

Анализ влияния инерционности электрической дуги на характеристики дуговых печей

МИРОНОВ Ю.М.

Рассмотрено влияние инерционности электрической дуги на устойчивость ее горения. Проведен анализ явления нелинейности токоподвода и воздействия инерционности дуги на его проявление. Установлено, что по сравнению с безынерционными дугами (электросварка) инерционность дуги в дуговых печах в основные технологические периоды плавки повышает устойчивость ее горения: уменьшает колебания температуры плазмы, расширяет зону непрерывных режимов, снижает несинусоидальность токов и уровень помех в системах электроснабжения. Инерционность дуги влияет на проявление эффекта нелинейности токоподвода, что необходимо учитывать при расчете электрических характеристик печей.

Ключевые слова: электрическая дуга, дуговые печи, инерционность, несинусоидальность тока, индуктивное сопротивление, электрические характеристики

Трехфазные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются основным агрегатом для получения высококачественных сталей на электрометаллургических заводах и литейных производствах машиностроительных предприятий. Их единичная мощность достигает 300 МВт, а токи во вторичных токоподводах – 150 кА. В качестве преобразователя электрической энергии в тепловую в технологических процессах нагрева и расплавления стали в ДСП используется специфический вид разряда в газах – электрическая дуга [1], где протекают электрофизические, магнитогидродинамические и тепловые процессы. Из-за сложности их взаимосвязи адекватное математическое описание динамики процессов затруднено, особенно для переменного тока.

Наиболее значимой инерционностью обладают процессы теплообмена. Ряд авторов [2–5] предлагали варианты математического описания переходных процессов в дуге, из которых наиболее известным является уравнение Майра:

$$\theta \frac{dg}{dt} + g = \frac{i^2}{P_{\text{пот}}}, \tag{1}$$

где g – проводимость столба дуги; i – ток; $P_{\text{пот}}$ – мощность тепловых потерь; θ – постоянная времени тепловых процессов в дуге.

Постоянная времени при принятых допущениях равна отношению энтальпии столба к мощности потерь. При допущении о примерно неизменной температуре дуги по ее радиусу

$$\theta = \frac{c_p \rho \pi r_d^2 T_{\text{ср}} l_d}{P_{\text{пот}}},$$

где c_p , ρ , $T_{\text{ср}}$ – теплоемкость, удельное сопротивление и средняя температура плазмы; r_d , l_d – радиус и длина дуги.

Отсюда следует, что интенсивность охлаждения дуги оказывает прямое воздействие на ее инерционность. Поэтому при нагреве твердого сравнительно холодного металла (сварка или период расплавления на ДСП) инерционность значительно ниже, чем в период нагрева жидкого металла. Значения постоянных времени дуги в электротехнологических установках колеблются от десятков микросекунд (сварочные установки) до единиц миллисекунд на промышленных ДСП [6–8]:

период плавки	расплавление	окисление	рафинирование
θ , мс	0,1–0,5	3	5

Решение уравнения (1) для переменного синусоидального тока [9]:

$$g(t) = \frac{I_m}{\sqrt{2} U_d} \left\{ 1 - \frac{\cos(2\omega t - \lambda)}{[1 + (\omega\theta)^2]^{1/2}} \right\}^{1/2},$$

где $\lambda = \arctg(\omega\theta)$,

При этом напряжение дуги

$$u_d(t) = \frac{\sqrt{2} U_d \sin \omega t}{\left\{ 1 - \frac{\cos(2\omega t - \lambda)}{[1 + (\omega\theta)^2]^{1/2}} \right\}^{1/2}}. \tag{2}$$

Отметим, что это напряжение не зависит от тока, а форма его кривой определяется только значением постоянной времени дуги θ .

Анализ выражения (2) показывает, что при $\theta=0$ оно вырождается в $u_d = U_d \text{sign} i$ и кривая напряжения приобретает прямоугольную форму. При

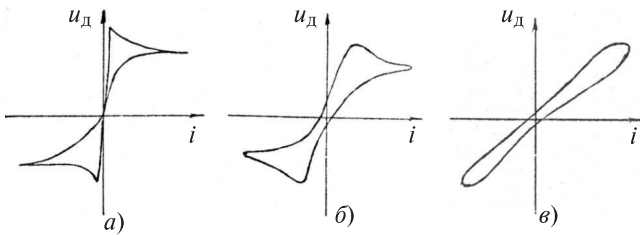


Рис. 1. Динамические ВАХ дуги переменного тока в дуговой печи в начале периода расплавления (а), после проплавления колочев (б) и в конце периода жидкого металла (в)

$\theta \rightarrow \infty$ значение $u_d = \sqrt{2}U_d \sin \omega t$ и его кривая имеет квазилинейный характер. Это подтверждается экспериментальными осциллограммами и видом динамических ВАХ в различные периоды плавки [1] (рис. 1).

Проанализируем влияние инерционности дуги на различные процессы. Важен характер изменения во времени температуры дуги переменного тока. В квазистационарном режиме горения дуги ее температура меняется по закону, близкому к синусоиде с двойной частотой и постоянной составляющей, значение которой определяется активной мощностью дуги [1] (рис. 1).

Из-за инерционности дуги кривые мгновенных значений мощности и температуры сдвинуты во времени (рис. 2 и 3), и этот сдвиг растет при увеличении постоянной времени дуги. При этом степень колебательности температуры снижается, а устойчивость горения дуги повышается. Это определяет закономерный характер изменения особенностей горения дуги в различные периоды плавки.

Дуга является нелинейным приемником электрической энергии, что приводит к несинусоидальности токов и напряжений и определяет специфику электрических режимов ДСП. Характер нелинейности дуги определяется динамическими характеристиками (ДВАХ) дуги (см. рис 1). Влияние инерционности дуги проявляется не только в закономерностях изменения вида ДВХ в течение плавки, но и в наличии гистерезиса.

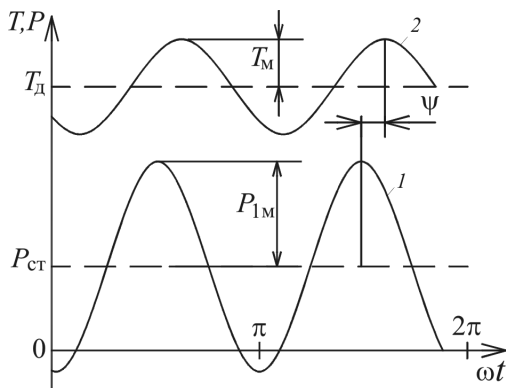


Рис. 2. Изменение во времени мгновенной мощности (кривая 1) и температуры (2) дуги

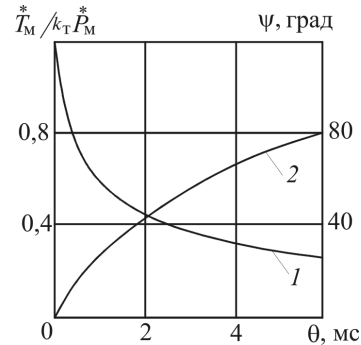


Рис. 3. Влияние инерционности дуги на амплитуду колебаний температуры (кривая 1) и угол сдвига температуры относительно мгновенной мощности (2)

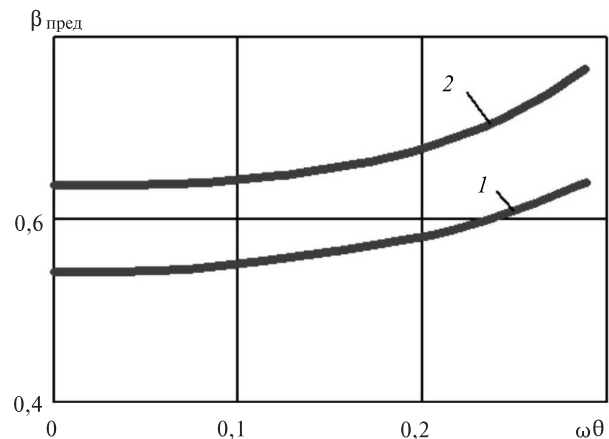


Рис. 4. Влияние инерционности дуги на значение $\beta_{пред}$ (кривая 1 – однофазная печь; 2 – трехфазная)

Вызванная присутствием в электрической цепи печи дуги несинусоидальность тока и напряжения так же, как и ДВАХ, зависит от времени плавки и особенно интенсивно проявляется в начальные периоды, создавая серьезные проблемы для систем электроснабжения [10].

Дополнительное влияние инерционности дуги на процессы в цепях ДСП просматривается при сравнении закономерностей изменения мгновенных значений токов и напряжений при безынерционной и инерционной дуге [11].

Наличие инерционности повышает предельное значение $\beta = U_d / E_m$ (E_m – амплитуда вторичного напряжения трансформатора – рис. 4), расширяя зону непрерывных режимов горения дуги и снижая содержание высших гармоник в токе печи.

Инструментом для анализа и оптимизации режимов ДСП служат электрические характеристики печей, представляющие собой зависимость от тока мощности и напряжения дуги [11]. Для каждой ступени напряжения трансформатора они рассчитываются по второму закону Кирхгофа с учетом сопротивлений контура печи без учета несинусоидальности тока. При проектировании печей определяются характеристики при неизменных во всем диапазоне изменения токов сопротивлений конту-

ра (т.н. «идеализированные»). Неучет нелинейности дуги приводит к значительному отклонению реальных режимов печей от расчетных.

Появление в токе дуг высших гармоник, естественно, вызывает значительное увеличение эквивалентных «эксплуатационных» сопротивлений печи (особенно индуктивного), которые зависят от тока (явление «нелинейности токоподвода») [6, 11]. В процессе зажигания дуги после КЗ при подъеме электрода и увеличения длины дуги снижается значение тока, растет напряжение дуги, ухудшаются условия ее горения с соответствующим увеличением содержания высших гармоник и эквивалентного сопротивления токоподвода (рис. 5). Зависимость эксплуатационного сопротивления от тока описы-

вается выражением $\bar{x} = \frac{x}{x_k} = \left(\frac{I}{I_k}\right)^{-k}$ [1]. На коэф-

фициент степени k оказывает влияние технологическая обстановка в печи в различные периоды плавки, характеризующаяся значением постоянной времени дуги θ . Самые сложные условия горения дуги наблюдаются в период расплавления, когда дуга наименее инерционна, что закономерно приводит к резкому проявлению несинусоидальности тока. В результате наиболее значительно зависит от тока и эксплуатационное индуктивное сопротивление (рис. 5, кривая 1). По ходу плавки инерционность дуги увеличивается и уменьшается крутизна кривой $x/x_k = f(I^*)$.

В период расплавления коэффициент $k=0,5 \div 0,6$, в период жидкого металла его значение уменьшается до $0,25 \div 0,3$ [12]; случаю отсутствия нелинейности соответствует $\theta \rightarrow \infty$ и $k=0$.

Такое изменение параметров электрической цепи вызывает изменение электрических характеристик по сравнению с идеализированными (рис. 6, кривые 1 и 4). В начальный период плавки

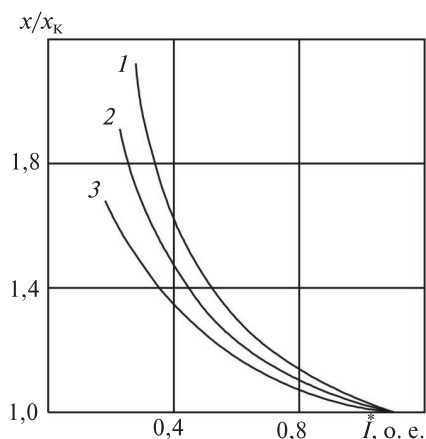


Рис. 5. Влияние относительного тока печи $I^* = I/I_k$ и инерционности дуги на значение индуктивного сопротивления токоподвода: 1 — $\theta = 0,4$ мс; 2 — 3 мс; 3 — 5 мс

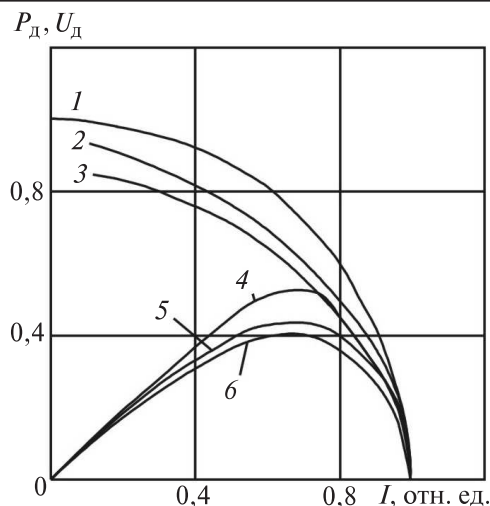


Рис. 6. Электрические характеристики ДСП с учетом нелинейности токоподвода: 1, 2, 3 — напряжение дуги; 4, 5, 6 — мощность; 1, 4 — без учета нелинейности; 2, 5 — $\theta = 3$ мс; 3, 6 — $\theta = 0,5$ мс

с малоинерционной дугой наиболее сильно падает напряжение на дуге (кривая 3), уменьшается и мощность дуги (кривая 6). В режиме передачи максимальной мощности не только снижается значение мощности, но и уменьшаются токи. По ходу плавки отличие от электрических характеристик печи при неизменном токе (кривые 1 и 4) снижается. Отсюда следует, что анализ и выбор оптимальных режимов необходимо проводить с учетом нелинейности токоподвода и его особенностей в различные периоды плавки.

Инерционность дуги и связанная с ней нелинейность токоподвода оказывают влияние и на динамические режимы электрической цепи печи. В [13] проведен анализ коэффициента передачи печи по току. Этот параметр необходим не только при настройке систем автоматического регулирования, но и для оценки влияния режима на колебательность печи («фликкер»):

$$K_I^I = \frac{\Delta I^*}{\Delta I_d} = -\frac{1 - \bar{I}^{2(1-k)}}{\bar{I}^{2(1-k)}(1-k)} \quad (3)$$

Несложно заметить, что K_I^I всегда меньше нуля, что отвечает физическому смыслу. В рабочем диапазоне режимов влияние нелинейности проявляется слабо, особенно при больших токах (рис. 7). Значения K_I^I увеличиваются с уменьшением относительного значения тока. Это неблагоприятно воздействует на степень стабильности тока в начальные периоды плавки. Так, для периода проплавления колодцев (относительное значение тока 0,577 [14]) параметр $K_I^I = -1,6$. В результате размах колебаний тока в этот период может достигать таких значений, что приведет к еще большим колеба-

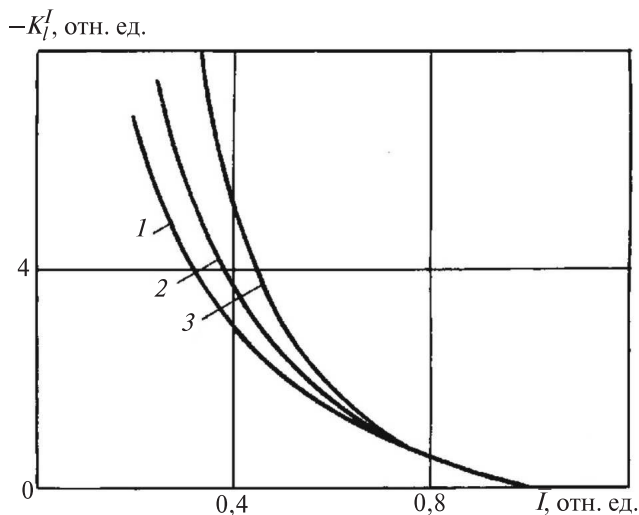


Рис. 7. Влияние режима на значения коэффициента передачи K_I^I : 1 – без учета нелинейности; 2 – период жидкого металла; 3 – период проплавления колодцев

ниям значений реактивной мощности и питающего напряжения, а также к увеличению потерь мощности в токоподводе [6]. В период жидкого металла относительное значение тока возрастает до 0,816 и коэффициент передачи значительно снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках. – Чебоксары: Изд. ЧГУ, 2014, 160 с.
2. Cassie A.M. A new theory of arc rupture and circuit severity. – CIORE-1939, № 102, pp. 101–105.
3. Маур О. Beitrage zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. – Arch. Fur Elektr., 1943, 38, № 12, pp. 588–608.
4. Пенгегов И.В. Математическая модель столба динамической электрической дуги. – Автоматическая сварка, 1976, № 6, с. 8–12.
5. Шельгазе М. Математическая модель переходных процессов в сварочной дуге и ее исследование. – Автоматическая сварка, 1971, № 7, с. 13–16.
6. Миронов Ю.М. Теоретическая электротехника электрических электродных печей. – Чебоксары: Изд. ЧГУ, 1997, 232 с.
7. Дрогин В.И., Гордиенко В.А., Курлыкин В.Н., Пирогов Н.А. Исследование электродинамических параметров мощной дуги сталеплавильной печи. – Электротехника, 1984, № 2, с. 13–15.
8. Сериков В.А., Бикеев Р.А., Чердниченко В.С. Акустические характеристики дуговых сталеплавильных электропечей. – Электрометаллургия, 2015, № 10, с. 2–13.
9. Игнатов И.И., Хаинсон А.В. Математическое моделирование электрических режимов дуговой сталеплавильной печи. – Электричество, 1985, № 8, с. 12–17.
10. Миронов Ю.М., Миронова А.Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок. – М.: Энергоатомиздат, 1990, 376 с.
11. Дрогин В.А., Пирогов Н.Н., Попов А.Н., Харченко В.А. Электрические параметры и режимы работы ДСП. – Сборник трудов ВНИИЭТО «Автоматизация электротехнологического оборудования с применением ЭВМ». – М.: Энергоатомиздат, 1983, с. 18–25.
12. Миронов Ю.М., Миронова А.Н., Смирнова Е.Ю. Эксплуатационные значения сопротивлений токоподвода и электрические характеристики дуговых печей литейного класса. – Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики, 2002, № 2, с. 27–32.
13. Миронов Ю.М. Особенности дуговых печей как объектов управления. – Труды Академии электротехнических наук Чувашской республики, 2001, № 1, с. 65–70.
14. Миронов Ю.М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных печей. – Электричество, 2006, № 6, с. 56–62.

[13.02.2017]

Автор: Миронов Юрий Михайлович окончил Московский энергетический институт в 1960 г. В 1977 г. защитил докторскую диссертацию. Профессор кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем Чувашского государственного университета.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 5, pp. 62–66

DOI:10.24160/0013-5380-2017-5-62-66

Analyzing the Effect the Electric Arc Inertia Has on the Arc Furnace Performance Characteristics

MIRONOV Yurii M. (Chuvash State University, Cheboksary, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

The effect of electric arc inertia on the arc burning stability is considered. The current inlet nonlinearity phenomenon is analyzed, and the influence of arc inertia on its manifestation is studied. It has been found that in comparison with inertia-free arcs (e.g., in case of electric welding), the inertial nature of arc in arc furnaces has a favorable effect on its burning in the main stages of melting process: it results in more stable burning of arc, in lower fluctuations of plasma temperature, in a broader region of continuous operating modes, in a lower distortion of current sine-wave shape, and in a lower level of interference in power supply systems. The arc inertia has an influence on the way in which the current inlet nonlinearity manifests itself, which has to be taken into account in calculating the electrical characteristics of furnaces.

Key words: electric arc, arc furnaces, inertia, current sine-wave shape distortion, inductive reactance, electric characteristics

REFERENCES

1. **Mironov Yu.M.** *Elektricheskaya duga v elektrotehnologicheskikh ustanovkakh* (Electric arc in electrotechnology installations). Cheboksary, Chuvash State University, 2014, 160 p.
2. **Cassie A.M.** A new theory of arc rupture and circuit severity. – CIORE-1939, No. 102, pp. 101–105.
3. **Mayr O.** Beitrage zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. – Arch. Fur Elektr, 1943, 38, No. 12, pp. 588–608.
4. **Pentegov I.V.** *Avtomaticheskaya svarka – in Russ. (Automatic welding)*, 1976, No. 6, pp. 8–12.
5. **Shel'gaze M.** *Avtomaticheskaya svarka – in Russ. (Automatic welding)*, 1971, No. 7, pp. 13–16.
6. **Mironov Yu.M.** *Teoreticheskaya elektrotehnika elektricheskikh elektrodnykh pechei* (Theoretical electrical engineering of electric electrode furnaces). Cheboksary, Chuvash State University, 1997, 232 p.
7. **Drogin V.I., Gordiyenko V.A., Kurlykin V.N., Pirogov N.A.** *Elektrotehnika – in Russ. (Power Engineering)*, 1984, No. 2, pp. 13–15.
8. **Serikov V.A., Bikeyev R.A., Cherednichenko V.S.** *Elektrometallurgiya – in Russ. (Electrometallurgy)*, 2015, No. 10, pp. 2–13.
9. **Ignatov I.I., Khainson A.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1985, No. 8. pp. 12–17.
10. **Mironov Yu.M., Mironova A.M.** *Elektrooborudovaniye i elektrosnabzheniye elektrotermicheskikh, plazmennyykh i luchevyykh ustanovok* (Electrical equipment and power supply for electrothermal, plasma and beam installations). Moscow, Energoatomizdat, 1990, 376 p.
11. **Drogin V.A., Pirogov N.A., Popov A.N., Kharchenko V.A.** *Sbornik trudov «Avtomatizatsiya elektrotehnologicheskogo oborudovaniya s primeneniym EVM» – in Russ. (Collection «Automation of electrotechnological equipment with the use of computers»)*. Moscow, Energoatomizdat, 1983, pp. 18–25.
12. **Mironov Yu.M., Mironova A.N., Smirnova Ye.Yu.** *Trudy Akademii elektrotehnicheskikh nauk Chuvashskoi respubliki – in Russ. (Proc. of the Chuvash Academy of electrotechnology sciences)*, 2002, No. 2, pp. 27–32.
13. **Mironov Yu.M.** *Trudy Akademii elektrotehnicheskikh nauk Chuvashskoi respubliki – in Russ. (Proc. of the Chuvash Academy of electrotechnology sciences)*, 2001, No. 1, pp. 65–70.
14. **Mironov Yu.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2006, No. 6, pp. 56–62.

[13.02.2017]

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи и в подписных агентствах.

Полные тексты статей в формате .pdf размещены на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

Номер выходит в конце каждого месяца.

Адрес для переписки: 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14, МЭИ,
редакция журнала «Электричество»
тел./факс: (495)362-7485
E-mail: etr1880@mail.ru