

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ И УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ

А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, В.С. Ивекеев

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

В рамках данной статьи проведён сравнительный анализ наиболее распространённых систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП) производства ведущих зарубежных фирм, таких как Siemens VAI (Primetals Technologies), Danieli, Amec Spie, AMI, Ferrotron. В качестве критериев для сравнительного анализа выбраны требования к функционалу систем управления электрическим режимом, обеспечивающие возможность оптимальной работы печных агрегатов при минимальных производственных издержках. Проведение подобного рода анализа необходимо для решения широкого спектра задач, связанных с планированием электросталеплавильного производства, а также выбором поставщика основного технологического оборудования. Результаты выполнения сравнительного анализа имеют весомую практическую значимость, поскольку в ряде случаев по результатам исследований, направленных на оптимизацию работы печных агрегатов, отсутствует техническая возможность достижения заданных энергетических и временных показателей ввиду ограничений, которые накладывает архитектура системы управления электрическим режимом и перемещением электродов.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, система управления электрическим режимом, система управления гидроприводом перемещения электродов, электрическая дуга, энергоэффективность.

Введение

За прошедшие несколько десятилетий в мировой металлургии наметилась устойчивая тенденция внедрения в производство дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП) при строительстве электросталеплавильных цехов. Данный факт обусловлен высокой энергетической и экономической эффективностью работы данного типа установок. При этом для производителя конечного продукта металлургического цикла ключевую роль играет выбор поставщика, с которым будет заключён контракт на поставку технологического оборудования, в том числе оборудования непосредственно ДСП (УКП).

При выборе поставщика оборудования ДСП (УКП) необходимо учитывать достаточно широкий перечень факторов, в числе которых – особенности системы управления электрическим режимом и перемещением электродов. Многочисленные исследования доказали, что от качества и возможности гибкой настройки системы управления электрическим режимом зависят ключевые показатели качества работы печи, такие как удельный расход электроэнергии, время работы под током и цикла плавки, а также длительность межремонтного цикла. Вследствие этого особую актуальность приобретает вопрос систематизации накопленной информации о различных системах управления электрическим режимом ДСП (УКП) с целью упорядочения задачи проведения комплексного анализа основных преимуществ и недостатков, которые

влечёт за собой выбор того или иного поставщика оборудования ДСП (УКП).

В настоящий момент на отечественном и зарубежном рынках распространены такие системы управления, как ARCOS, Simelt (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия) и HI-REG plus (Danieli, Италия [1]). Также встречаются и менее распространённые системы: E.M.P.E.R.E. (Amec Spie, Франция), DECTEQ (Ferrotron, Германия) и DigitArc (AMI, Мексика). Кроме того, все большее распространение получают новые системы управления, разработанные за последние несколько лет: Melt Expert (Primetals Technologies, Германия) и Q-REG (Danieli, Италия). Также на ряде производств встречаются устаревшие системы управления, такие как A.R.C.E.L.E.C. (Amec Spie, Франция). Для выполнения сравнительного анализа данных систем рассмотрим основные требования, которые должны предъявляться к их функционалу для обеспечения максимальной энергетической эффективности работы печного агрегата.

1. Требования к функционалу систем управления электрическим режимом, обеспечивающие возможность формирования оптимального электрического режима работы печи

Исходя из анализа опыта эксплуатации ДСП (УКП) на различных металлургических предприятиях, а также исходя из требований, предъяв-

ляемых к архитектуре систем управления электрическим режимом для обеспечения возможности её оптимальной настройки, можно сформировать следующий перечень критериев, которые позволяют судить о преимуществах и недостатках той или иной системы.

1. Применение универсальных алгоритмов обработки измеряемых сигналов при использовании различных типов измерительных устройств (катушки Роговского на вторичной стороне печного трансформатора (ПТ), трансформаторы тока на первичной стороне ПТ). Данный критерий обусловлен удобством эксплуатации и настройки системы, в которой алгоритмы обработки сигналов унифицированы и не зависят от типа измерительного устройства.

2. Обеспечение полной линеаризации параметров электрического контура ДСП (УКП) и регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов [2]. Характеристика электрического контура печи, отражающая зависимость длины электрической дуги от того или иного параметра регулирования (импеданс фазы $Z_{2ф}$, адмиттанс фазы $Y_{2ф}$, сопротивление дуги R_d и т. д.), является нелинейной. Вследствие этого настройка системы на технический оптимум во всём диапазоне рабочих длин дуг с использованием классического регулятора не представляется возможной. Аналогичная ситуация наблюдается и с гидравлическим контуром. Ввиду особенностей сервоклапана как исполнительного механизма системы гидравлического привода перемещения электродов зависимость скорости перемещения электрода от сигнала задания на сервоклапан также является нелинейной и влечёт за собой ту же проблему, что и в случае с электрическим контуром. Для компенсации обозначенного негативного эффекта в некоторых системах управления прибегают к специальным линеаризующим блокам. При этом структура данных блоков зачастую не обеспечивает полной линеаризации, что является существенным недостатком.

3. Применение адаптивного нелинейного регулятора с возможностью адаптации коэффициентов усиления ПИ-регулятора при изменении стадий плавок в ДСП. Данный критерий тесно связан с предыдущим. В силу того, что полная линеаризация электрического контура в большинстве современных систем управления не обеспечивается, зачастую для достижения относительной стабильности прибегают к ослаблению результирующего коэффициента усиления контура регулирования в зависимости от стадии плавки за счёт адаптивного регулятора.

4. Гибкое управление ограничением токов при работе ДСП (УКП) с использованием основных клапанов и клапанов быстрого подъёма. Данный режим особенно необходим на начальной стадии плавления, когда имеют место постоянные обвалы

шихты с закорачиванием дуг. В структуру системы вводится дополнительный контур, который отслеживает превышение током дуги заранее определённых допустимых значений с формированием сигнала задания на подъём электродов. В случае если превышение продолжается длительный период времени, система открывает клапаны быстрого подъёма для обеспечения подъёма электродов с максимальной скоростью.

5. Коррекция уставок регулируемого электрического параметра в функции отклонения напряжения питающей сети, изменения гармонического состава токов. Уставка регулируемого параметра в системе подбирается таким образом, чтобы обеспечить поддержание требуемых мощности электрической дуги P_d , коэффициента износа футеровки (КИФ) и коэффициента интенсивности нагрева (КИН). При этом расчёт электрической характеристики, как правило, производится при идеализированных условиях, когда величина напряжения питающей сети равна номинальному значению, а величина тепловой постоянной времени электрической дуги θ_d соответствует средней величине для отдельно взятой стадии плавки. На практике напряжение питающей сети постоянно изменяется, а величина θ_d не стабильна и не может быть измерена напрямую. Как следствие, возникает потребность в коррекции уставки параметра регулирования в зависимости от текущей величины напряжения питающей сети и гармонического состава токов. Отметим, что гармонический состав токов дуг имеет связь с величиной θ_d , что подробно рассматривалось в исследовании [3].

6. Возможность задания индивидуальных несимметричных режимов горения дуг для различных ступеней печного трансформатора, реактора и номеров рабочих кривых. В печах с непрерывной подвалкой шихты конвейером, а также в печах шахтного типа для предотвращения повышенного износа футеровки и перегрева водоохлаждаемой панели в «горячей» зоне печи необходимо формировать оптимальный несимметричный режим путём задания балансировочных коэффициентов. Исследования в рамках статьи [4] показали, что для каждого сочетания ступеней печного трансформатора, реактора и набора уставок оптимальное сочетание балансировочных коэффициентов является уникальным. Вследствие этого обозначенная выше функция приобретает особую важность для системы управления электрическим режимом.

7. Автоматическая адаптация несимметричных режимов горения дуг к разным стадиям плавки в ДСП и изменяющимся условиям аргоновой продувки и шлаковым режимам в УКП. Помимо сочетания ступеней печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой оптимальное сочетание балансировочных коэффициентов в ДСП и

УКП также определяет текущая стадия плавки и шлаковый режим [5–8]. Так, при достаточном экранировании электрических дуг вспененным шлаком в ДСП результирующая величина коэффициента износа футеровки может быть увеличена за счёт подстройки балансирующих коэффициентов с целью сокращения времени работы под током и более быстрого завершения фазы активного расплавления. Для УКП в данном случае особую роль играет температура шлака, образующегося на поверхности расплава, а также текущий режим аргонной продувки. Это связано с тем, что при интенсивных режимах продувки на поверхности расплава образуется бурн, вследствие чего всплески жидкого металла закорачивают электроды в фазах, находящиеся в непосредственной близости от донной пробки. Важно отметить, что при одной и той же интенсивности продувки, но разной температуре шлака на поверхности интенсивность всплесков может в значительной мере отличаться, предъявляя различные требования к формированию оптимального несимметричного режима [9].

8. Возможность диагностики стадий плавки в ДСП (оценка стабильности нагрева стали в УКП) и интеллектуальное управление процессом переключения ступеней РПН трансформатора, реактора и изменения рабочих кривых, реализованная на базе самого регулятора. Ранее было отмечено, что для решения задачи формирования оптимального электрического режима необходимо достаточно точно судить о текущей стадии плавления шихты. Это становится возможным благодаря анализу гармонического состава сигналов тока (напряжения) электрических дуг, что было подробно рассмотрено в рамках [10–14]. Тем не менее в подавляющем большинстве современных систем управления, равно как и в системах, рассматриваемых в данной статье, определение стадии плавления шихты производится по величине удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$, которая является косвенным показателем и не имеет прямой связи с реальными технологическими процессами, протекающими в ванне печи.

2. Сравнительный анализ различных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь

Для наглядности на рис. 1 представлен внешний вид основных шкафов с оборудованием систем автоматического управления электрическим режимом и перемещением электродов. Помимо описываемых в рамках исследования систем на рис. 1з представлена система САУЭР «АСУ ЭРП» отечественной разработки. Ввиду низкой серийности данная система подробно рассматриваться не будет. Кроме того, на рис. 1з также показана система САУЭР «РАДУГА НПА ПК», речь о которой

пойдёт позднее. Также для проведения сравнительного анализа рассматриваются функциональные схемы систем управления электрическим режимом ARCOS, HI-REG Plus, Simelt, DECTEQ, E.M.P.E.R.E., Q-REG, DigitArc, A.R.C.E.L.E.C. (рис. 2–4).

Система управления электрическим режимом ARCOS (рис. 4а) является одной из наиболее распространённых систем управления электрическим режимом в России. В ней предусмотрена возможность регулирования по трём основным параметрам: напряжению электрической дуги U_d , сопротивлению электрической дуги R_d и полному импедансу фазы $Z_{2ф}$. При этом регулятор имеет нелинейную пропорционально-интегральную структуру с возможностью задания индивидуальных коэффициентов пропорциональной и интегральной частей для шести зон ошибки регулирования. Недостатком данной системы является отсутствие разделения линейризации электрического и гидравлического контуров, что является неудобным с практической точки зрения и усложняет процедуру настройки регулятора.

Система HIREG-Plus (рис. 4б) наряду с системой ARCOS также является одной из наиболее распространённых систем управления. В данной системе осуществляется косвенное регулирование адмиттанса фазы $Y_{2ф}$ за счёт поддержания величины дифференциального показателя, определяемого на основании действующих значений сигналов тока дуги и фазного напряжения, на нулевом уровне. В системе HIREG-plus применяется классический дифференциальный регулятор. Все блоки, направленные на линейризацию объекта управления, вынесены отдельно (K_a , блок нелинейного усиления, линейризация сервоклапана). Тем не менее форма линейризующих кривых, формируемых данным блоком, заранее predetermined производителем и не может быть изменена пользователем. Ввиду того, что существующая форма линейризующих кривых не обеспечивает полной линейризации объекта управления, данный факт определяет один из наиболее значительных недостатков данной системы. Кроме того, в системе отсутствует возможность формирования индивидуальных несимметричных режимов горения дуг для различных рабочих кривых ввиду ограничений, накладываемых применением блока K_{iph} в структуре контура регулирования.

Система управления электрическим режимом Simelt (рис. 2а) появилась в одно время с системой ARCOS как независимая разработка компании Siemens (после слияния Siemens и VAI выпускались две системы). Её существенным преимуществом является наличие матрицы балансирующих коэффициентов, что позволяет формировать оптимальный электрический режим для всех ступеней печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой. Кроме того, в системе присутствует



Рис. 1. Внешний вид основных шкафов с оборудованием систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ДСП и УКП зарубежного и отечественного производства

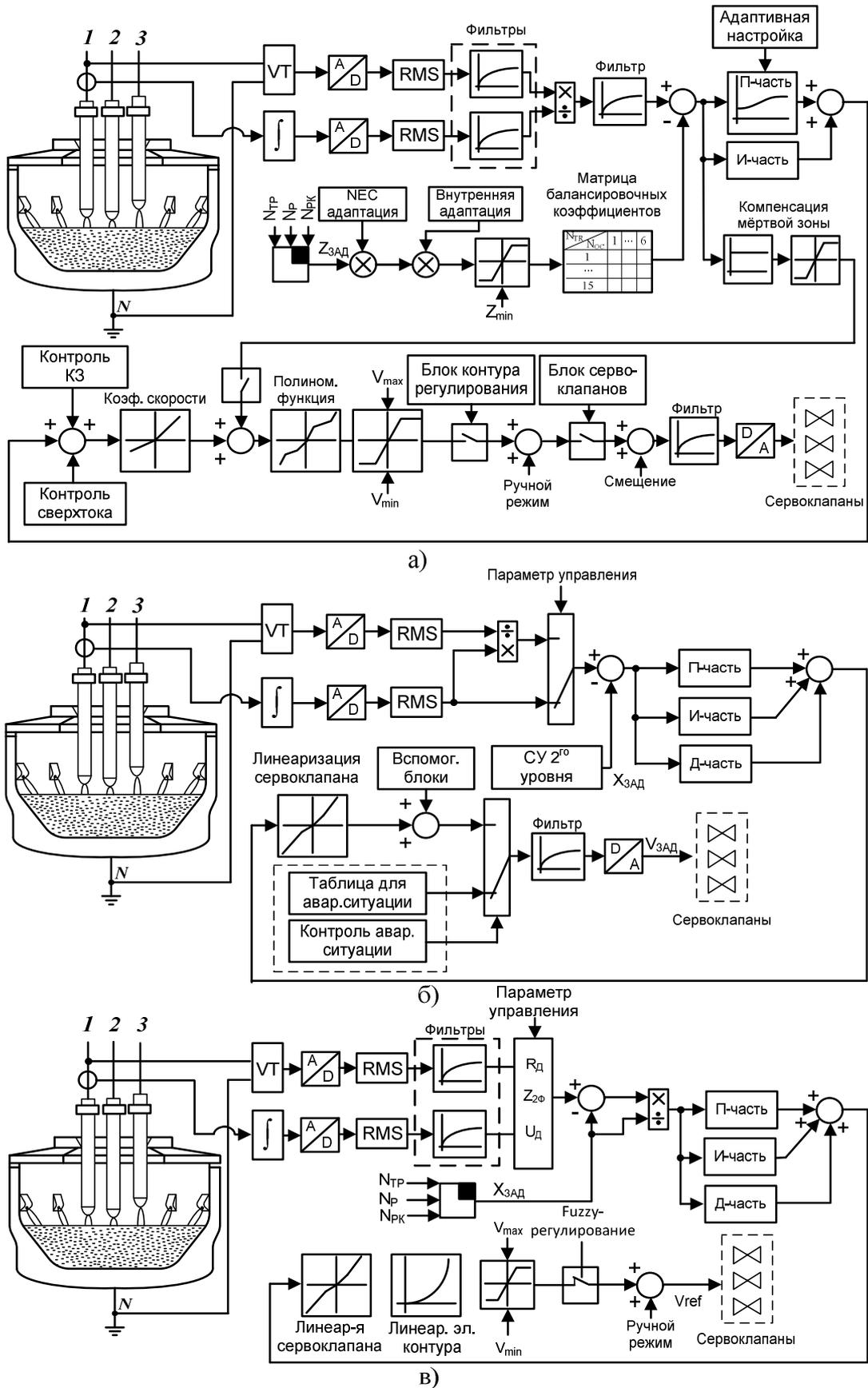


Рис. 2. Функциональные схемы систем управления электрическим режимом: а – Simelt (Primetals Technologies, Германия); б – DECTEQ (Ferrotron, Германия); в – E.M.P.E.R.E. (Amec Spie, Франция)

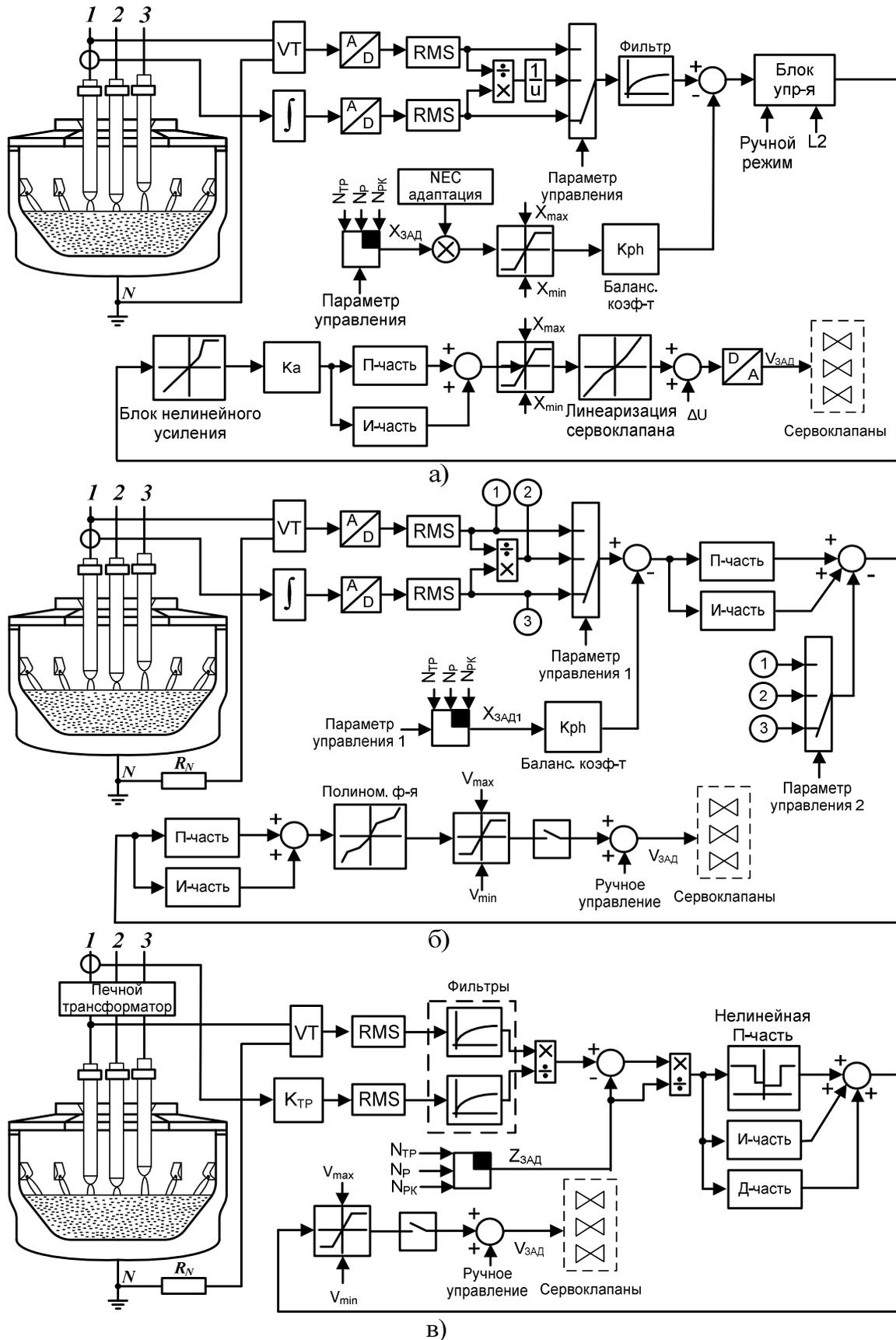


Рис. 3. Функциональные схемы систем управления электрическим режимом: а – Q-REG (Danieli, Италия); б – DigitArc (AMI, Мексика); в – A.R.C.E.L.E.C. (Amec Spie, Франция)

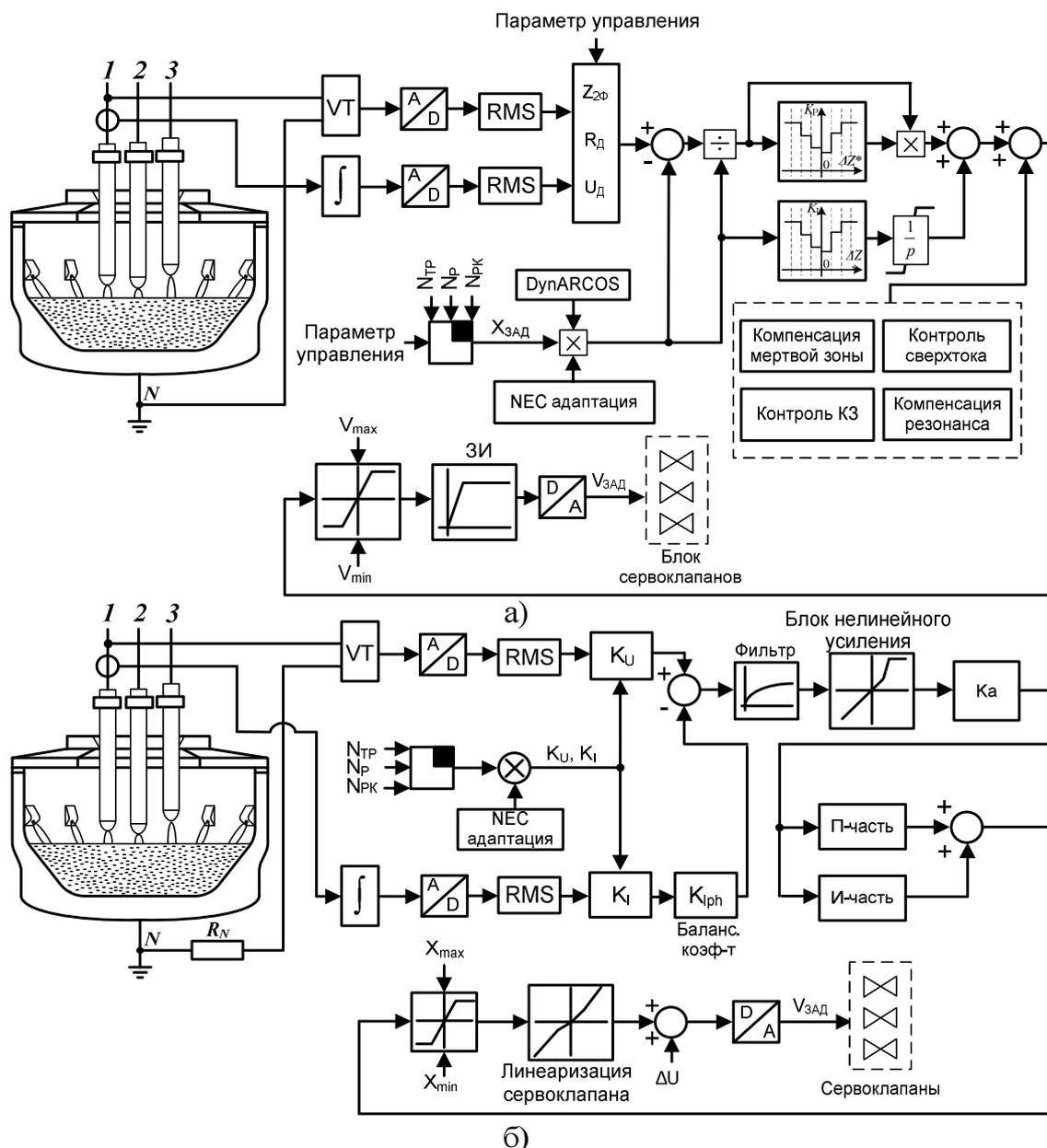


Рис. 4. Функциональные схемы систем управления электрическим режимом: а – ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия); б – HI-REG plus (Danieli, Италия)

несколько нелинейных блоков (адаптивная П-часть, коэффициент скорости, полиномиальная функция), при правильном подборе функции которых появляется возможность достигнуть режимов регулирования, близких к оптимальным. Кроме того, в системе присутствует блок NEC-адаптации, который позволяет корректировать величину уставки параметра регулирования в зависимости от колебаний напряжения в питающей сети. Данная система является одной из наиболее гибких в настройке по сравнению с прочими, но при этом не лишена недостатков. Основной недостаток связан с тем, что в системе не выделены отдельные блоки, направленные на линеаризацию параметров электрического и гидравлического контуров, что

делает настройку недостаточно удобной. Кроме того, характер изменения нелинейной пропорциональной части в данной системе жестко привязан к одной форме в функции времени и не может быть изменён под нужды потребителя. Отдельного упоминания также заслуживает система Melt Expert. Данная система является симбиозом систем ARCOS и Simelt (основные блоки аналогичны ARCOS, аппаратная часть на базе PLC аналогична Simelt). Данная система обособленно рассматриваться не будет, но войдёт в итоговый сравнительный анализ.

Системы управления DECTEQ (рис. 2б) и E.M.P.E.R.E. (рис. 2в) несут в себе характерные черты, свойственные как системе ARCOS, так и

Сравнительный анализ различных систем управления электрическим режимом
дуговых сталеплавильных печей

Основные параметры и характеристики САУЭР и ПЭ	Производитель / наименование САУЭР и ПЭ								
	Primetals Technologies (ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron)			Danieli		Amec Spie		Ferrotron	AMI
	ArCOS NT, ArCOS XP	Simelt	Melt Expert	HI-REG, HI-REG Plus	Q-REG	A.R.C.E.L.E.C.	E.M.P.E.R.E.	DECTEQ	DigitARC
1. Применение универсальных алгоритмов обработки измеряемых сигналов тока и напряжения при использовании различных типов измерительных устройств (катушек Rogowski на вторичной стороне ПТ, трансформаторов тока на первичной стороне ПТ)	-	+	+	+	+	-	-	-	-
2. Обеспечение полной линеаризации параметров электрического контура ДСП (УКП) и регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов	-	+/-	+/-	-	-	-	-	-	-
3. Применение адаптивного нелинейного регулятора с возможностью подстройки коэффициентов усиления ПИ-регулятора при изменении стадий плавки в ДСП и стабильности нагрева металла в УКП	-	+	+	+/-	+/-	-	-	-	-
4. Гибкое управление ограничением токов при работе ДСП или УКП с использованием основных клапанов и клапанов быстрого подъема	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+
5. Коррекция уставок регулируемого параметра в функции отклонения напряжения питающей сети, изменения гармонического состава токов	+	+	+	+	+	-	-	-	-
6. Возможность задания индивидуальных несимметричных режимов горения дуг для различных рабочих кривых	+	+	+	-	-	+	+	+	-
7. Автоматическая адаптация несимметричных режимов горения дуг к разным стадиям плавки в ДСП и изменяющимся условиям аргоновой продувки и шлаковым режимам в УКП	-	+/-	+/-	-	-	-	-	-	-
8. Возможность диагностики стадий плавки в ДСП (оценка стабильности нагрева стали в УКП) и интеллектуальное управление процессом переключения ступеней РПН трансформатора, реактора и изменения рабочих кривых, реализованная на базе самого регулятора	-	-	-	-	-	-	-	-	-

системе HIREG Plus с присущими им недостатками. Сходство с системой ARCOS заключается в возможности выбора различных параметров регулирования, а сходство с системой Hireg Plus – в вынесении в отдельные блоки линеаризующих характеристик. При этом в обеих системах применяется ПИД-регулятор, в котором, как правило, нет необходимости, поскольку на практике дифференциальная часть практически всегда выведена из состава контура регулирования. Тем не менее, важно отметить тот факт, что система E.M.P.E.R.E. является единственной из представленных систем, в которой линеаризация электрического контура осуществляется с использованием характеристики, полученной на математической модели.

Система управления электрическим режимом Q-REG (рис. 3а) также является системой нового поколения наряду с Melt Expert. Основным преимуществом данной системы является разделение блоков линеаризации электрического (блок нелинейного усиления) и гидравлического контуров (линеаризация сервоклапана). Ввиду отсутствия чёткой привязки к зонам сигнала задания блок линеаризации сервоклапана позволяет добиться полной линеаризации гидравлического контура. При этом форма характеристики блока нелинейного усиления определена однозначно, вследствие чего полная линеаризация электрического контура не представляется возможной. Кроме того, в данной системе отсутствует возможность определения уникального набора балансировочных коэффициентов для каждого сочетания ступеней печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой. Следует отметить, что в системе Q-REG помимо регулирования полного адмиттанса фазы $Y_{2\phi}$ имеется возможность осуществлять регулирование фазного напряжения $U_{2\phi}$ и тока электрической дуги I_d . Опыт предыдущих исследований показывает, что прямое регулирование тока является неэффективным, поскольку изменения тока дуги в одной фазе приводит к мгновенному изменению тока в другой фазе, вследствие чего добиться стабильного регулирования при сохранении должного быстродействия практически невозможно.

На территории стран Северной и Южной Америки широкое распространение получила система управления Digit Arc (рис. 3б). Данная система обладает недостатками, характерными как для системы Q-REG, так и для системы Simelt (отсутствие разделения при линеаризации электрического и гидравлического контуров, а также отсутствие возможности определения уникальных сочетаний балансировочных коэффициентов для различных стадий плавки). Также в ней отсутствует блок NEC-адаптации. Ключевой особенностью данной системы является применение системы подчинённого регулирования для всех возможных сочетаний параметров $Z_{2\phi}$, I_d и $U_{2\phi}$. По аналогии с сис-

темой Q-REG необходимость использования тока дуги I_d как во внешнем, так и внутреннем контурах регулирования также вызывает сомнения в силу причин, описанных выше. Тем не менее данный вопрос в современной литературе подробно не освещался и является актуальной темой для будущих исследований.

В свою очередь аналоговая система управления A.R.C.E.L.E.C. (рис. 3в) в настоящее время является устаревшей. В ней отсутствует возможность применения поясов Роговского в качестве датчиков тока, нет возможности формировать балансировочные коэффициенты, не затрагивая профиль плавки, отсутствуют блоки NEC-адаптации, а также используется ПИД-регулятор, в чём нет необходимости, поскольку на практике дифференциальная часть не используется. При этом ограниченное число зон нелинейной пропорциональной части регулятора не позволяет достигнуть приемлемой линеаризации электрического и гидравлического контуров.

На основании вышесказанного, а также с учётом опыта, полученного в ходе исследования [1], в таблицу сведена общая информация об основных преимуществах и недостатках наиболее распространённых систем управления электрическим режимом, что являлось целью данного исследования.

Анализ приведённых в таблице данных показал, что наиболее критичный недостаток архитектуры систем управления электрическим режимом, связанный с отсутствием полной линеаризации электрического и гидравлического контуров ДСП и УКП, характерен практически для всех современных систем. Данная проблема приводит к тому, что контур регулирования невозможно настроить на технический оптимум во всем диапазоне рабочих длин дуг, вследствие чего переходные процессы как по управляющему, так и по возмущающему воздействию в системе не будут соответствовать оптимальным. Данный факт негативно скажется на энергоэффективности работы системы в целом вследствие завышенной величины дисперсии токов электрических дуг.

3. Система управления электрическим режимом «РАДУГА НПА ПК» с адаптивным нелинейным П-регулятором импеданса

Как было отмечено ранее, существующие структуры регуляторов электрических параметров, используемые в современных системах управления, обладают рядом недостатков, а именно: необходимостью использовать большое количество уникальных характеристик изменения коэффициентов регулятора, а также совмещении линеаризующих функций для электрического контура и гидропривода. Для упрощения процесса настройки системы управления перемещением электродов авторами статьи была предложена и внедрена на практике усовершенствованная структура адап-

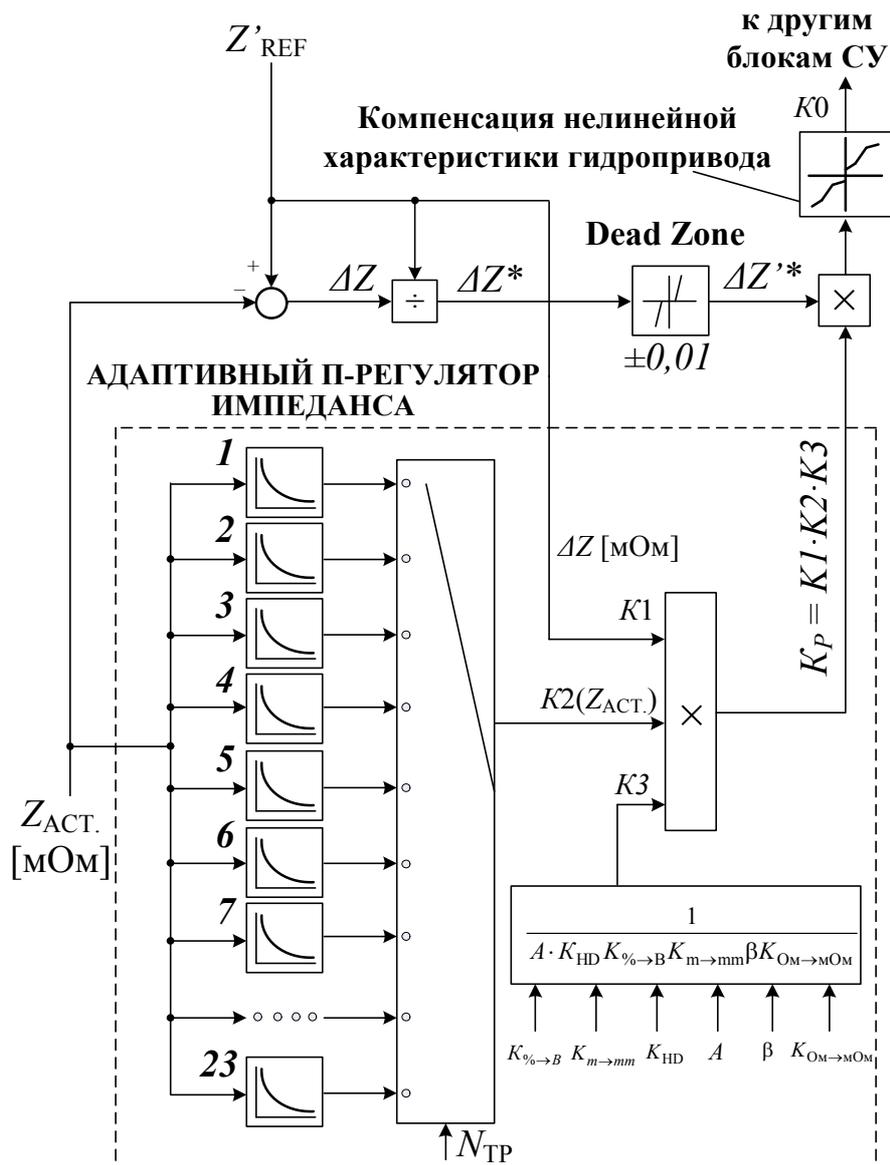


Рис. 5. Функциональная схема усовершенствованного адаптивного регулятора импеданса

тивного регулятора импеданса [15] в составе отечественной системы управления «РАДУГА НПА ПК», разработанной специалистами ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (рис. 5).

Основной особенностью данного регулятора является наличие полного набора линеаризующих характеристик электрического контура ДСП (УКП) для всех возможных сочетаний ступеней печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой. Кроме того, в отдельный блок вынесена линеаризующая характеристика гидравлического контура. Подобная структура регулятора позволяет обеспечить оптимальность переходных процессов во всем диапазоне рабочих длин дуг, что оказывает существенное влияние на общие показатели работы сталеплавильного комплекса в целом.

Кроме того, в системе «РАДУГА НПА ПК» реализована система диагностики стадии плавки

по высшим гармоникам токов (напряжений) электрических дуг. За счёт применения данной системы обеспечивается своевременный переход с одного сочетания ступеней печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой на другое в соответствии с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. Благодаря этому удаётся достичь существенного сокращения продолжительности плавки. [3,10].

Заключение

1. ДСП и УКП являются мощными потребителями электрической энергии, вследствие чего на стадии плавания особое внимание необходимо уделить выбору поставщика основного технологического оборудования, который зачастую также является поставщиком системы управления электрическим режимом. Неправильный выбор систе-

мы управления впоследствии может привести к тому, что результаты перспективных исследований, направленных на оптимизацию энергопотребления печной установки, не смогут быть применены на практике ввиду особенностей архитектуры той или иной системы.

2. Основными и наиболее критичными недостатками существующих систем управления электрическим режимом являются отсутствие возможности полной линеаризации электрического контура печи, отсутствие возможности определения уникальных значений балансирующих коэффициентов для каждой отдельно взятой стадии плавки, а также отсутствие диагностики стадии плавления шихты с интеллектуальным процессом переключения ступеней печного трансформатора, реактора и номеров рабочих кривых. Наличие данных недостатков зачастую не позволяет в полной мере осуществлять внедрение результатов научно-исследовательских работ, направленных на формирование оптимальных электрических режи-

мов работы ДСП и УКП, вследствие чего часть потенциала сталеплавильного производства остаётся незадействованной.

3. Основные недостатки, выявленные у существующих систем управления электрическим режимом, устранены в системе «РАДУГА-ПК», разработанной специалистами ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Благодаря полной линеаризации электрического контура печи с применением адаптивного П-регулятора импеданса, возможности задания уникальных значений балансирующих коэффициентов для каждой отдельно взятой стадии плавления шихты, а также применению системы диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов электрических дуг появляется возможность в значительной мере повысить технико-экономические показатели качества работы печи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

Литература

1. Nikolaev, A.A. *The comparative analysis of electrode control systems of electric arc furnaces and ladle furnaces* / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, G.V. Astashova // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2016. DOI: 10.1109/icieam.2016.7910888
2. Wang Yan. *Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace* / Wang Yan, Mao Zhi-zhong, Tian Hui-xin et al. // J. Cent. South Univ. Technol. – 2010. – Vol. 17. – P. 560–565. DOI: 10.1007/s11771-010-0523-3
3. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.-Ж. Руссо, В. Сзымански, П.Г. Тулунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 3. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120
4. Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковши-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулунов, Е.В. Повелица // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2015. – № 2 (50).
5. Bowman, B. *Arc Furnace Physics* / B. Bowman, K. Krüger // Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf. – 2009.
6. Krüger, K. *Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces)* / K. Krüger. – Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
7. Boulet, B. *Modeling and control of an electric arc furnace* / B. Boulet, G. Lalli, M. Ajerschv // Presented at the American Control Conference, Denver, CO, USA, Jun. 4–6, 2000.
8. Panoiu, M. *Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace* / M. Panoiu, C. Panoiu, L. Ghiormez // 5th International Workshop on Soft Computing Applications. Szeged, Hungary. – 2012. – P. 261–271. DOI: 10.1007/978-3-642-33941-7_24
9. Nikolaev, A.A. *Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace* / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov // 2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECHATRONICS), 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM). Compiègne. – 2016. – P. 033–037. DOI: 10.1109/mecatronics.2016.7547111
10. Патент РФ на полезную модель № 176106. Система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулунов, А.В. Ануфриев. – 2018.
11. Nikolaev, A.A. *Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages* / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, A.V. Anufriev // Proceedings of 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM2015). IEEE. Bochum, Germany, November 18–20. – 2015. – P. 302–308, DOI: 10.1109/REM.2015.73804112
12. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace / G.W. Chang, Y.J. Liu, H.M. Huang, S.Y. Chu // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2016. Montreal. Canada. IEEE, 2016. –P. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471

13. Ye Xiao-Mei. *The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces* / Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He // *Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*. Baoding, China. IEEE. – 2009. – P. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR. 2009.5207486

14. *Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace* / Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun // *Proceedings of Power System Technology International Conference*. IEEE. – 2004. – Vol. 1. – P. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122

15. Патент РФ на полезную модель № 176886. *Устройство регулирования импеданса дуговой сталеплавильной печи* / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, Е.В. Повелица. – 2018.

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; aa.nikolaev@magtu.ru.

Тулупов Платон Гарриевич, младший научный сотрудник, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; tulupov.pg@mail.ru.

Ивекеев Владимир Сергеевич, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; vivekeev@yandex.ru.

Поступила в редакцию 22 сентября 2020 г.

DOI: 10.14529/power200306

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN ELECTRIC MODES CONTROL SYSTEMS IN ELECTRIC ARC AND LADLE FURNACES

A.A. Nikolaev, aa.nikolaev@magtu.ru,

P.G. Tulupov, tulupov.pg@mail.ru,

V.S. Ivekееv, vivekeev@yandex.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The research presents the comparative analysis of the most common electrical mode control systems for electric arc furnaces (EAF) and ladle furnaces (LF) produced by the leading foreign companies, i.e. Siemens VAI (Primetals Technologies), Danieli, Amec Spie, AMI, Ferrotron. The comparative analysis criteria are the functionality requirements for the electric mode control systems, which ensure optimal operation of the furnace units at minimum production costs. Such analysis allows solving various tasks related to the electric steel-making production planning, as well as to basic technological equipment supplier selection. The results of the comparative analysis are of significant practical importance, since in a number of cases, the studies into the furnace units' operation optimization show no technical possibility to achieve the required energy and time levels due to the limitations posed by the architecture of the electrical mode and the electrode motion control system.

Keywords: electric arc furnace, ladle furnace, electric mode control system, electrode motion hydraulic drive, electric arc, energy efficiency.

References

1. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Astashova G.V. The comparative analysis of electrode control systems of electric arc furnaces and ladle furnaces. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016. DOI: 10.1109/icieam.2016.7910888

2. Wang Yan, Mao Zhi-zhong, Tian Hui-xin, Li Yan, Yuan Ping. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace. *J. Cent. South Univ. Technol.*, 2010, vol. 17, pp. 560–565. DOI: 10.1007/s11771-010-0523-3

3. Nikolaev A.A., Rousseau J.J., Szymanski V., Tulupov P.G. An experimental study of electric arc current harmonics in electric arc furnaces with different power characteristics. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2016, vol. 14, no. 3. (in Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120

4. 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 of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2015, no. 2, pp. 90–100 (in Russ.)
5. Bowman B., Krüger K. *Arc Furnace Physics*. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
6. Krüger K. *Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces)*. Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
7. Boulet B., Lalli G., Ajerschw M. Modeling and control of an electric arc furnace. *Presented at the American Control Conference*, Denver, CO, USA, Jun. 4–6, 2000.
8. Panoiu M., Panoiu C., Ghiormez L. Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace. *5th International Workshop on Soft Computing Applications*. Szeged, Hungary, 2012, pp. 261–271. DOI: 10.1007/978-3-642-33941-7_24
9. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. *2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS), 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Compiegne, 2016, pp. 033–037. DOI: 10.1109/mecatronics.2016.7547111
10. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. *Sistema upravleniya elektricheskim rezhimom dugovoy staleplavilnoy pechi* [The electric mode control system of electric arc furnace]. Patent RF, no. 176106, 2018.
11. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages. *Proceedings of 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM2015)*. IEEE. Bochum, Germany, November 18–20, 2015, pp. 302–308. DOI: 10.1109/REM.2015.73804112
12. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2016. Montreal, Canada. IEEE, pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471
13. Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He. The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces. *Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding, China. IEEE*, 2009, pp. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207486
14. Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun. Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace. *Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE*. 2004, vol. 1, pp. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122
15. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Povelitsa E.V. *Ustroystvo regulirovaniya impedansa dugovoy staleplavilnoy pechi* [Impedance regulator for electric arc furnace]. Patent RF, no. 176886, 2018.

Received 22 September 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Николаев, А.А. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, В.С. Ивекеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 52–64. DOI: 10.14529/power200306

FOR CITATION

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivekeev V.S. The Comparative Analysis of Modern Electric Modes Control Systems in Electric Arc and Ladle Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200306