

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПОСОБА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ АГРЕГАТОВ

Парсункин Б.Н., Ахметов У.Б., Андреев С.М., Чистяков Д.В.

Аннотация. В работе целью исследования является обеспечение функционирования электродуговых технологических агрегатов, таких как дуговая сталеплавильная печь и агрегат печь-ковш, в энергосберегающем режиме. Авторами предложен энергосберегающий помехоустойчивый способ поискового интеллектуального оптимального управления электрическим режимом для дуговых технологических агрегатов. Способ характеризуется разделением во времени поискового тестирующего воздействия на процесс с последующим формированием рабочего управления по интегральной оценке отклика оптимизируемого процесса на тестирующее воздействие. Для построения нового способа автоматического управления авторами рассмотрены: структура контуров управления электродуговыми технологическими агрегатами, функционирование способа управления энергетическими режимами и результаты моделирования работы способа на примере дуговой электросталеплавильной печи. Помехоустойчивость способа обеспечивается формированием плана тестирующих воздействий в соответствии с уникальными свойствами ортогональной функции Уолша. Использование энергосберегающей систем автоматического управления энергетическими режимами дуговых технологических агрегатов позволяет за счет определения и поддержания максимальной электрической мощности, выделенной в дуге, обеспечить максимальную часовую производительность агрегата и минимальное удельное потребление электрической энергии при минимальной себестоимости готовой продукции, получаемой с применением электродуговых технологических агрегатов.

Ключевые слова: мощность, выделяемая в дуге, поисковое и рабочее управляющее воздействие, функция Уолша, интегральная оценка

Введение

Количество стали, выплавленное в дуговых печах, и объемы конвертерной стали, проходящей обработку в дуговых агрегатах печь-ковш, прогнозируемо увеличивается [1]. При постоянном росте стоимости электрической энергии проблема повышения производительности и энергосбережения при использовании электродуговых технологических агрегатов (ЭТА) становится актуальной и важной. Комплексное решение проблем, направленных на повышение эффективности металлургического производства, выполняется в реальном времени по следующим направлениям: исследование информационных и материальных потоков производства [2-4]; развитие новых математических методов моделирования и прогнозирования [5], развитие методов диагностирования; построение обобщенной методики диагностирования механического и электрического оборудования металлургических агрегатов [6], оптимизации управления энергетическим режимом ЭТА [7].

Электрический режим работы ЭТА характеризуется наличием высокочастотных полей, вызванных стохастическим условием горения дуг переменного тока и интенсивных низкочастотных технологических и производственных возмущений. Сложность практической реализации способа оптимизации управления (СОУ) энергетическим режимом ЭТА обусловлена еще и тем, что в производственных условиях вид и текущие производственные характеристики технологического процесса не определены. В этих условиях для оптимизации управления энергетическим режимом целесообразно использовать поисковый интеллектуальный способ.

Анализ многочисленных результатов исследований энергетических режимов ЭТА позволил установить, что максимальное значение производительности ЭТА, минимальное значение удельных затрат электрической энергии, практически минимальное значение себестоимости процесса достигаются при поддержании максимально возможного значения мощности выделяемой в электрической дуге [7-11]. Зависимость величины мощности, выделяемой в электрической дуге, от тока дуги, определяемого длиной дуги, для выбранной ступени напряжения имеет экстремальный вид (рис. 1). Это является необходимым и достаточным условием для практической реализации оптимального управления энергосберегающим и высокопроизводительным режимом работы ЭТА [7]. В соответствии с полученным практическим опытом наиболее целесообразно для реализации оптимального режима управления энергетическим режимом работы ЭТА использовать двухконтурную структуру управления [7].

Структура контуров оптимального управления ЭТА

Первый основной стабилизирующий контур, реализованный на базе стабилизирующего программного регулятора типа *ArCOS*, осуществляет быструю, но грубую установку рабочего

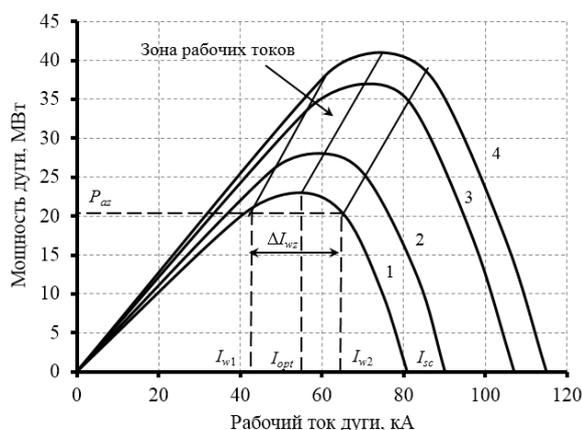


Рис. 1. Расчетные характеристики мощности дуги и зона рекомендуемых рабочих токов для оптимизирующего контура при различных напряжениях печного трансформатора ДСП-180:

1 – $U = 1045$ В; 2 – $U = 1155$ В;
3 – $U = 1291$ В; 4 – $U = 1345$ В

тока дуги или положения электрода на границе выделенной зоны работы оптимизирующего контура (см. рис. 1). Расчетные статические характеристики мощности дуги для различных напряжений и выделенная зона работы оптимизирующего контура для различных ступеней напряжения представлены на рис. 1 для одной фазы ДСП-180 электросталеплавильного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). На рис. 1 введены обозначения: I_w – рабочий ток дуги, кА; I_{opt} – оптимальное значений рабочего тока дуги, кА; I_{w1}, I_{w2} – нижняя и верхняя границы зоны рабочих токов дуги, кА; ΔI_{wz} – длина диапазона рабочих токов, кА; P_{az} – мощность дуги для границ зоны рабочих токов, МВт; I_{sc} – ток короткого замыкания, кА. Второй корректирующий контур управления обеспечивает медленное, но

точное определение и поддержание максимально возможного значения мощности в выделенной зоне работы.

С точки зрения энергосбережения режим работы в диапазоне $I_{w1} \leq I_w(\tau) \leq I_{opt}$ более предпочтителен, чем в диапазоне $I_{opt} \leq I_w(\tau) \leq I_{w2}$ [3].

Система *ArCOS* обеспечивает: программное переключение ступеней печного трансформатора зажигания дуг и ликвидацию технологических коротких замыканий и вывод электрического режима на границу заданной рабочей зоны оптимизирующего контура. При $I_{w1} = I_{w2}$ или $\Delta I_w = 0$ функционирует только стабилизирующий контур [3]. Структурная схема реализации энергосберегающего помехозащищенного АОУ энергетическим режимом в ЭТА представлена на рис. 2.

На рис. 2 введены обозначения: ДСП – дуговая сталеплавильная печь; ПТ – печной трансформатор; ПСН – переключатель ступеней напряжения; *ArCOS* – система управления движением электродов; САОУ – система автоматической оптимизации управления; K_1, K_2 – переключающие ключи.

В производственных условиях для функционирования поискового способа оптимизации управления энергетическим режимом ЭТА используются текущие значения величин тока и напряжения каждой из трех фаз. Частота опроса датчиков $4 \cdot 10^{-4}$ с. Мощность, выделяемая в дуге, вычисляется по формуле:

$$P_a = P_{Ac} - I_w^2 \cdot r, \quad (1)$$

где P_a – мощность, выделяемая в дуге, МВт; P_{Ac} – активная мощность фазы дуги, МВт; r – активное сопротивление, Ом.

Блок управления обеспечивает в зависимости от производственной ситуации целенаправленный выбор режима управления: стабилизирующий или оптимизирующий. Выбор режима осуществляется переключением ключей K_1 и K_2 . При достижении текущим значением тока дуги заданного директивного значения I_{w1} или I_{w2} (см. рис. 1) для выбранной ступени напряжения ключом K_1 разрешается работа САОУ и одновременным переключением ключа K_2 осуществляется переключение к управлению электрогидравлической системой перемещения электродов каждой фазы автономно от соответствующей САОУ энергетическим режимом ЭТА. При возникновении нестандартных производственных ситуаций, например технологического короткого замыкания или обрыва дуги, при которых работа САОУ невозможна, управление электродами передается системе *ArCOS*. Система *ArCOS* обеспечивает вывод

режима управления в заданную зону работы САΟΥ. Рекомендуется использовать две скорости перемещения электродов:

- при работе стабилизирующего контура – 120 мм/с;
- при работе оптимизирующего контура – 80 мм/с.

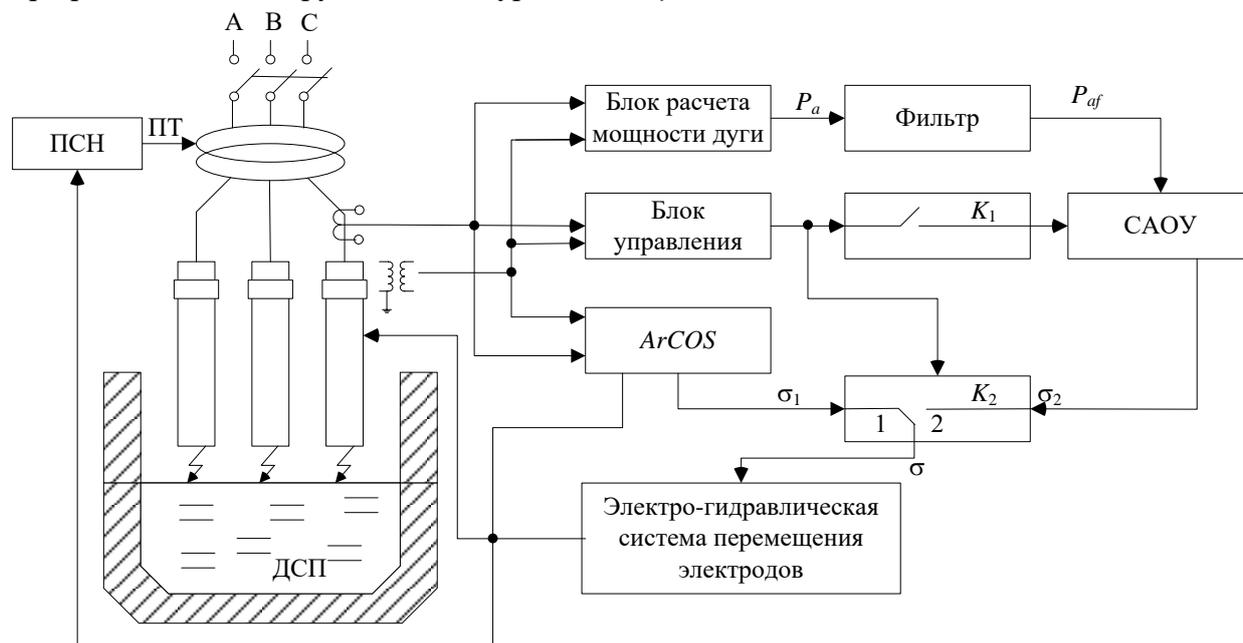


Рис. 2. Структурная схема реализации энергосберегающего оптимального управления электрическим режимом ДСП

Способ управления энергетическими режимами ЭТА

Существующие способы реализации поискового оптимизирующего режима управления инерционными с запаздыванием процессами характеризуются периодическим предельным изменением управляющего воздействия [12-14]. Это обстоятельство является нежелательным и сдерживающим широкое распространение поисковых САΟΥ. Для устранения отмеченного недостатка в рассматриваемой СОУ использован поисковый способ с разделенным во времени тестирующего и рабочего управляющих воздействий.

Рабочее управляющее воздействие формируется с учетом интегральной оценки реакции оптимизируемого параметра процесса на тестирующее воздействие в соответствии с ортогональной синус-функцией Уолша вида

$$\Psi_n = \prod_{k=1}^{n+1} \text{sign} \sin \frac{2^k \cdot \pi \cdot \tau}{T_{im}}, \quad (2)$$

где $\Psi_n(\tau)$ – знакопеременная функция; T_{im} – продолжительность тестирующего воздействия; n – степень аппроксимирующего полинома действующего технологического возмущения, влияние которого на интегральную оценку отклика оптимизируемого параметра необходимо компенсировать.

Если оптимизируемый энергетический режим характеризуется наличием экстремального вида статической характеристики для мощности дуги и находится в заданной зоне рабочих токов (рис. 1), то при условии отсутствия внешних технологических возмущений ($n = 0$) принцип формирования интегральной оценки реакции оптимизируемого процесса на тестирующее воздействие $\Psi_0(\tau)$ показан на рис. 3.

Предположим, что оптимизируемый энергетический режим при $\tau = 0$ находился в точке $A(I_{wA}; P_{aA})$ и на вход подано управляющее тестирующее воздействие

$$I_w^T(\tau) = I_{wA} + A \cdot \Psi_0(\tau), \quad (3)$$

где $I_w^T(\tau)$ – поисковое изменение величины тока дуги, вызванное перемещением электрода, A ; A_m – амплитуда поискового тестирующего изменения тока, A ; $\Psi_0(\tau)$ – значение функции Уолша при $n = 0$.

Поисковое тестирующее воздействие вызывает изменение мощности выделяемой в дуге во времени, $P_a^\Delta(\tau)$.

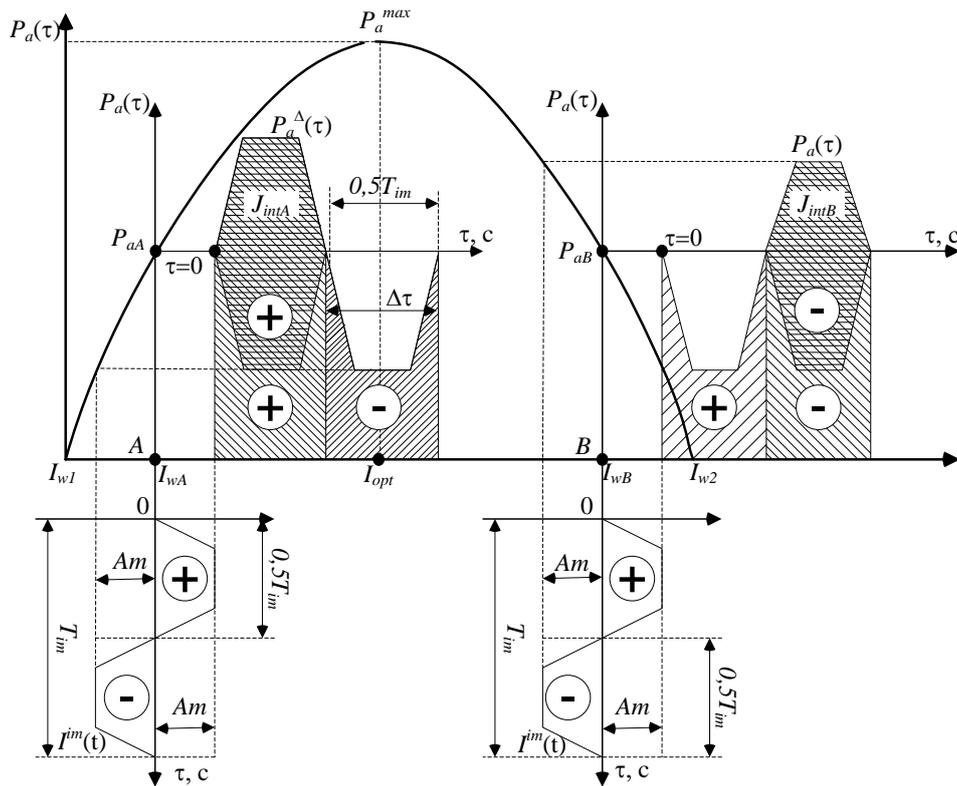


Рис. 3. Принцип формирования интегральной оценки на тестирующее воздействие $\Psi_0(\tau)$

С момента начала тестирующего воздействия $\tau = 0$ вычисляется интегральная оценка отклика процесса на тестирующее воздействие в соответствии с выражением

$$J_{int}^A = \int_0^{T_{im}} P_a^\Delta(\tau) \cdot \Psi_0(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где J_{int}^A – определяемая интегральная оценка при $I_{wA} < I_{opt}$, а J_{int}^B – оценка при $I_{wB} > I_{opt}$; I_{opt} – оптимальное значение тока дуги, при котором обеспечивается значение максимальной мощности $P_a^{max}(\tau)$ (см. рис. 3).

Следовательно, справедливы условия:

$$\begin{aligned} &\text{если } I_w(\tau = 0) = I_{wA} \leq I_{opt}, \text{ то } J_{int} \geq 0, \\ &\text{если } I_w(\tau = 0) = I_{wB} \geq I_{opt}, \text{ то } J_{int} < 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где J_{int} – интегральная оценка; $I_w(\tau = 0)$ – начальное значение рабочего тока дуги при $\tau = 0$.

Знак интегральной оценки определяет начальное значение отклонения управляющего параметра силы тока от текущего оптимального значения. Статическая характеристика ЭТА при переключении ступеней напряжения (см. рис. 1) или ступени реактора, и особенно при различном действии технологических возмущений, смещается и возникает (дрейф). Уникальной отличительной особенностью ортогональной функции Уолша является способность компенсировать влияние различных возмущений на величину интегральной оценки оптимизируемого параметра процесса в соответствии с планом возмущений, формируемых функцией Уолша [1]. В общем случае в зависимости от степени компенсируемого полинома функция Уолша содержит определенное количество равных интервалов времени в соответствии с выражением

$$T_{im} = m \cdot \Delta\tau \text{ и } \Delta\tau = (0,9 \div 1,3)(T_0 + \tau_{lag}), \quad (6)$$

где $m = 2^{n+1}$ – количество равных интервалов, с; $\Delta\tau$ – интервал времени, с; T_0 и τ_{lag} – соответственно постоянная времени и время запаздывания, характеризующие динамические свойства оптимизируемого процесса, с.

Порядок полинома определяется ориентировочно по экспериментальной траектории изменения мощности дуги на интервале времени T_{im} по числу экстремумов. Так, в случае монотонного смещения статической характеристики для мощности дуги (см. рис. 1) по сложной траектории $P_s(\tau) = a_1\tau$, имеющей вертикальную $\beta\tau$ и горизонтальную $\alpha\tau$ составляющие для достоверного определения J_{int} при $n = 1$ следует использовать функцию $\Psi_1(\tau)$, содержащую четыре отрезка $\Delta\tau$: $\Psi_1(\tau) = \{+1; -1; -1; +1\}$. Изображение тестирующих функций Уолша представлено на рис. 4. На рис. 5 показан физический принцип компенсации влияния линейного возмущения на интегральную оценку на интервале времени T_{im} . Функция $\Psi_n(\tau)$ может быть получена из $\Psi_{n-1}(\tau)$ с использованием свойств осевой или центральной симметрий в зависимости от степени полинома.

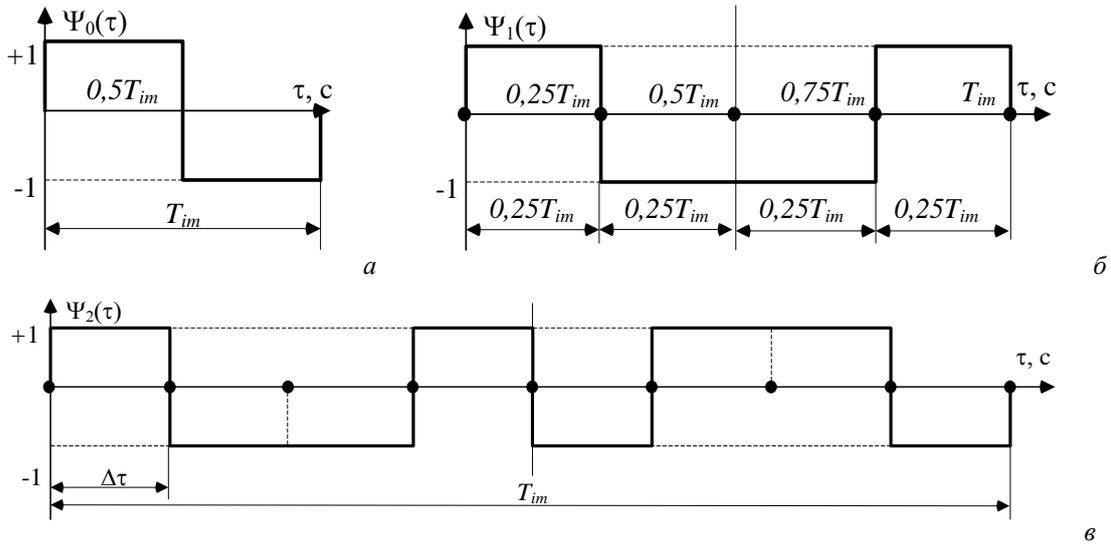


Рис. 4. Изображение тестирующих функций: а – $\Psi_0(\tau)$; б – $\Psi_1(\tau)$; в – $\Psi_2(\tau)$

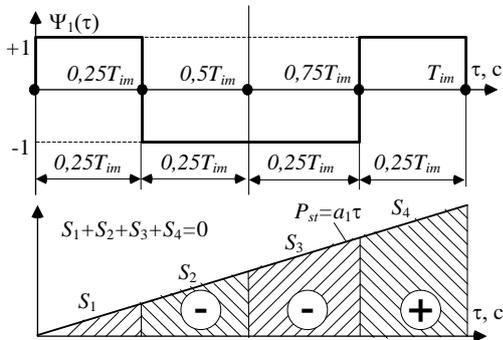


Рис. 5. Принцип компенсации влияния линейного возмущения на интегральную оценку

Использование операции интегрирования при определении интегральной оценки дополнительно снижает погрешность от воздействия высокочастотного сигнала мощности дуги и активной мощности. Если в окрестности экстремума статической характеристики в пределах разрешенной зоны работы оптимизационного контура принять вид статической функции близкий к параболическому, погрешность при этом не превышает 4-5%, то существует пропорциональная зависимость вида

$$J_{int} = K_{pr} (I_{opt} - I_w(\tau)) = K_{pr} \cdot \Delta I_w(\tau), \quad (7)$$

где $\Delta I_w(\tau) = K_{sp} \cdot \Delta\tau_w$; K_{sp} – скорость перемещения электрода фазы; $\Delta\tau_w$ – время перемещения электрода для достижения оптимальной силы тока.

Следовательно, при постоянной скорости перемещения электрода для достижения оптимальной силы тока получим

$$\Delta\tau_w = \frac{J_{int}}{K_{pr} \sigma(\tau) K_{sp}}, \quad (8)$$

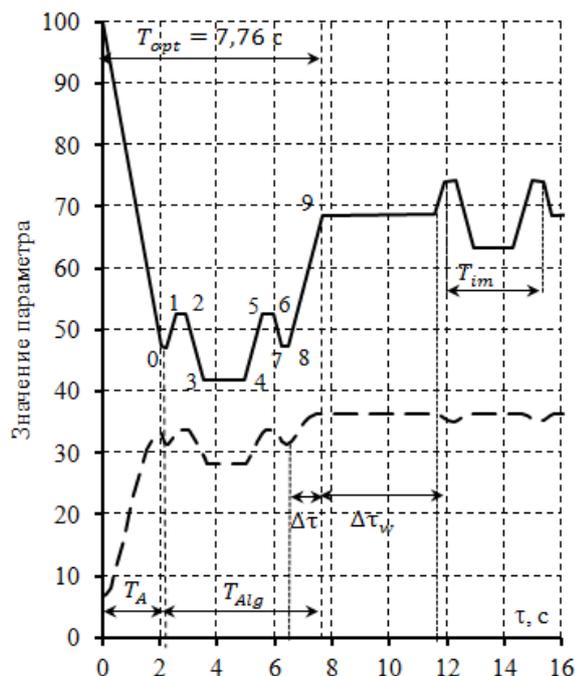
где K_{pr} – коэффициент пропорциональности, определяемый расчетным или экспериментальным путем, являющийся параметром настройки САОУ для производственного процесса.

Результаты моделирования

В соответствии с экстремальным видом зависимости для мощности дуги при выбранной ступени напряжения мощность, выделяемая в дуге, определяющая эффективность рабо-

ты ЭТА, достигается при разных рабочих токах I_{w1} и I_{w2} (см. рис. 1). Режим работы ЭТА на более коротких, но устойчивых дугах при I_{w2} является более затратным, но пользуется у технологов большим предпочтением. Поэтому реализация энергосберегающего оптимального режима управление электрическим режимом целесообразна.

В программном обеспечении предусмотрено условие: каждый раз при зажигании дуги при значении тока короткого замыкания стабилизирующий контур переводит режим в зону $I_{w1} - I_{opt}$ при I_{w1} . В этом случае поисковый режим САΟΥ в диапазоне $I_{w1} \leq I_w(\tau) \leq I_{opt}$ обеспечивает эффективное использование подводимой к ЭТА электрической энергии.



— Сила тока, кА — — Мощность дуги, МВт

Рис. 6. Расчетные траектории изменения мощности и силы тока дуги во времени в процессе поискового режима в САΟΥ электрическим режимом при $U = 1291$ В и $J_{int} = J_{I_{w1}}$ в ДСП 180

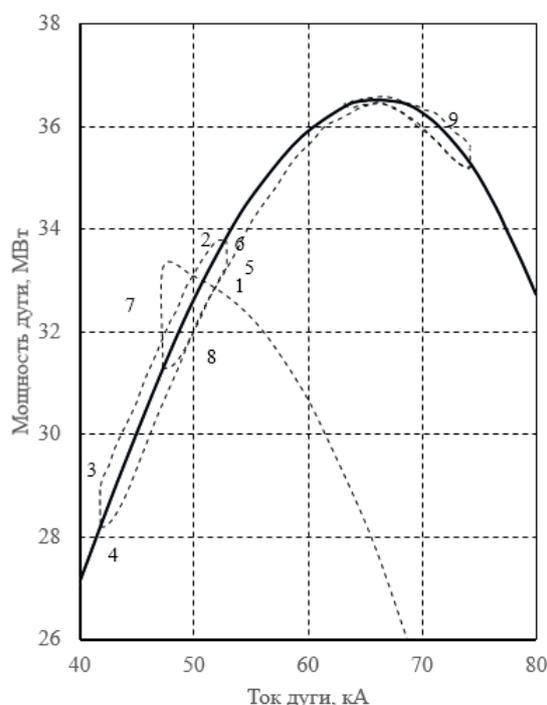


Рис. 7. Траектории поискового процесса функционирования способа динамической коррекции программно-заданного энергетического режима ДСП 180: 1 – траектория изменения текущего значения мощности дуги при работе системы $ArCOS$ после зажигания дуги; 2 – траектория поискового режима при работе предлагаемого способа

Расчетные траектории изменения мощности и силы тока дуги во времени при использовании предлагаемого способа энергосберегающего оптимального управления электрическим режимом ЭТА для ступени напряжения 1291 В при $K_{sp} = 17,8 \frac{kA}{c} \left(80 \frac{mm}{c} \right)$; $A_m = 5,31$ кА; $T_{im} = 4$ с и при условии обеспечения $J_{int} = J_{I_{w1}}$ представлены на рис. 6 с момента зажигания дуги для условий работы ДСП 180 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и на рис. 7 – траектории поискового процесса функционирования способа динамической коррекции программно-заданного энергетического режима ДСП 180.

При функционировании рассматриваемой системы вывод процесса на оптимальный режим обеспечивается с момента зажигания дуги за время $T_{opt} = 7,76$ с, где время определяется как $T_{opt} = T_A + T_{Alg}$, T_A – время работы системы $ArCOS$, T_{Alg} – время работы САΟΥ.

После завершения полного цикла поискового времени воздействия рабочего времени движения электрода в системе предусмотрена временная выдержка перед очередным циклом поиска, если оптимизируемый процесс находится в разрешенной зоне работы САΟΥ.

Заключение

1. Предложенная двухконтурная система автоматической оптимизации управления энергетическим режимом ЭТА может быть программно без значительных капитальных за-

трат реализована на промышленных печах, в которых использованы микропроцессоры типа SIMATIC или отечественные контроллеры.

2. При исследовании эффективности САОУ на опытном компьютерном стенде система обеспечивает снижение удельных затрат электрической энергии на $1,5 \div 2 \%$ за счет рационального управления электрическим режимом ЭТА.

3. Использование энергосберегающей систем автоматического управления энергетическими режимами позволяет за счет определения и поддержания максимальной электрической мощности, выделенной в дуге, обеспечить максимальную часовую производительность ЭТА и минимальное удельное потребление электрической энергии при минимальной себестоимости готовой продукции, получаемой на ЭТА.

Список использованных источников

1. Бигеев, А.М. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали.* / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.
2. Логунова, О.С. *Технология исследования информационных потоков на металлургическом предприятии* / О.С. Логунова // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2008. – № 3. – С. 32-36.
3. Logunova, O.S. *Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes* // O.S. Logunova, I.I. Matsko, I.A. Posohov, S.I. Luk'ynov // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Т. 74. – № 9-12. – С. 1407-1418.
4. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. *Integrated system structure of intelligent management support of multi-stage metallurgical processes* // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 5 (45). – С. 50-55.
5. *Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности* / М.Ю. Рябчиков [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 4. – С. 65-69.
6. *Обобщенная методика диагностирования механического и электрического оборудования металлургических агрегатов* / С.И. Лукьянов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 38-42.
7. *Парсункин, Б.Н. Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах* / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. – 312 с.
8. *Ефроймович, Ю.Е. Оптимальные электрические режимы дуговых сталеплавильных печей* / Ю.Е. Ефроймович. – М.: Металлургиздат, 1956. – 108 с.
9. *Марков, Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечей* / Н.А. Марков. – М.: Энергия, 1975. – 130 с.
10. *Обработка стали на агрегатах печь-ковш* / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк: ООО «Юго-Восток ЛТД», 2003. – 300 с.
11. *Казакевич, В.В. Системы автоматической оптимизации* / В.В. Казакевич, А.Б. Родов. – М.: Энергия, 1997. – 288 с.
12. *Лапшин, И.В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи* / И.В. Лапшин. – М.: МИСиС, 2002. – 157 с.
13. *Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь* / А.А. Николаев [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 2 (50). – С. 90-100.
14. *Ячиков, И.М. Компьютерное моделирование и комплексное изучение свойств и поведения высокотемпературных металлургических расплавов* / И.М. Ячиков, Ю.В. Кочержинская // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – № 2 (7). – С. 2-8.

Материал поступил в редакцию: 12.03.2017

Материал принят к публикации: 25.04.2017

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

OPTIMAL CONTROL OF ENERGY MODE IN ELECTRIC ARC UNITS

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ahkmetov U.B., Chistyakov D.V.

Abstract: The purpose of the study is to ensure the functioning of the electric arc technological units, such as an electric arc furnace and a ladle furnace in a power saving mode. The authors propose an energy-saving noise-immune method of search the intelligent optimal control of the electrical mode for arc technological units. The method is characterized by division in time of searching testing interaction to a process with the subsequent formation of a working control according to the integral evaluation of the response of the optimized process to the testing action. For the construction of a new automatic control method, the authors review: the structure of control loops for electric arc technological units, the functioning of the method for controlling energy regimes, and the results of method modeling on the example of electric arc furnace. The noise immunity of the method is provided by forming a plan of testing actions in accordance with the

unique properties of the orthogonal Walsh function. Using the energy-saving systems for automatic control of energy modes of arc technological units makes it possible to ensure the maximum hourly capacity of the unit by determining and maintaining the maximum electric power allocated in the arc and to ensure the minimum consumption of electric energy with the minimum cost of finished products, which are obtained using electric arc process units.

Keywords: Power is generated in the arc; search and operating control; Walsh function; integrated assessment.

References

1. Bigeev A.M. *Metallurgiya stali. Teoriya i tehnologiya plavki stali*. Magnitogorsk: MGTU, 2000, 544 p. (In Russ.)
2. Logunova O.S. *Informatsionnyie tehnologii v proektirovani i proizvodstve*, 2008, no 3, pp. 32-36. (In Russ.)
3. Logunova O.S. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, vol. 74, no 9-12, pp. 1407-1418.
4. Logunova O.S. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no 5 (45), pp. 50-55. (In Russ.)
5. M.Yu. Ryabchikov [end ets.]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no 4, pp. 65-69. (In Russ.)
6. Lukyanov S.I. [end ets.]. *Izvestiya vysshih uchebnyih zavedeniy. Elektromehaniika*, 2009, no 1, pp. 38-42. (In Russ.)
7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya vyiplavkoy stali v elektrodugovyih pechah*. Magnitogorsk: Iz-vo MGTU im. G.I. Nosova, 2012, 312 p. (In Russ.)
8. Efroyimovich Yu.E. *Optimalnyie elektricheskie rezhimy dugovyih staleplavilnyih pechey*. Moscow: Metallurgizdat, 1956, 108 p. (In Russ.)
9. Markov N.A. *Elektricheskie tsepi i rezhimy dugovyih elektropechey*. Moscow: Energiya, 1975, 130 p. (In Russ.)
10. Dyudkin D.A., Bat S.Yu., Grinberg S.E. i dr. *Obrabotka stali na agregatah pechkovsh*. Donetsk: ООО «Yugo-Vostok LTD», 2003, 300 p. (In Russ.)
11. Kazakevich V.V. *Sistemy avtomaticheskoy optimizatsii*. Moscow: Energiya, 1997, 288 p. (In Russ.)
12. Lapshin I.V. *Avtomatizatsiya tehnologicheskikh protsessov dugovoy staleplavilnoy pechi*. Moscow: MISiS, 2002, 157 p. (In Russ.)
13. Nikolaev A.A. [end ets.]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no 2 (50), p. 90-100. (In Russ.)
14. Yachikov I.M., Kocherzhinskaya Yu.V. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferah* [Software of systems in the industrial and social fields], 2015, no 2 (7), p. 2-8. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ:

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Ахметов Урал Борисович – канд. техн. наук, директор ООО «Научно-производственный центр «Урал». E-mail: ural@info-com.ru

Чистяков Дмитрий Владимирович – канд. соц. наук, исполнительный директор ЗАО «КонсОМ СКС».

ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Математическое обеспечение способа оптимального управления энергетическим режимом электродуговых агрегатов / Б.Н. Парсункин, У.Б. Ахметов, С.М. Андреев, Д.В. Чистяков // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2017. – Т.5. – №1. – С. 8-15.

Parsunkin, B.N., Andreev, S.M., Ahmetov, U.B and Chistyakov D.V. (2017) Optimal control of energy mode in electric arc units. Software of systems in the industrial and social fields, 5 (1): 8-15.