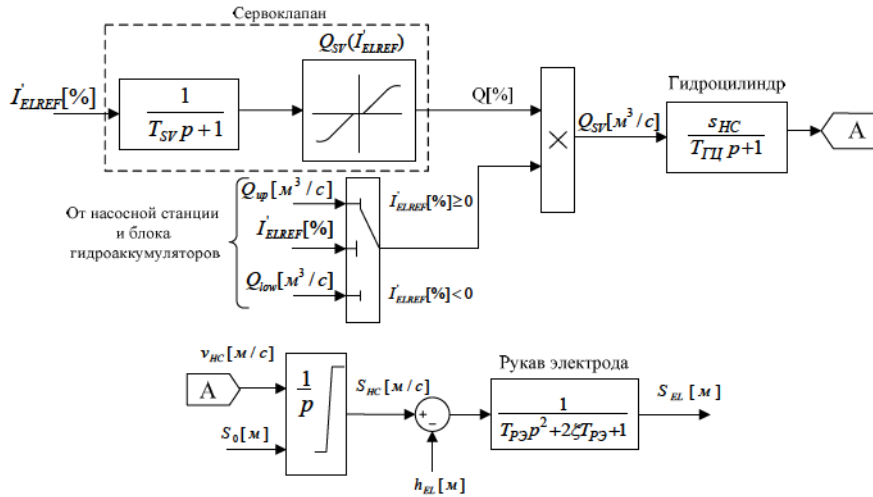


Рис. 2. Структурная схема гидропривода перемещения электрода одной фазы ДСП-250

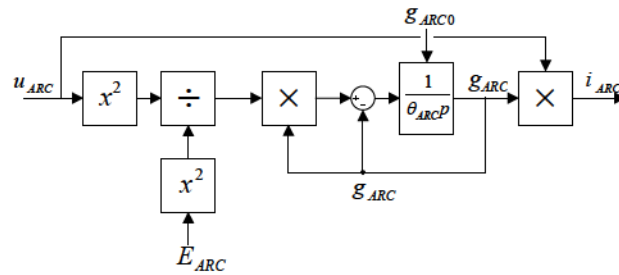


Рис. 3. Структурная схема одной фазы ДСП на основе уравнения Касси

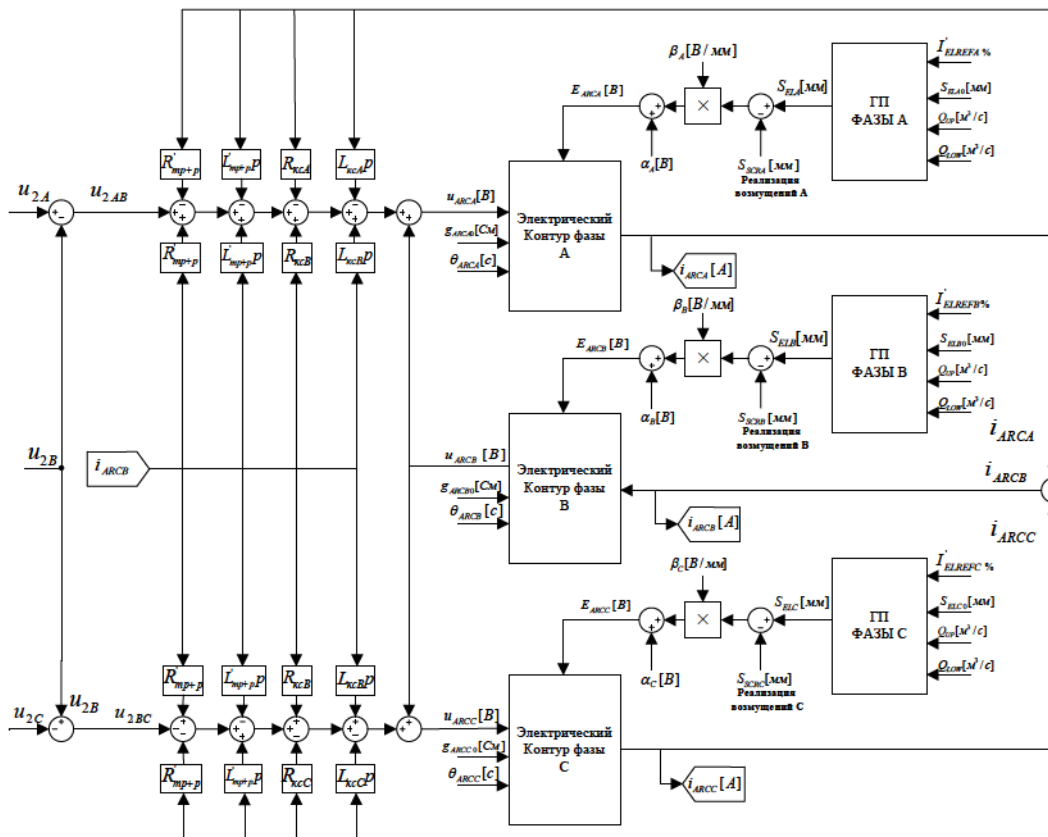


Рис. 4. Структурная схема электрического контура ДСП-250 с гидроприводом перемещения электродов

На основании данных регистрограмм токов и мощности дуги, приведённых в статье [6], можно судить о том, что разработанная структурная схема позволяет проводить качественную оценку процессов, происходящих в реальном объекте.

Данная структурная схема позволяет произвести математическое моделирование с целью получения статических характеристик объекта регулирования по каждому из пяти параметров: напряжение дуги U_{ARC} , сопротивление дуги R_{ARC} , ток дуги I_{ARC} , импеданс фазы $Z_{2\phi}$ и адмитанс фазы $Y_{2\phi}$. На основании этих характеристик можно получить параметры регуляторов.

2. Статические характеристики объекта регулирования при использовании различных типов обратных связей

Такие параметры, как адмитанс $Y_{2\phi}$, импеданс $Z_{2\phi}$, напряжение U_{ARC} и активное сопротивление дуги R_{ARC} невозможно измерить напрямую. В системе управления они могут быть вычислены косвенно, на основе прямых измерений фазных напряжений на вторичной обмотке печного трансформатора U_{2a} , U_{2b} , U_{2c} и токов дуги i_{ARCA} , i_{ARCB} , i_{ARCC} (измеряются с помощью поясов Роговского).

Запишем выражение для активной мощности фазы:

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{2\phi} i_{ARC} dt. \quad (2)$$

Мощность фазы включает в себя активные потери и мощность дуги:

$$P_2 = P_{ARC} + \Delta P_2 = I_{ARC}^2 R_{ARC} + I_{ARC}^2 R_{kc}. \quad (3)$$

Из выражения (3) выразим сопротивление дуги:

$$R_{ARC} = \frac{P_2 - I_{ARC}^2 R_{kc}}{I_{ARC}^2}. \quad (4)$$

Используя формулу (4), определим выражение для напряжения дуги:

$$U_{ARC} = I_{ARC} R_{ARC} = \frac{P_2 - I_{ARC}^2 R_{kc}}{I_{ARC}}. \quad (5)$$

Также приведём формулу для импеданса и адмитанса:

$$Z_{2\phi} = \frac{U_{2\phi}}{I_{ARC}} = \frac{1}{Y_{2\phi}}. \quad (6)$$

Отметим, что формулы (4) и (5) позволяют вычислить напряжение и сопротивление дуги с допустимой погрешностью при условии, что ток дуги и фазное напряжение близки к синусоидальным. Поэтому регулирование данных параметров возможно только на поздних стадиях плавки, когда тепловая постоянная времени дуги достаточно велика, а коэффициент искажения синусоидальности кривой тока дуги K_I (или в зарубежном обозначении – THD) относительно низкий:

$$K_I = \frac{\sqrt{I_{(0)}^2 + I_{вг}^2}}{I_{ARC(1)}}, \quad (7)$$

где $I_{(0)}$ – постоянная составляющая тока дуги; $I_{вг}$ – действующее значение высших гармоник тока дуги; $I_{ARC(1)}$ – действующее значение 1-й гармоники тока дуги.

На **рис. 5** представлен график изменения K_I в течение плавки для ДСП-180.

В статье [4] описан усовершенствованный адаптивный регулятор импеданса ДСП и АПК, структурная схема которого представлена на **рис. 6**.

Общая структура регулятора сохраняется вне зависимости от параметра регулирования. Изменениям подвергаются только линеаризующие характеристики, предназначенные для компенсации коэффициента усиления объекта, который определяется как первая производная от статической характеристики по длине дуги.

В процессе математического моделирования были получены статические характеристики для напряжения дуги, активного сопротивления дуги, тока дуги, импеданса и адмитанса фазы и характеристики коэффициента усиления объекта в каждом случае (**рис. 7**). Для удобства сравнения основные параметры данных характеристик сведены в **табл. 2**. На основании полученных статических характеристик были разработаны системы регулирования U_{ARC} , R_{ARC} , I_{ARC} , $Z_{2\phi}$, $Y_{2\phi}$. Для каждой из них получены графики переходных процессов, отражающие реакцию системы на управляющее воздействие и возмущающее воздействие в виде случайного изменения длины дуги $\Delta L_{ARCВОЗМ} = +100\text{мм}$ в фазе «А» (**рис. 8**).

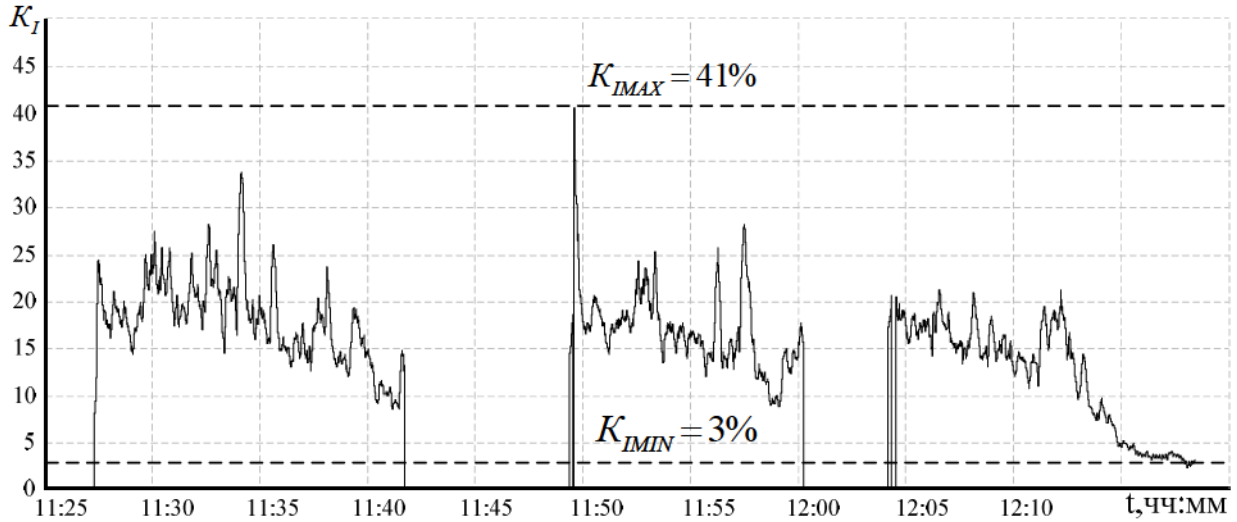


Рис. 5. График изменения $K_{ц}$ на различных стадиях плавки

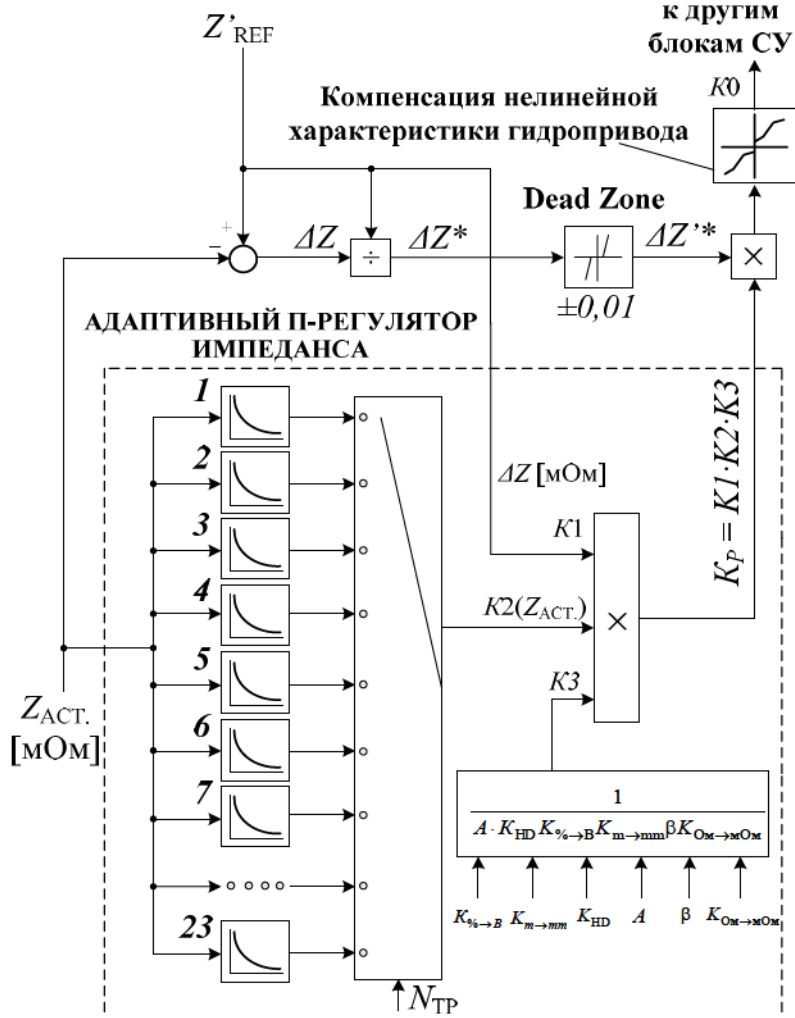


Рис. 6. Структура адаптивного регулятора импеданса АПК-1 ЭСПЦ ОАО ММК, реализованного в системе управления «РАДУГА ПК»

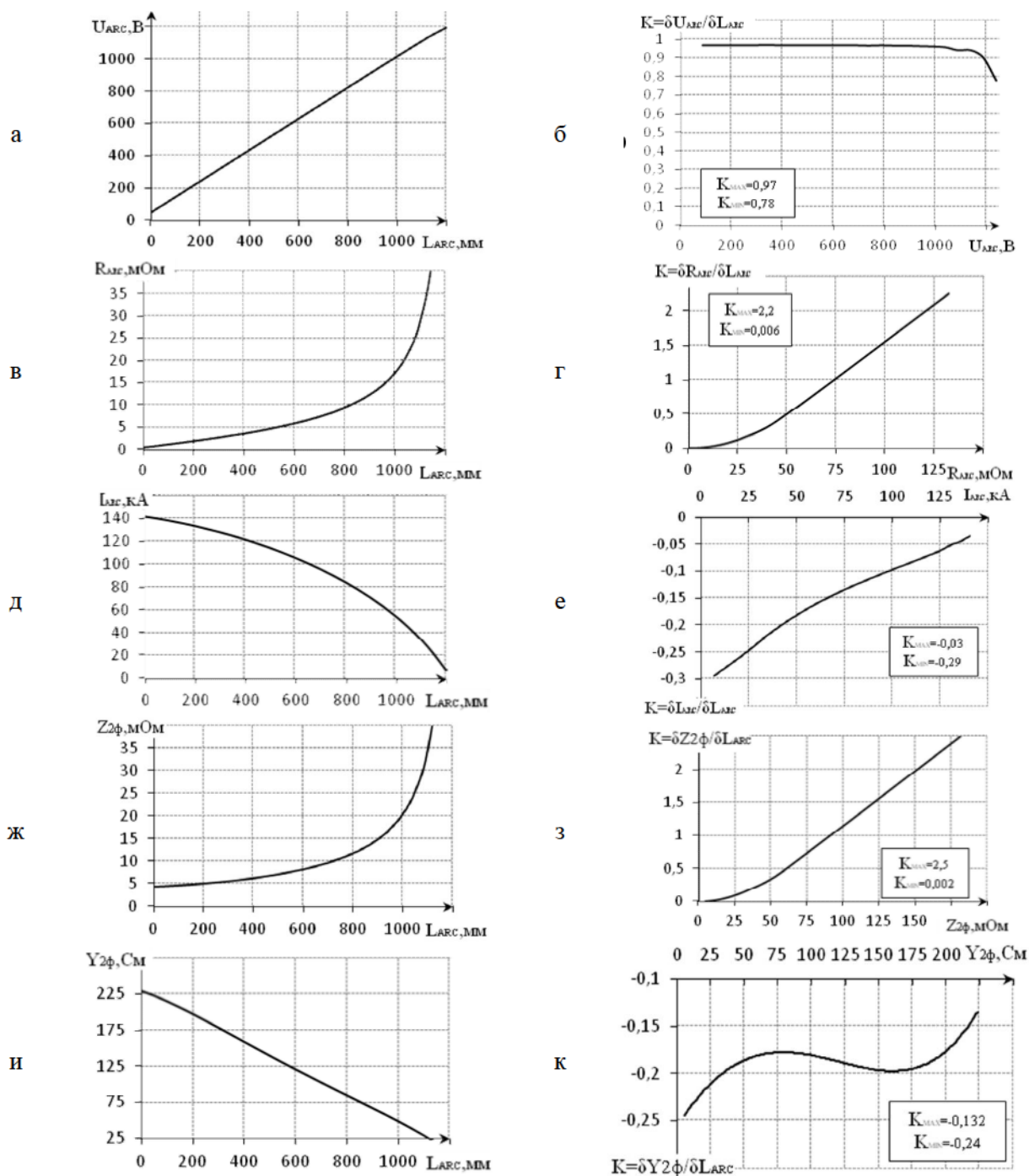


Рис. 7. Статические характеристики и характеристики коэффициента усиления объекта регулирования для различных параметров регулирования: U_{ARC} – а и б; R_{ARC} – в и г; I_{ARC} – д и е; $Z_{2\phi}$ – ж и з; $Y_{2\phi}$ – и и к

Таблица 2

Основные параметры статических характеристик объекта регулирования

Наименование параметра	Регулируемая координата				
	U_{ARC}	R_{ARC}	I_{ARC}	$Z_{2\phi}$	$Y_{2\phi}$
Тепловая постоянная времени дуги Θ_{ARC}	3,5 мс	3,5 мс	3,5 мс	1,5 мс	1,5 мс
Значение параметра при критической L_{ARC}	1240 В	134 мОм	6,8 кА	4,3 мОм	5,4 См
Значение параметра при КЗ	40 В	0,34 мОм	143 кА	183 мОм	230 См
Максимальный коэффициент усиления ОП	0,97 В/мм	2,2 мОм/мм	-0,03 кА/мм	2,5 мОм/мм	-0,132 См/мм
Минимальный коэффициент усиления ОП	0,78 В/мм	0,006 мОм/мм	-0,29 кА/мм	0,002 мОм/мм	-0,243 См/мм

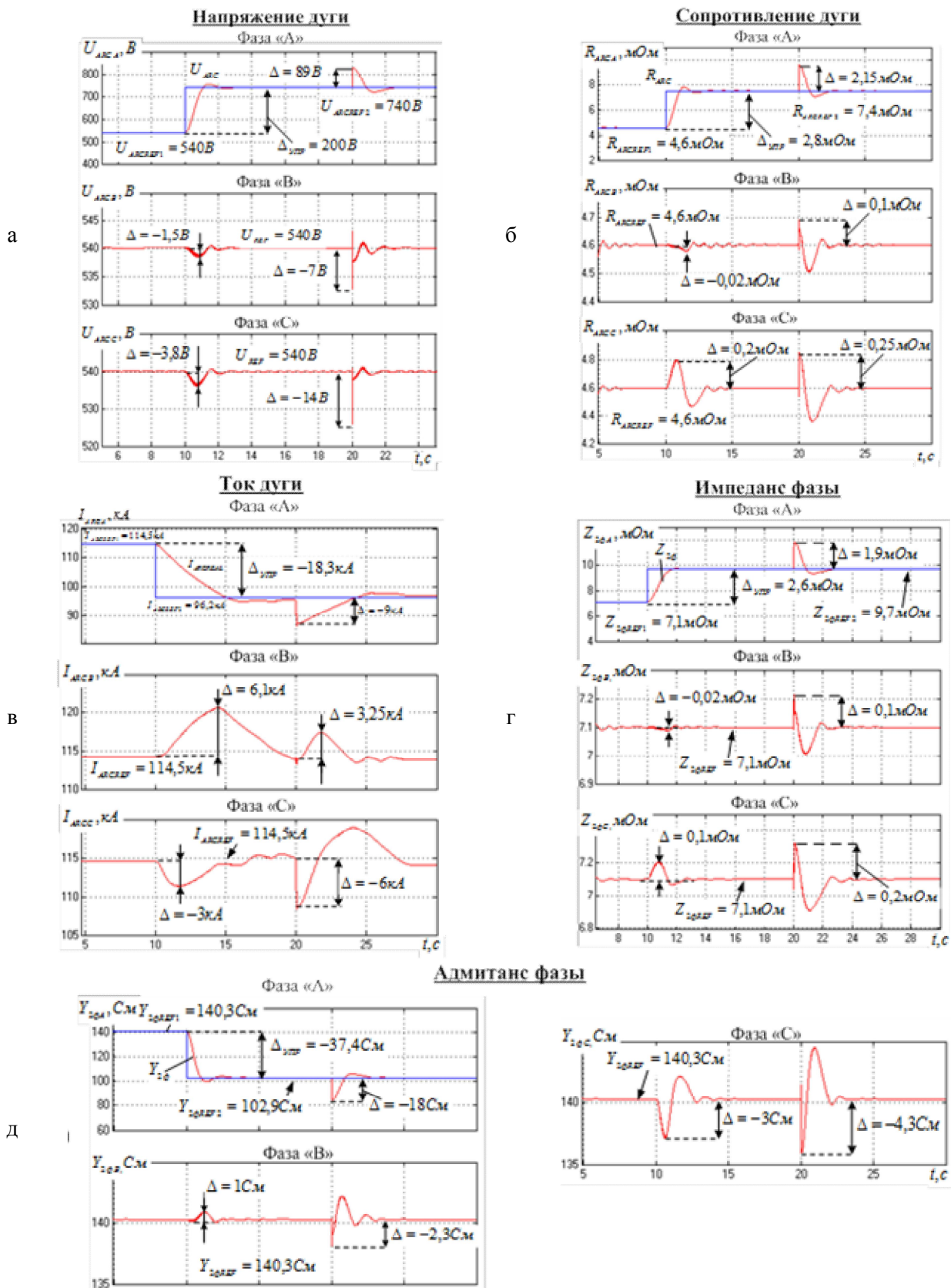


Рис. 8. Реакция систем регулирования U_{ARC} , R_{ARC} , I_{ARC} , $Z_{2\phi}$, $Y_{2\phi}$ на возмущающее и управляющее воздействие

В табл. 2 приведены основные показатели качества регулирования для каждой системы. Оценка влияния одной фазы на другую производится на основании двух коэффициентов взаимного влияния фаз:

$$K_{ВЗУПР} = \frac{\Delta L_{ARCУСТ В,С}}{\Delta L_{ARCУСТ А}}; \tag{9}$$

$$K_{ВЗВОЗМ} = \frac{\Delta L_{ARCМАХ В,С}}{\Delta L_{ARCМАХ А}},$$

где $K_{ВЗУПР}$ – коэффициент, характеризующий влияние изменения установившегося значения длины дуги фазы «А» на изменение установившегося значения длин дуг фаз «В» и «С»; $K_{ВЗВОЗМ}$ – коэффициент, отражающий степень влияния мгновенного изменения длины дуги фазы «А» на максимальную величину отклонения длины дуги фаз «В» и «С» от установившегося значения.

Помимо этого, производилась оценка времени нарастания $t_{нар}$, времени достижения 2% зоны от координаты задания $t_{рег}$, а также максимальное отклонение от установившегося значения как по управляющему, так и по возмущающему воздействию Δ . Результаты приведены в табл. 3.

Исходя из данных, приведённых в табл. 3, можно сделать вывод, что наилучшими показателями качества обладает система регулирования напряжения дуги. Необходимо отметить, что на практике данный способ используется редко. Переход к регулированию напряжения и активного сопротивления дуги обусловлен необходимостью поддержания постоянной длины дуги (чего труднее добиться в случае регулирования адмитанса и импеданса). Как активное сопротивление, так и напряжение дуги возможно вычислить достаточно точно только на поздних стадиях плавки, когда коэффициент искажения тока K_I мал, а тепловая постоянная времени дуги Θ_{ARC} достаточно велика. Однако практически на всем диапазоне длин дуг коэффициент усиления характеристики $R_{ARC}=f(L_{ARC})$ значительно меньше, чем у характеристики $U_{ARC}=f(L_{ARC})$. Это означает, что одна и та же погрешность вычисления δ , пропорциональная K_I , в случае регулирования U_{ARC} приведёт к большей погрешности определения L_{ARC} , чем в случае регулирования R_{ARC} . Поэтому на практике для поддержания постоянной длины дуги чаще обращаются к регулированию R_{ARC} , несмотря на несколько худшие показатели качества регулирования.

Таблица 3

Показатели качества систем регулирования U_{ARC} , I_{ARC} , $Z_{2ф}$, $Y_{2ф}$

	Фаза	Параметр	U_{ARC}	R_{ARC}	I_{ARC}	$Z_{2ф}$	$Y_{2ф}$
Управляющее воздействие	А	$\Delta_{упр}$	+200 В	+2,8 мОм	-18,3 кА	+2,6 мОм	-37,4 См
		$t_{нар}$	1с	1с	5с	1,75с	1,75с
		$t_{рег}$	0,8 с	1,65 с	4,4 с	1,5 с	1,5 с
	В	Δ (δ)	-1,5 В (-0,28%)	-0,02 мОм (-0,43%)	6,1 кА (5,3%)	-0,02 мОм (-0,28%)	1 См (0,7%)
		$t_{нар}$	1,35 с	2 с	9 с	1,7 с	1,7 с
		$t_{рег}$	-	-	7 с	-	-
		$K_{ВЗУПР}$	0,018	0,026	0,98	0,016	0,016
	С	Δ (δ)	-3,8 В (-0,7%)	0,2 мОм (4,3%)	-3 кА (-2,62%)	0,1 мОм (1,4%)	-2,3 См (-1,64%)
		$t_{нар}$	1,4 с	1,4 с	4,4 с	1,4 с	1,25 с
		$t_{рег}$	-	2,5 с	3 с	-	-
		$K_{ВЗУПР}$	0,036	0,18	1,16	0,2	0,2
	Возмущающее воздействие $\Delta L_{ARC}=100$ мм	А	Δ (δ)	89 В (12%)	2,15 мОм (29%)	-9 кА (7,86%)	1,9 мОм (25,6%)
$t_{нар}$			0,85 с	0,8 с	4,1 с	0,8 с	0,8 с
$t_{рег}$			1,8 с	2 с	3,2 с	2 с	2,25 с
В		Δ (δ)	-7 В (-1,3%)	0,1 мОм (2,2%)	3,25 кА (2,8%)	0,1 мОм (1,35%)	-2,3 См (-1,6%)
		$t_{нар}$	0,5 с	1,5 с	3,5 с	1,6 с	1,6 с
		$t_{рег}$	-	-	2,4 с	-	-
		$K_{ВЗВОЗМ}$	0,018	0,05	0,3	0,05	0,05
С		Δ (δ)	-14 В (-2,6%)	0,25 мОм (5,4%)	-6 кА (-5,2%)	0,2 мОм (2,7%)	-4,3 См (-3%)
		$t_{нар}$	0,4 с	0,6 с	1,5 с	0,5 с	0,5 с
		$t_{рег}$	0,025 с	1,8 с	6 с	1,5 с	1,75 с
		$K_{ВЗВОЗМ}$	0,018	0,14	0,4	0,14	0,14

Системы регулирования $Z_{2\phi}$ и $Y_{2\phi}$ обладают практически эквивалентными показателями качества регулирования. Но следует отметить, что коэффициент усиления статической характеристики $Z_{2\phi}=f(L_{ARC})$ резко возрастает, начиная со значения $L_{ARC} \approx 800$ мм и $Z_{2\phi} \approx 12$ МОм, в то время как коэффициент усиления характеристики $Y_{2\phi}=f(L_{ARC})$ остаётся близок к постоянному значению на всём диапазоне L_{ARC} . Тем не менее это не создаёт существенного преимущества или недостатка для той или иной системы, поскольку участок резкого возрастания коэффициента усиления характеристики $Z_{2\phi}=f(L_{ARC})$ чаще всего лежит за пределами используемого на практике диапазона регулирования.

Наихудшими показателями качества обладает система регулирования тока дуги. Токи фаз связаны выражением $i_{ARC A} + i_{ARC B} + i_{ARC C} = 0$. Это создает большие сложности для индивидуального регулирования, поскольку изменение тока одной фазы приводит к сильному изменению тока в двух других фазах (коэффициент взаимного влияния фаз близок к 1). Это приводит к неустойчивости системы, ограниченности диапазона регулирования и низкому быстродействию. Таким образом, ток дуги нежелательно применять в качестве параметра регулирования для трёхфазного электрического контура ДСП или УКП.

Выводы

1. В настоящее время существуют различные системы автоматического управления перемещением электродов ДСП и УКП. Отличительной особенностью этих систем является использование различных электрических параметров в качестве регулируемой переменной. Наиболее распространенным параметром регулирования является полное сопротивление фазы электрического контура (импеданс) ДСП (УКП) $Z_{2\phi}$, рассчитанное для вторичной стороны печеного трансформатора на основе измерений фазных напряжений и токов. Использование данного параметра обеспечивает процесс регулирования с минимальным влиянием одной фазы на другую, что позволяет поддерживать стабильный режим работы ДСП на начальной стадии расплавления шихты. Недостатком систем, использующих $Z_{2\phi}$, является отсутствие контроля за длиной электрической дуги, что при сильных отклонениях напряжения в питающей сети, например при отсут-

ствии в системе электроснабжения статического тиристорного компенсатора (СТК), может привести к неоптимальным электрическим режимам ДСП и УКП. Аналогичными по динамическим показателям являются системы управления, в которых используют в качестве регулируемого параметра полную проводимость фаз ДСП (УКП) (адмитанс) $Y_{2\phi}$.

2. Использование в качестве регулируемых параметров напряжения электрической дуги U_{ARC} или активного сопротивления дуги R_{ARC} позволяет осуществлять контроль за длинами электрических дуг, что очень важно на конечных стадиях плавки в ДСП, когда дуги горят на жидкий металл в шлаковом слое. Контроль длины дуги в данном случае позволяет исключить перегревы водоохлаждаемых панелей печи, обеспечить максимальный тепловой КПД дуги и создать наилучший электрический режим, при котором коэффициент интенсивности нагрева металла будет максимально возможным. То же самое относится и к установкам УКП, где технологический процесс осуществляется только на жидкой ванне. Однако существуют серьезные ограничения на использование параметров U_{ARC} и R_{ARC} . Обусловлены они тем, что для получения сигнала обратной связи по U_{ARC} или R_{ARC} необходимо проводить вычисления значений этих параметров на основе математической модели электрического контура ДСП, т.к. прямое измерение не доступно. Ключевыми параметрами в математической модели являются активные и индуктивные сопротивления короткой сети, измеряемые при проведении опыта короткого замыкания. При работе ДСП (УКП) значения этих параметров меняются из-за различного гармонического состава тока. Кроме того, в процессе работы печи изменяется градиент напряжения столба дуги, что тоже сказывается на изменении длины L_{ARC} . Это делает возможным использования U_{ARC} и R_{ARC} в качестве регулируемых переменных только на конечных стадиях плавки в ДСП, где значение коэффициента искажения тока минимальное и процесс горения дуги устойчивый. Также эти параметры могут быть использованы при управлении электрическими режимами УКП.

3. Наиболее нестабильной является система автоматического регулирования тока электрической дуги. Как показали исследования, при использовании I_{ARC} в качестве регулируемого

параметра имеет место наибольшее влияние фаз ДСП (УКП) друг на друга. В соответствии с этим, обеспечить стабильный процесс расплавления металла в трехфазной ДСП с использованием системы прямого регулирования токов дуг не представляется возможным. В качестве исключения можно рассматривать однофазные электродуговые установки малой мощности, где проблема взаимного влияния фаз отсутствует.

4. В разработанной специалистами ФГБОУ ВПО «МГТУ» системе автоматического управления перемещением электродов «РАДУГА ПК» используется усовершенствованный адаптивный регулятор импеданса. При условии использования блока коррекции по отклонению напряжения на первичной обмотке трансформатора система регулирования импеданса обеспечивает приемлемую точность регулирования длины дуги на основных стадиях плавки.

Список литературы

1. Свенчанский А.Д. Автоматическое управление электротермическими установками. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
2. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Магнитогорск, 2009. 20 с.
3. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Особенности моделирования гидропривода перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-180 // Инновации в науке: сб. статей по материалам XXVII международной научно-практической конференции. Новосибирск: «СибАК», 2013. №27. С. 53–61.
4. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления положением электродов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов печь-ковш / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Якимов И.А., Повелица Е.В., Ануфриев А.В. // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1. С. 48–58. Режим доступа: <http://electrical-engineering.ru/>.
5. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Исследование гидропривода перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji», г. Искендерун, Турция // Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И.Носова, 2014. Вып. 1, С. 84–95.
6. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю. // Электromеталлургия. 2013, №7. С. 2–10.
7. Особенности моделирования сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю., Якимов И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1(41). С. 76–82.
8. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С. Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2012. 304 с.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. 198 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

STUDY OF DIFFERENT METHODS TO DESIGN AUTOMATED ELECTRODE POSITION CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC ARC FURNACES AND LADLE FURNACES

Nikolaev Aleksandr Arkadyevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 22-45-87. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Kornilov Gennady Petrovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7 (3519) 29-84-79. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Povelitsa Evgeny Vyacheslavovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: evpgene@mail.ru.

Tulupov Platon Garrievich – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

Abstract. The article describes different ways to design automated electrode position control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces. All systems were evaluated in terms of control performance, advantages and disadvantages, and described in terms of operation conditions at operating facilities.

Keywords: Electric arc furnace, ladle furnace, automated electrode position control system, adaptive impedance regulator, hydraulic drive for electrode positioning.

References

1. Svenchanskiy A.D. *Avtomaticheskoe upravlenie ehlektrotermicheskimi ustanovkami* [Electrothermal equipment automated control]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 416 p.
2. Nikolaev A.A. *Povyshenie ehffektivnosti raboty staticheskogo tiristorного kompensatora sverkhmoshhnoy dugovoy staleplavil'noy pechi* [Improving the efficiency of static var compensator of the ultra-high power electric arc furnace: Abstract of the Ph.D. disserta-

- tion]. Magnitogorsk, 2009, 20 p.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Features of mathematical modeling of hydraulic drives for electrode positioning at ultra-high power electric arc furnace EAF-180. *Innovatsii v nauke: sbornik statej po materialam XXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii* [Innovations in science: Collection of papers presented at the 27th international scientific and practical conference]. Novosibirsk: SibAK, 2013, no. 27, pp.53-61.
 4. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Tulupov P.G., Yakimov I.A., Povelitsa E.V., Anufriev A.V. Design of the improved electric arc furnace and ladle furnace electrodes' position automatic control system. *Innovatsii v nauke: sbornik statej po materialam XXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii Ehlektrotehnika: setevoj ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Electrical engineering: web scientific journal electronic resource], 2014, vol. 1, pp. 48-58.
 5. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Research on a hydraulic drive for electrode positioning at the ultra-high power electric arc furnace EAF-250 at CJSC MMK Metalurji in Iskenderun, Turkey. *Ehnergeticheskie i ehlektrotehnicheskie sistemy: mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov* [Power and electrotechnical systems: International collection of research papers]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, iss. 1, pp.84-95.
 6. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu. Analysis and optimization of ultra high power arc furnaces electrical modes. *Ehlektrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2013, no.7, pp. 2-10.
 7. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Vakhitov T.Yu., Yakimov I.A. Features of simulation of an electric arc furnace as an electrotechnical complex. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013, no. 1(41), pp.76-82.
 8. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya vyplavkoj stali v ehlektrodugovykh pechakh: monografiya* [Automation and optimization of electric steelmaking process control]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 304 p.
 9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov U.B. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii: monografiya* [Optimization of technological process control in metallurgy: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 198 p.

Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Повелица Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №2. С. 90–100.

Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Povelitsa E.V., Tulupov P.G. Study of different methods to design automated electrode position control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2, pp. 90–100.