

УДК 681.518

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Дмитриевский Б.С., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»

Башкатова А.В., аспирант кафедры «Информационные процессы и управление» (atom1299@yandex.ru)

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
(392000, Россия, Тамбов, ул. Интернациональная, 33)

Аннотация. В статье представлен один из возможных вариантов формирования математической модели дуговой сталеплавильной печи. С целью построения модели, наиболее точно отражающей поведение объекта управления – дуговую сталеплавильную печь, изучены работы по данной тематике и сформированы основные принципы построения. Они состоят в том, что в качестве основы использована схема замещения электрической цепи установки, а для получения математической модели дуги взято нелинейное дифференциальное уравнение Касси для проводимости, получившее наибольшую популярность среди исследователей. Актуализация модели обеспечена расчетами параметров электрической цепи на вторичной стороне низкого напряжения трансформатора и использованием данных, представленных в работах отечественных и зарубежных исследователей. Для исследования поведения объекта в разные моменты времени технологического процесса взяты различные значения «постоянной времени» проводимости дуги. Это позволило учесть нестационарность состояния приэлектродных областей, подверженных влияниям внешних возмущающих воздействий, а также изменениям температуры, давления и состава газовой смеси в ходе технологического процесса. Такой подход дал возможность сформировать целостную картину поведения объекта в условиях нестационарного состояния области горения дуг на разных этапах плавки, оценить возможные параметры регулирования и определить требования к системе управления. Сформирована базовая структура модели трехфазной дуговой печи переменного тока. Все необходимые расчеты элементов цепей и моделирование производились с использованием пакета MATLAB Simulink. Структурная схема включает в себя источник переменного напряжения, активные сопротивления и индуктивности трансформатора на вторичной стороне и короткой сети, модель электрической дуги переменного тока. Модель использована для анализа динамических характеристик дуги как электрического объекта, а именно зависимости напряжения от тока – вольтамперной характеристики (ВАХ). Форма ВАХ определяет характер горения дуги, область существования, устойчивость и, соответственно, качество управления. Исследованы ВАХ при различных значениях напряжений на вторичной стороне трансформатора и длинах дуг, а также для разных значений «постоянной времени проводимости дуги». Модель использована и для анализа статических характеристик. Показано, что зависимости длины дуги от тока для разных напряжений ступеней трансформатора проявляют нелинейный характер. Даны рекомендации по выбору управляющих воздействий и построению систем управления для разных этапов плавки. Например, на начальной стадии плавления система управления должна выполнять задачи минимизации числа обрывов при условии незначительной области существования дуги и ограничивать значение вводимой мощности. Результаты моделирования показывают, что нестационарность процесса приводит к необходимости применения адаптивных систем управления, способных подстраиваться под непрерывно изменяющееся состояние объекта.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, математическая модель, электрическая дуга, объект управления, структурная схема, схема замещения, статическая характеристика, динамическая характеристика.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-571-577

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного производства выполнение требований эффективного управления процессом выплавки возможно только при наличии математической модели, адекватно описывающей процессы, происходящие в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Такая модель способна предоставить не только всю необходимую информацию для анализа входных и выходных сигналов возмущающих и управляющих воздействий, но способствовать оперативному построению прогнозов поведения объекта при определенной стратегии управления.

На основе анализа литературных источников [1 – 20] составлена структурная схема рассматриваемой печи

как объекта управления, представленная на рис. 1. Здесь U' – напряжение на вторичной стороне трансформатора; L_{arc} – длина дуги; U_f – фазное напряжение; I_{arc} – сила тока дуги; ΔL_{arc} – случайные возмущения по изменению длины дуги; $\Delta Q(\beta)$ – возмущения по изменению «постоянной времени проводимости дуги», вызванные изменением состояния области горения дуги; B – внешние неконтролируемые возмущения, связанные особенностями конструктивного исполнения электрических цепей, возмущениями со стороны питающих подстанций и т. п.

Следует отметить, что дуговые печи, как агрегаты расплавления, напрямую зависят от параметров электрической дуги, а именно мощности, определяющей

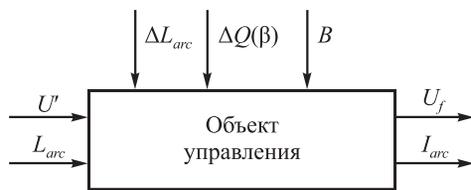


Рис. 1. Структурная схема дуговой сталеплавильной печи как объекта управления

Fig. 1. Structural diagram of EAF as a control object

тепловой режим установки. При этом сам процесс расплавления включает в себя несколько стадий, требующих различных значений вводимой мощности или соответствующих электрических режимов. Управляющими воздействиями являются изменение подаваемого на печь напряжения и межэлектродного пространства – длины дуги.

Исходя из предложенной структуры, можно заключить, что моделирование невозможно без получения электрических характеристик физических процессов, происходящих в ДСП.

АКТУАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДУГИ

Для получения необходимых характеристик ДСП используем метод, основанный на применении схем замещения электрической цепи трехфазной дуги без нулевого провода. Также введем следующее допущение: значения активных сопротивлений, а так же собственных индуктивностей элементов цепи рассчитываются независимо и принимаются постоянными для всех этапов плавки.

В формализованном виде схему можно представить следующим образом [1]:

$$\begin{cases} U'_1 \sin \omega t - U_{arc1} - U_0 = r_{ks1} i_{arc1}(t) + L_{ks1} \frac{di_{arc1}(t)}{dt}; \\ U'_2 \sin(\omega t - 120^\circ) + U_{arc2} - U_0 = r_{ks2} i_{arc2}(t) + \\ + L_{ks2} \frac{di_{arc2}(t)}{dt}; \\ U'_3 \sin \omega t - U_{arc3} - U_0 = r_{ks3} i_{arc3}(t) + L_{ks3} \frac{di_{arc3}(t)}{dt}; \\ i_{arc1}(t) + i_{arc2}(t) + i_{arc3}(t) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где U'_1, U'_2, U'_3 – приложенное фазное напряжение; $U_{arc1}, U_{arc2}, U_{arc3}$ – напряжение дуги; U_0 – мгновенное значение напряжения смещения потенциала нулевой точки трехфазной дуги; $r_{ks1}, r_{ks2}, r_{ks3}$ – суммарное активное сопротивление электрической цепи; $L_{ks1}, L_{ks2}, L_{ks3}$ – суммарные индуктивности электрической цепи; i_1, i_2, i_3 – сила тока дуги.

Согласно экспериментальным исследованиям, для расчета напряжения дуги предложено следующее выражение [1]:

$$U_{arc} = \alpha + \beta I, \quad (2)$$

где α – сумма анодного и катодного падения напряжений; β – градиент потенциала в столбе дуги, который является функцией состава газа, его температуры и давления.

Наибольшую сложность использования схем замещения при моделировании представляет математическое описание поведения электрической дуги. Зачастую дуга представлена переменным активным сопротивлением. Данное допущение возможно и активно используется ввиду упрощения расчетов, однако такой подход не способен учесть нелинейные свойства дуги.

Широкую популярность у ряда исследователей получили теоретические модели проводимости электрической дуги. К ним можно отнести и нелинейное дифференциальное уравнение Касси [2, 9]:

$$\frac{dg_{arc}(t)}{dt} = \frac{1}{\Theta} \left(\frac{i_{arc}^2}{U_{arc}^2 g_{arc}} - g_{arc} \right), \quad (3)$$

где Θ – постоянная времени проводимости дуги; i_{arc} – мгновенное значение силы тока дуги; U_{arc} – действующее значение напряжения на дуге; g_{arc} – проводимость дуги.

Модели, реализованные на основе уравнения Касси, способны предоставить необходимую информацию с учетом нелинейных свойств дуги и исследовать разные периоды ее горения.

Имея общую схему замещения, необходимо получить все необходимые численные значения параметров электрического контура объекта. Основываясь на литературных источниках [4 – 7, 18 – 20], произведем расчет активных и реактивных сопротивлений.

Активное сопротивление короткой сети r_{ks} представляет собой суммарное сопротивление участков цепи и может быть рассчитано по следующим формулам:

$$r_{ks} = R_{ch} + R_{gk} + R_{ich} + R_{ke} + R_e, \quad (4)$$

где R_{ch} – сопротивление шины; R_{gk} – сопротивление гибкого кабеля; R_{ich} – сопротивление трубошин; R_{ke} – сопротивление контакта «графитированный электрод» – «электрододержатель»; R_e – сопротивление электродов.

Сопротивление проводника может быть рассчитано по формуле [6]

$$R = \rho_0 [1 + \alpha_r (T - T_0)] \frac{l}{S}, \quad (5)$$

где R – сопротивление проводника; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление при $T = 293$ К; α_r – температурный коэффициент; T – рабочая температура; $T_0 = 293$ К; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника. Так как каждый из участков

можно представить как элементарный проводник, при расчетах допускается использовать формулу (5).

Поскольку общая индуктивность цепи последовательных элементов может быть рассчитана как сумма индуктивностей каждого элемента, расчет индуктивности короткой сети получим, исходя из следующей формулы [6]:

$$L_{ks} = L_{chp} + L_{rch} + L_{gk} + L_{ich} + L_e, \quad (6)$$

где L_{chp} – индуктивность шинного пакета; L_{rch} – индуктивность участка расшихтовки; L_{gk} – индуктивность гибкого кабеля; L_{ich} – индуктивность трубошины; L_e – индуктивность электрода.

Проведя все необходимые расчеты, получаем численные значения сопротивлений и индуктивностей всех элементов цепи.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Структура модели трехфазной дуговой печи переменного тока представлена на рис. 2. Моделирование производилось с использованием пакета программ MATLAB Simulink.

Схема, представленная на рис. 2, а, включает в себя следующие элементы:

- источник переменного напряжения «Th-PhSource2», формирующий заданное напряжение на вторичной стороне трансформатора;
- блоки активных сопротивлений и индуктивностей трансформатора на вторичной стороне и короткой сети, объединенные в блок;
- модели электрической дуги переменного тока для каждой фазы – «D_A1», «F_B» и «F_C», которые более подробно представлены на рис. 2, б.

Схема на рис. 2, б включает необходимые для моделирования электрических цепей блоки пакета MATLAB Simulink:

- «V1» – измеритель напряжения, позволяющий получить численные значения параметра в текущий момент времени;
- «C3» – источник тока, необходимый для преобразования значений, полученных в модели дуги «Funk»;
- «R» – развязывающий резистор, согласующий последовательность соединения блоков.

Также схема включает модель электрической дуги «Funk», реализующую вольт-амперную характеристику объекта исследования, и блок анализа полученных дан-

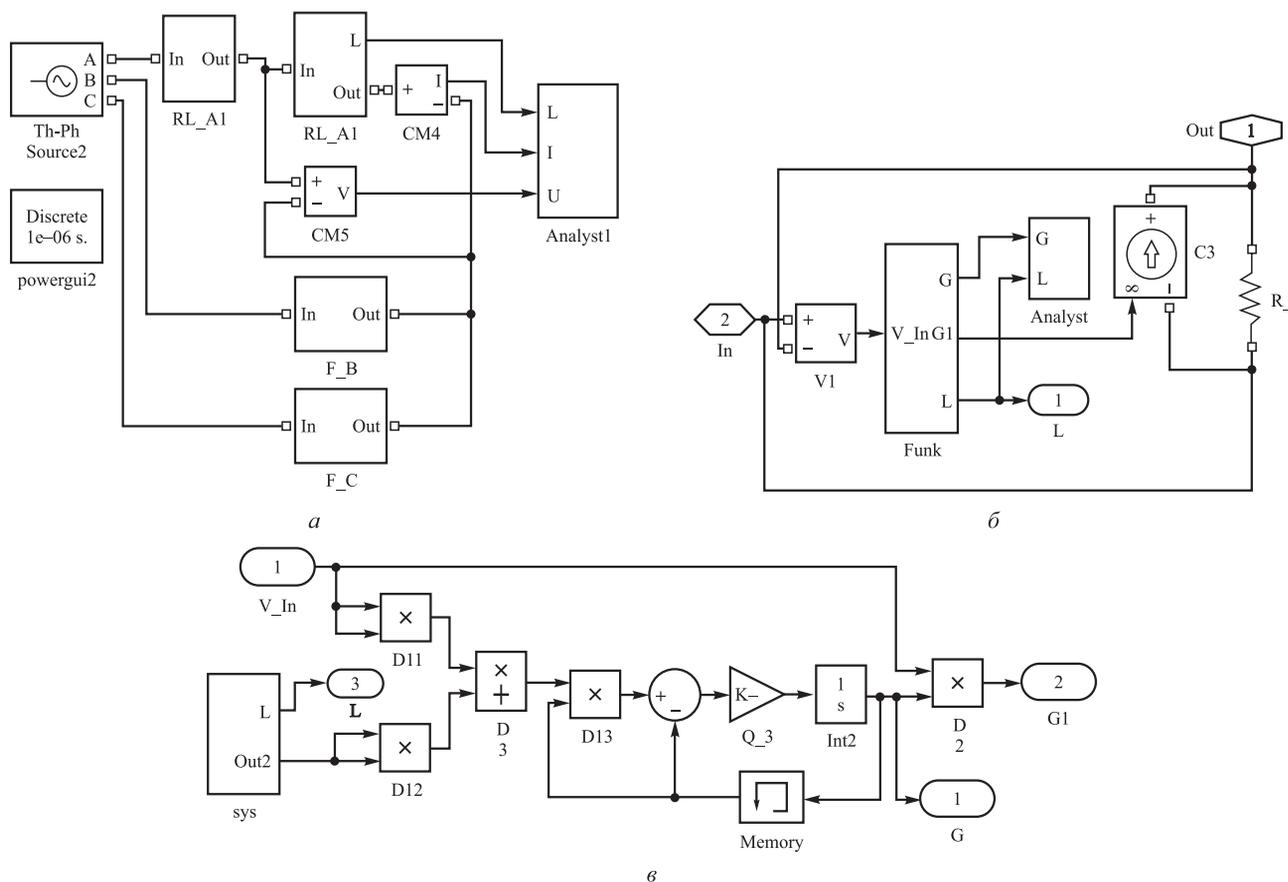


Рис. 2. Структурная схема дуговой печи в пакете MATLAB Simulink: а – общая схема модели ДСП; б – схема блока «Arc_x»; в – схема блока «Funk»

Fig. 2. Block diagram of the arc furnace at MATLAB Simulink package: а – general scheme of the model of EAF; б – diagram of «Arc_x» block; в – diagram of «Funk» block

ных «Analyst», позволяющий сформировать графики, необходимые для дальнейшего анализа.

Рис. 2, в отражает внутреннее содержание модели «Func», построенной согласно уравнению Касси, и включает блоки математических операций суммирования, интегрирования, дифференцирования и др.

Для получения наиболее полной картины поведения объекта в различные моменты времени рассмотрим как статические, так и динамически характеристики дуговой печи, а именно электрической дуги переменного тока.

Одной из наиболее важных динамических характеристик дуги, как электрического объекта, является зависимость напряжения от тока – вольтамперная характеристика (ВАХ). Исходя из формы ВАХ, можно говорить о характере горения дуги, области существования и ее устойчивости, что напрямую влияет на качество управления [13 – 16].

Построим ВАХ для разных значений напряжений на вторичной стороне трансформатора и длин дуг, изме-

нив при этом каждый из параметров на $\pm 10\%$ от номинального режима. Графики полученных характеристик представлены на рис. 3.

Как и все объекты управления, ДСП подвержены влиянию внешних неконтролируемых возмущающих воздействий. И если изменение геометрии подэлектродного пространства имеет стохастический характер, то для «постоянной времени» проводимости дуги выявлены закономерности и получены численные значения для разных этапов плавки. На рис. 4 отражены осцил-

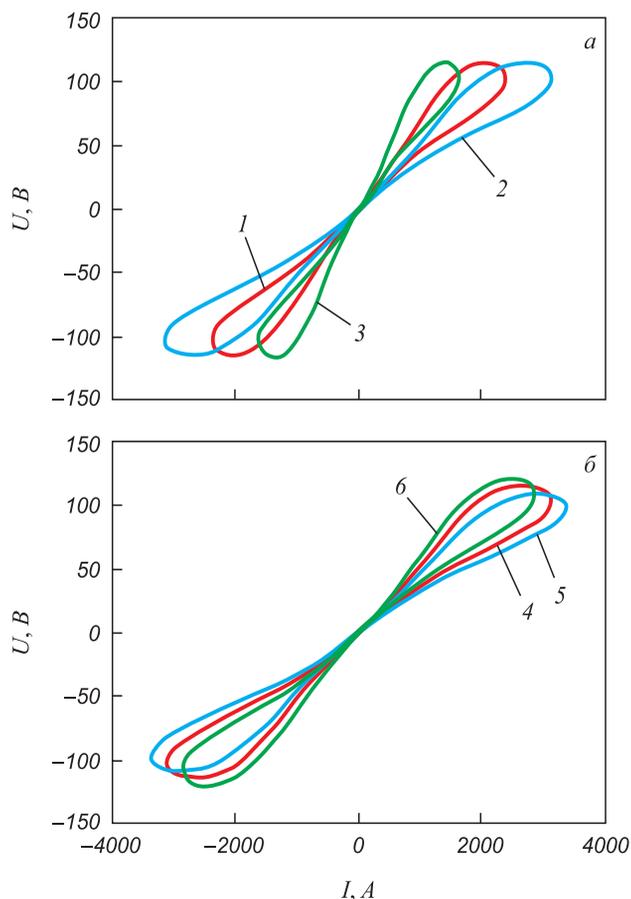


Рис. 3. Вольтамперные характеристики:
 а – для разных значений напряжения на вторичной стороне трансформатора: 115 (1), 127 (2) и 104 В (3);
 б – для разных значений длин дуг: 0,020 (4), 0,018 (5) и 0,022 м (6)

Fig. 3. Current-voltage characteristics
 а – for different voltage values on the secondary side of the transformer: 115 (1), 127 (2) and 104 V (3);
 б – for different arc lengths: 0.020 (4), 0.018 (5) and 0.022 m (6)

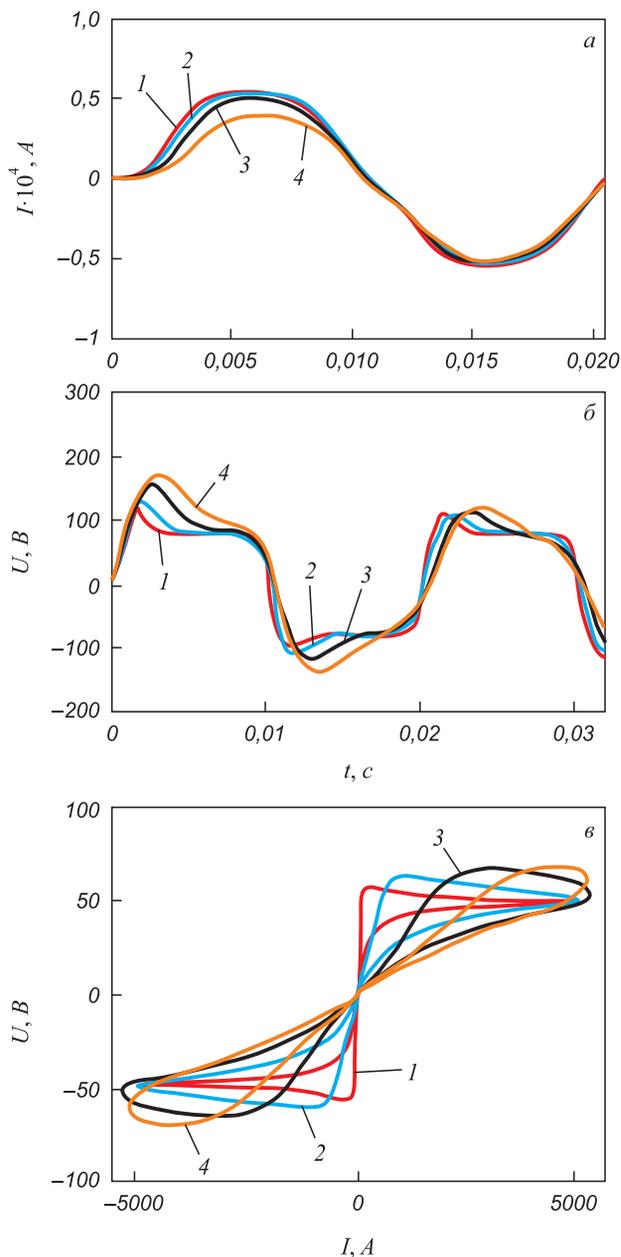


Рис. 4. Осциллограммы тока (а), напряжения (б) и ВАХ (в) дуги для разных значений «постоянной времени» проводимости дуги, с:
 1 – 0,00015; 2 – 0,0006; 3 – 0,002; 4 – 0,005

Fig. 4. Oscillograms of current (а), arc voltage (б) and current-voltage characteristics of arc (в) for different values of the “time constant” of the arc conductivity, s:
 1 – 0.00015; 2 – 0.0006; 3 – 0.002; 4 – 0.005

лограммы тока и напряжения, а также построенные на их основе динамические ВАХ для разных значений «постоянной времени проводимости дуги».

В процессе построения использовано несколько значений «постоянной времени», численные данные для которых взяты из работ [3, 8, 14 – 16]. Каждое из значений характеризует разные этапы плавки.

Так, на начальной стадии расплавления, когда процесс ионизации затруднен, значение «постоянной времени проводимости дуги» может быть принято равным 0,00015 с. Для стадий окисления и рафинирования, характеризующихся большей мощностью и меньшей степенью охлаждения дуг, значение «постоянной времени проводимости дуги» принимают равными 0,002 с и 0,005 с соответственно. В момент окончания плавки, когда печь работает на «открытых» дугах и отбор тепла в окружающую среду увеличивается, «постоянную времени проводимости дуги» принимают равной 0,0006 с.

Особый интерес исследования ДСП состоит в получении статических характеристик – зависимостей в установившемся режиме между входными и выходными параметрами (рис. 5).

Проверка адекватности разработанной модели проводилась путем сравнения полученных графиков и графиков, представленных в работах [1 – 20]. Установлено качественное и количественное (с приемлемой для практики точностью 15 %) совпадение результатов.

Выводы

Исходя из графиков, представленных на рис. 3, можно отметить, что наибольшее отклонение ВАХ произошло при изменении напряжения на вторичной стороне трансформатора. Однако для оперативного регулирования данный параметр не подходит ввиду технологических особенностей оборудования. В свою очередь, изменение длины дуги способно наиболее точно поддерживать заданный электрический режим и технологически проще реализуемо.

На осциллограммах, представленных на рис. 4, видно, что на начальном этапе горения ВАХ имеют ярко выраженные участки зажигания (пики напряжения зажигания) и потухания в каждом полупериоде, что свидетельствует о неустойчивом горении дуг. В свою очередь на этапах окисления, а далее и рафинирования формы ВАХ становятся более гладкими, а пики напряжения, необходимые для повторного зажигания дуги, становятся менее выраженными. Таким образом, можно сделать вывод, что система управления на начальной стадии должна выполнять задачи минимизации числа обрывов при условии незначительной области существования дуги, т. е. ее возможной длины, а также необходимости ограничивать значение вводимой мощности.

Как видно из графиков, показанных на рис. 5, зависимости длины дуги от тока для разных напряжений

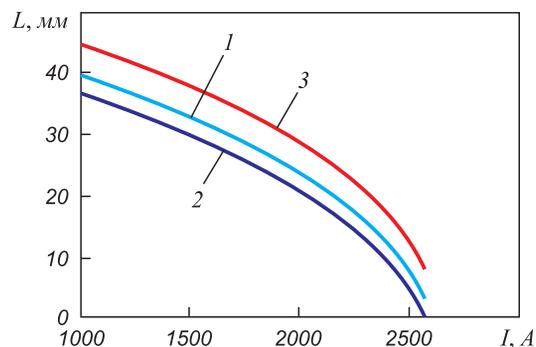


Рис. 5. Зависимость длины дуги от тока, В:
1 – 110; 2 – 104; 3 – 120

Fig. 5. Arc length vs current, V:
1 – 110; 2 – 104; 3 – 120

ступеней трансформатора имеют нелинейный характер. Коэффициент передачи объекта по току может быть вычислен только для определенных значений тока и длины дуги как тангенс угла наклона касательной в этой точке. Стоит так же заметить, что коэффициенты передачи объекта напрямую зависят от градиента потенциала в столбе дуги, который непрерывно меняется в течение всех этапов плавки.

Проведенный в работе анализ показал, что ДСП относится к сложным нестационарным технологическим объектам, проявляющим нелинейный характер. Предложенная модель позволяет провести анализ ДСП, как объекта управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др. / Под ред. А.Д. Свенчанского / – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. Gelada J. Electrical analysis of the steel melting arc furnace // Iron and Steel Engineer. 1993. Vol. 70. No. 5. P. 35 – 39.
3. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: Учеб. пособие / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храпшин, А.А. Мурзинов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 235 с.
4. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки: Учебник для вузов / Под ред. В.С. Чередниченко. – 3 изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
5. Ozgun O., Abur A. Development of an arc furnace model for power quality studies // Power Engineering Society Summer Meeting. 1999. No. 1. P. 507 – 511.
6. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: Справочник / Я.Б. Данцис, Л.С. Кацевич, Г.М. Жилов и др. / Под ред. Я.Б. Данциса. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
7. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для бакалавров. – 12 изд., исправ. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2014. – 701 с.
9. Cassie A.M. A new theory of arc rupture and circuit Severity // CIGRE. 1939. No. 102. P. 1 – 14.
10. Bowman B., Kruger K. Arc Furnace Physics. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009. – 245 p.

11. Кацевич Л.С. Расчет и конструирование электрических печей. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 440 с.
12. Дуговые электроды: Учеб. пособие / А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 204 с.
13. Колчеганов Р.В., Купова А.В., Дерюжкова Н.Е. Модель дуговой сталеплавильной печи в MatLab // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5 – 1. С. 50 – 51.
14. Пентегов И.В. Математическая модель столба динамической электрической дуги // Автоматическая сварка. 1976. № 6. С. 8 – 12.
15. Richardson G.D. Physical Chemistry of Melts in Metallurgy. – N.Y.: Acad. Press. 1974. Vols. 1, 2.
16. Ting W., Wennan S., Yao Z. A new frequency domain method for the harmonic analysis of power system with arc furnace // 4th international conference on advances in power system control. 1997. P. 552 – 555.
17. Cavallini A., Montanari G.C., Pitti L., Zaninelli D. ATP simulation for arc furnace flicker investigation // ETAP. 1995. Vol. 5. No. 3. P. 235 – 241.
18. Collantes-Bellido R., Gomez T. Identification and modeling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation // IEEE Transactions on Power Delivery. 1997. Vol. 12. No. 4. P. 1812 – 1817.
19. Heydt G.T., O'Neill-Carrillo E., Zhao R.Y. The modeling of nonlinear loads as chaotic systems in electric power engineering // Proc. of the IEEE/PEC International Conference on Harmonics and Quality of Power. Las Vegas. 1996. P. 704 – 711.
20. Higgs R.W. Sonic signature analysis for arc furnace diagnostics and control // Proc. of Ultrasonics Symposium. Milwaukee. 1974. P. 653 – 663.

Поступила в редакцию 9 апреля 2019 г.

После доработки 11 июня 2019 г.

Принята к публикации 14 июня 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 7, pp. 571–577.

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRICAL PARAMETERS OF AC-EAF

B.S. Dmitrievskii, A.V. Bashkatova

Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russia

Abstract. The article presents one of the possible options of mathematical model formation of an electric arc steel-making furnace (EAF). A lot of reports on this subject were studied in order to make a model that most accurately reflects the control object behavior (for EAF). The basic building principles demonstrate the fact that the primary element is substitution pattern of electric circuit of the installation. Cassie nonlinear differential equation was used to get a mathematical model of an electric arc. This nonlinear differential equation is very popular among the researchers. Model update is provided by calculating the electrical circuit parameters on the secondary side of transformer low voltage and by studying statistics from home and foreign scientists' contributions. Different values of the "time-constant" of arc conductivity were used to analyze the control object behavior at different instants of time. It made it possible to take into account the nonstationarity of the state of electrode sheaths that were influenced by external disturbances, temperature variations, pressure and gas composition in the course of production processes. Such an approach made possible to form an aggregate picture of the control object behavior under the conditions of a nonstationary state of the arc combustion area at different stages of melting; to evaluate possible regulation characteristics and to determine control system requirements. The structural scheme of the model of a three-phase AC-EAF was formed. All necessary calculations of circuit elements and modeling were performed using the MATLAB Simulink package. The block diagram includes AC voltage source, direct-current resistance, and inductance of the transformer on secondary side and a low-voltage circuit, a model of an AC electric arc. The model was used to analyze the dynamic characteristics of electric arc as being an electrical object to show the voltage-dependence of current – current-voltage characteristics. The configuration of current-voltage characteristics determines burning behavior of the arc, existence domain, stability and control quality. Current-voltage characteristics were studied under the conditions of different values of the voltage on the secondary side of transformer and arc length and for different values of the "time-constant arc conductivity". The model was also used to analyze the static characteristics. The dependence of the arc length on the current for different voltage of the transformer steps is nonlinear. Recommendations on the choice of control actions and the construction of control systems for different stages of melting are given. For example at the initial stage of melting, the control system should perform minimization problems of number of breaks

under the condition of an insignificant domain of the arc existence and limit the value of lead-in power. The simulation results show that the nonstationarity of the process leads to the need to use self-organizing control systems capable of adjusting to the continually varying state of the object.

Keywords: electric arc steel-making furnace, mathematical model, electric arc, control object, structural scheme, substitution pattern, static characteristic, dynamic response.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-571-577

REFERENCES

1. Svenchanskii A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. etc. *Elektricheskie promyshlennye pechi: Dugovye pechi i ustanovki spetsial'nogo nagreva* [Electric industrial furnaces: Arc furnaces and special heating installations]. Svenchanskii A.D. ed. Moscow: Energoizdat, 1981, 296 p. (In Russ.).
2. Gelada J. Electrical analysis of the steel melting arc furnace. *Iron and Steel Engineer*. 1993, vol.70, no. 5, pp. 35–39.
3. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov metallurgicheskikh predpriyatii* [Modeling of electrical systems of metallurgical enterprises]. Magnitogorsk: Izdatel'stvo MGTU im. G.I. Nosova, 2012, 235 p. (In Russ.).
4. Cherednichenko V.S., An'shakov A.S., Kuz'min M.G. *Plazmennyye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Plasma electrotechnological installations]. Cherednichenko V.S. ed. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2011, 602 p. (In Russ.).
5. Ozgun O., Abur A. Development of an arc furnace model for power quality studies. *Power Engineering Society Summer Meeting*. 1999, no 1, pp. 507–511.
6. Dantsis Ya.B., Katsevich L.S., Zhilov G.M. etc. *Korotkie seti i elektricheskie parametry dugovykh elektropechei: Spravochnik* [Short networks and electrical parameters of electric arc furnaces: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 320 p. (In Russ.).
7. Egorov A.V. *Elektroplavil'nye pechi chernoi metallurgii* [Electric melting furnaces of metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 280 p. (In Russ.).
8. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow: Yurait, 2014, 701 p. (In Russ.).
9. Cassie A.M. A new theory of arc rupture and circuit severity. *CIGRE*. 1939, no. 102, pp. 1–14.
10. Bowman B., Kruger K. *Arc Furnace Physics*. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009, 245 p.

11. Katsevich L.S. *Raschet i konstruirovaniye elektricheskikh pechei* [Calculation and design of electric furnaces]. Moscow: Gosenergoizdat, 1959, 440 p. (In Russ.).
12. Aliferov A.I., Bikeev R.A., Goreva L.P. et. *Dugovye elektropechi: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Electric arc furnaces: Textbook for universities]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2018, 204 p. (In Russ.).
13. Kolcheganov R.V., Kupova A.V., Deryuzhkova N.E. MatLab model of electric arc furnace. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2014, no. 5-1, pp. 50–51. (In Russ.).
14. Pentegov I.V. Mathematical model of a dynamic electric arc post. *Avtomaticheskaya svarka*. 1976, no. 6, pp. 8–12. (In Russ.).
15. Richardson G.D. *Physycal Chemistry of Melts in Metallurgy*. N.Y.: Acad. Press, 1974, vols. 1, 2.
16. Ting W., Wennan S., Yao Z. A New Frequency Domain Method for the Harmonic Analysis of power system with Arc Furnace. *4th international conference on advances in power system control*, 1997, pp. 552–555.
17. Cavallini A., Montanari G.C., Pitti L., Zaninelli D. ATP simulation for arc furnace flicker investigation. *ETEP*. 1995, vol. 5, no. 3, pp. 235–241.
18. Collantes-Bellido R., Gomez T. Identification and modeling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1997, vol. 12, no. 4, pp. 1812–1817.
19. Heydt G.T., O'Neill-Carrillo E., Zhao R.Y. The modeling of nonlinear loads as chaotic systems in electric power engineering. *Proc. Of the IEEE/PEC International Conference on Harmonics and Quality of Power. Las Vegas*, 1996, pp. 704-711.
20. Higgs R.W. Sonic signature analysis for arc furnace diagnostics and control. *Proc. of Ultrasonics Symposium. Milwaukee*, 1974, pp. 653–663.

Information about the authors:

B.S. Dmitrievskii, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Professor of the Chair "Information Processes and Control"

A.V. Bashkatova, Postgraduate of the Chair "Information Processes and Control" (atom1299@yandex.ru)

Received April 9, 2019

Revised June 11, 2019

Accepted June 14, 2019