

УДК 621.365.2.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-51-57

## Определение рациональных электрических режимов промышленных дуговых сталеплавильных печей

А.М. Кручинин, М.Я. Погребисский, Е.С. Рязанова, А.Ю. Чурсин

Выбор рационального электрического режима дуговых сталеплавильных печей (ДСП) на действующих или вновь вводимых агрегатах из-за влияния сторонних возмущающих факторов является весьма сложной задачей для технологов.

На основании теплообменной модели электрической дуги (ТОМЭД) предложен метод, позволяющий выполнить задачу определения оптимального электрического режима при минимуме упрощений и допущений с учетом особенностей конкретной ДСП. При решении задачи учтены следующие факторы: условия теплообмена дуги в плавильном пространстве, влияния теплового режима электродов, длины дуги на структуру тепловых потоков при нагреве дугами, химического состава рабочей среды на теплофизические характеристики плазмы столба дуги. Расчет излучения дуг ДСП с учетом температурного профиля столба выполнен методом универсальных характеристик дуги на основе решения системы нелинейных алгебраических уравнений цилиндрической модели столба ТОМЭД. Расчет длины дуги основан на методе структурных характеристик ТОМЭД и заключается в сравнении значений напряжения дуги, рассчитанного с помощью уравнения эквивалентной схемы замещения печи, и напряжения, полученного на основе ТОМЭД. Зная длину дуги, можно вычислить мощность излучения дуг в плавильном пространстве ДСП.

Выбор электрического режима подразумевает задание какого-либо электрического параметра, поддерживаемого регулятором на протяжении некоторого периода плавки. Значение такого параметра (тока дуги или импеданса контура фазы ДСП) определяет остальные электрические показатели электропечной установки (мощность дуг, электрические потери, коэффициенты мощности, полезного действия и т. д.). Кроме того, правильность выбора электрического режима влияет на такие важные эксплуатационные характеристики, как удельный расход электродов, длительность межремонтного интервала и т. п.

*Ключевые слова:* дуговые печи, электрическая дуга, теплообменная модель электрической дуги.

*Для цитирования:* Кручинин А.М., Погребисский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю. Определение рациональных электрических режимов промышленных дуговых сталеплавильных печей // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 51—57. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-51-57.

## Determining the Rational Electrical Operation Modes of Industrial Electric Arc Furnaces

А.М. Kruchinin, М. Ya. Pogrebisskiy, E.S. Ryazanova, A. Yu. Chursin

The choice of a rational electrical mode of existing or newly commissioned electric arc furnaces (EAFs) is a very difficult task for process engineers in view of the influence of external disturbing factors. Based on an electric arc heat-transfer model (EAHTM), a method is proposed, using which the problem of determining the optimal electrical operation mode can be solved with the minimal number of simplifications and assumptions, and with taking into account the specific features of a particular EAF. In solving the problem, the following factors are taken into account: the arc heat transfer conditions in the melting space; the influence of the thermal operation conditions of the electrodes and the arc length on the structure of heat fluxes during the heating by arcs, and the effect the chemical composition of the working medium has on the thermophysical properties of the arc column plasma. The radiation from EAF arcs with taking into account the column temperature profile is calculated using the method of universal arc characteristics based on the solution of a system of nonlinear algebraic equations of the EAHTM column cylindrical model. The arc length calculation is based on the EAHTM structural characteristics method and consists of comparing the arc voltage value calculated using the furnace equivalent circuit equation and the arc voltage calculated using the EAHTM. Knowing the arc length, it is possible to calculate the arc radiation power in the EAF melting space.

The choice of an electrical operation mode implies specifying an electrical parameter to be maintained by the controller for a certain period of melting. The value of this parameter (arc current or the EAF phase loop impedance) governs the other electrical parameters of the electric furnace installation, such as arc power, electrical losses, power factors, efficiency, etc. In addition, the correct choice of the electrical operation mode has an influence on other important operational characteristics, such as the specific consumption of electrodes, the duration of the interval between repairs, etc.

*Key words:* electric arc, electric arc heat transfer model.

*For citation:* Kruchinin A.M., Pogrebisskiy M.Ya., Ryazanova E.S., Chursin A.Yu. Determining the Rational Electrical Operation Modes of Industrial Electric Arc Furnaces. Bulletin of MPEI. 2021;3:51—57. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-51-57.

## Введение

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) — сложный и энергоемкий электротехнический объект с сильно нелинейным характером нагрузки в электрических сетях [1 — 7]. Проектирование и наладка энергосберегающего электрического режима с повышенной устойчивостью горения дуг в процессе плавки шихты является трудоемкой многофакторной задачей, решение которой зависит от условий теплообмена дуг в плавильном пространстве, теплового режима электрода и, особенно сильно, от влияния формы тока дуги на реактивность эквивалентной схемы ДСП [2, 8 — 15].

## Идентификация длины дуги, как основное условие проектирования энергосберегающего электрического режима дуговой сталеплавильной печи

Длина дуги, как линия тока между точками привязки катодного и анодного пятен дуги в плавильном пространстве ДСП, зависит от настройки работы автоматического регулятора мощности печи и выбора значений вторичного напряжения печного трансформатора и рабочего тока. Данные факторы выделяют базовые параметры проектирования и наладки ДСП и, наряду с формируемыми условиями теплообмена дуг и теплового режима электрода в плавильном пространстве, определяют значение длины дуги в процессе плавки. В свою очередь, длина дуги зависит от ее напряжения по эквивалентной схеме ДСП:

$$U_d(I) = \sqrt{\left(\frac{U_{2l}}{\sqrt{3}}\right)^2 - (IX_{kz}K_X)^2} - IR_p,$$

где  $U_{2l}$  — значение вторичного линейного напряжения печного трансформатора;  $X_{kz}$  — реактивное сопротивление эквивалентной схемы промышленной ДСП для основной гармоники тока дуги из опыта короткого замыкания;  $R_p$  — активное сопротивление эквивалентной схемы ДСП;  $K_X$  — показатель влияния формы тока дуги на реактивность ДСП, как многофакторная функция, зависящая от типа конструкции ДСП  $n_{pm}$ , емкости печи  $G_p$ , интенсивности теплообмена дуги  $k_{jf}$  в зависимости от периода плавки, соотношения рабочего тока дуги и тока глухого короткого замыкания при зажигании дуги  $I_{rab}/I_{kz}$ :

$$K_X = \frac{1,00545 \cdot (1,0218 + 4,162 \cdot 10^{-4} G_p [\text{T}]) \left(\frac{I_{rab}}{I_{kz}}\right)^{-0,15} k_{jf}^{0,25}}{(0,85 + 0,15 n_{pm})^{0,25}} \quad (1)$$

Выражение в числителе — безразмерная функция  $K_X^*(G_p)$  опытного значения показателя реактивности для ДСП, работающих в период жидкой ванны  $k_{jf} = 1$ , [16, 17].

Изменим формулу (1):

$$K_X = \frac{1,00545 K_X^*(G_p) \left(\frac{I_{rab}}{I_{kz}}\right)^{-0,15} k_{jf}^{0,25}}{(0,85 + 0,15 n_{pm})^{0,25}};$$

$$K_X^*(G_p) = (1,0218 + 4,162 \cdot 10^{-4} G_p [\text{T}]);$$

$$I_{kz} = \frac{U_{2l}}{\sqrt{3} \sqrt{X_{kz}^2 + R_p}}.$$

## Определение показателя типа конструкции дуговой сталеплавильной печи

Для определения показателя типа конструкции  $n_{pm}$  ДСП следует выполнить расчет активной мощности печи (кВт):

$$P_{\text{акт}}(I) = 3U_d(I)I + 3I^2 R_p \quad (2)$$

и определить граничные для классификации типа конструкции ДСП значения активной мощности (кВт):

$$(P_{\text{акт}})_{sw} = (P_{ud})_{sw} G_p, \quad (3)$$

где

$$(P_{ud})_{sw} = \left[ \frac{(37,05 + 0,324 G_p)}{(1 + 0,2734 G_p + 4,9 \cdot 10^{-4} G_p^2)} \right]^2, \text{ кВт/т}; \quad (4)$$

$$(P_{\text{акт}})_{wm} = \frac{(P_{\text{акт}})_{sw}}{1,22}; \quad (5)$$

$$(P_{\text{акт}})_m = \frac{(P_{\text{акт}})_{sw}}{1,445}. \quad (6)$$

Тип конструкции ДСП по принятой классификации в зависимости от соотношения активной мощности печи и значений, полученных по (2) — (6), устанавливается по данным табл. 1 [2].

## Расчет длины дуги и мощности излучения дуг

На основе сформированных для проектирования и наладки параметров (см. табл. 1) с помощью математического аппарата методов ТОМЭД ДСП и верификации напряжения дуги выполним расчет длины дуги, решив систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$\sqrt{\left(\frac{U_{2l}}{\sqrt{3}}\right)^2 - (IX_{pe})^2} - IR_p = 25 + E_{sr}(I, \dots, I_a) l_a,$$

где  $l_a$  — длина дуги;  $X_{pe}$  — рабочее реактивное сопротивление (реактивность) эквивалентной схемы ДСП;  $E_{sr}$  — среднее по длине дуги значение напряженности электрического поля:

$$E_{sr}(I, I_a) = E_c(I, I_a) + \frac{(Z_k(I) - 1) k_e r_{ck}(I) E_{zk}(I)}{l_a} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{l_a}{k_e r_{ck}(I)}\right) \right], \quad (7)$$

Таблица 1

Типы конструкции ДСП в зависимости от соотношения активной мощности печи и значений (2) — (6)

Тип конструкции ДСП	Показатель типа конструкции $n_{pm}$	Значение активной мощности $P_{act}$ , кВт	
		больше	меньше
Сверхвысокой мощности	5	$1,3(P_{act})_{vm}$	—
Высокой мощности	4	$(P_{act})_{vm}$	$1,3(P_{act})_{vm}$
Повышенной мощности	3	$(P_{act})_{im}$	$(P_{act})_{vm}$
Средней мощности	2	$(P_{act})_m$	$(P_{act})_{im}$
Низкой мощности	1	—	$(P_{act})_m$

где  $E_c$  — средняя напряженность электрического поля цилиндрической модели столба ТОМЭД;  $E_k, E_{zk}$  — напряженности электрического поля в начальном сечении ( $z = 0$ ) столба реальной дуги и цилиндрической модели столба ТОМЭД;  $r_{ck}$  — радиус цилиндрической модели столба ТОМЭД в начальном сечении ( $z = 0$ ) вблизи катода;  $k_e$  — коэффициент затухания функции напряженности электрического поля столба дуги,  $k_e = 0,543$  [9].

Также в (7) использована структурная характеристика неравномерности электрического поля столба ТОМЭД:

$$Z_k(I) = \frac{E_k(I)}{E_{zk}(I)}$$

Метод ТОМЭД на основе рассчитанной длины дуги позволяет найти мощности излучения дуг и конвективного нагрева дугами за счет движения плазмы в плавильном пространстве и, тем самым, определить структуру нагрева дугами при вычисленной полезной мощности ДСП:

$$P_d(I) = P_{пол}(I) = 3U_d(I)I. \tag{8}$$

Мощность излучения дуг для заданного рабочего тока с учетом найденной длины дуги можно рассчитать с помощью универсальных характеристик дуги по формуле:

$$P_\epsilon(I) = P_\epsilon(I, I_a(I)) = 3\tilde{p}_\epsilon(p_{\lambda c})r_c^2 I_a(I), \tag{9}$$

где  $p_{\lambda c}$  — плотность теплового потока, отводимого с поверхности столба цилиндрической модели дуги конвекцией, кВт/м<sup>2</sup>;  $r_c$  — радиус столба цилиндрической модели дуги, м;  $\tilde{p}_\epsilon$  — универсальная характеристика излучения дуги в газовой среде плавильного пространства из оксидов углерода, кВт/м<sup>3</sup> (рисунок).

Тогда с учетом (8), (9) найдем мощность конвективного нагрева дугами:

$$P_t(I) = P_{конв}(I) = 3U_d(I)I - P_\epsilon(I) - 3U_{AK}I,$$

где  $U_{AK}$  — сумма падений напряжения в электрофизических приэлектродных (прианодном и прикатодном) слоях дуги, которая для всех стадий плавления твер-

дой шихты может быть принята постоянной и равной  $U_{AK} = 25$  В.

**Расчет удельного расхода электроэнергии на плавление твердой шихты в дуговой сталеплавильной печи**

Электрическая характеристика полезной мощности и рабочая характеристика мощности излучения дуг обладают немонотонным характером с точками максимального значения  $P_{dm} = (P_d)_{max}$  и  $P_{edm} = (P_\epsilon)_{max}$  при значениях токов дуги  $I = I_{dm}$  и  $I = I_\epsilon$ .

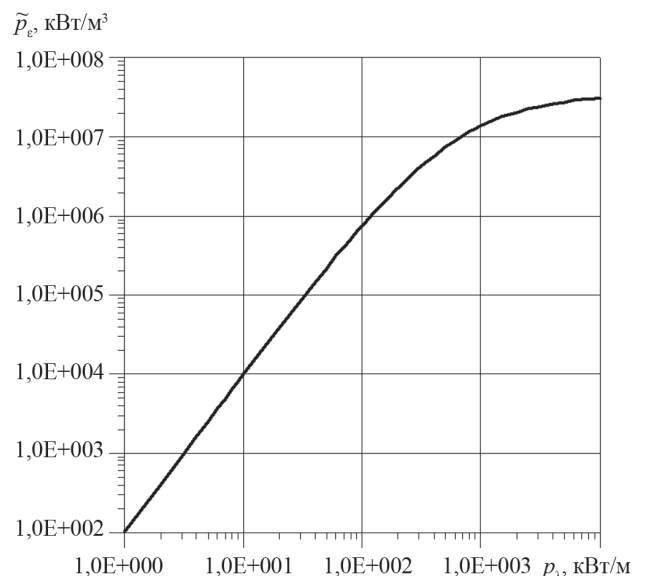
Токовые показатели ДСП для основного периода плавки шихты рассчитаем по формулам:

$$I_{pd} = \frac{1,06253U_{2l}}{\sqrt{6}X_{pe}};$$

$$I_{pud} = I_{pd}k_{ipud}, \tag{10}$$

Значения коэффициента  $k_{ipud}$  из (10) даны в табл. 2.

Для проектирования и наладки оптимального электрического режима ДСП рациональное значение тока дуги следует выбирать из условия:



Универсальная характеристика излучения дуги

Таблица 2

Значения коэффициента  $k_{ipud}$ 

Емкость ДСП $G_p$ , т	$k_{ipud}$
< 50	0,77
50 < 50 < 100	0,80
> 100	0,85

$$I_{rab} = I_{pud}$$

где  $I_{rab}$  — рабочий ток дуг (ток, поддерживаемый регулятором ДСП в процессе расплавления шихты) в основной период плавки (период окончания проплавления колодцев и образования мелкой ванны до полного расплавления шихты после завалки или подвалки [3]).

$$U_{2l} = \sqrt{\frac{2\sqrt{2}P_{act}(n_{pm})X_{kpe}}{\cos\varphi_{rac}(1+k_{ipud})}}, \quad (11)$$

где  $\cos\varphi_{rac}$  — коэффициент мощности установки для рационального режима ДСП,

$$\cos\varphi_{rac} = \frac{1}{1,16536 + 0,006437\sqrt{G_p}}.$$

Если при наладке рационального режима ДСП рассчитанное по (11) значение  $U_{2l}$  окажется меньше максимального значения вторичного линейного напряжения печного трансформатора  $U_{2lt}$  в основной период плавки шихты, то при проектировании рационального режима значение вторичного линейного напряжения  $U_{2l}$  следует принимать равным  $U_{2lt}$ .

В этом случае полная мощность установки в основной период плавки шихты  $S_p = \sqrt{3}U_{2l}I_{rac}$  будет больше установленной мощности печного трансформатора.

В противном случае мощность установки в основной период плавки шихты равна установленной

мощности печного трансформатора действующей печи.

По изложенному алгоритму с учетом вычисленного рационального рабочего тока дуг можно рассчитать полезную мощность  $P_d(I_{rac}) = P_{пол}(I_{rac})$ , мощность излучения дуг  $P_\varepsilon(I_{rac})$ , коэффициенты мощности и энергофизических показателей ДСП  $P_{dm} = (P_d)_{max}$ ,  $P_{edm} = (P_\varepsilon)_{max}$ .

Полученные подобным образом характеристики позволяют определить (с помощью метода ТОМЭД) значение удельного расхода электроэнергии  $p_{ud}$  (кВт·ч/т) на плавление твердой шихты по формулам [9]:

$$p_{udt} = 181,06 + 400,812(G_p [T])^{-0,113};$$

$$k_{plb} = \left[ \begin{array}{l} 2,713 \cdot 10^{-3} + 1,133 \cdot 10^{-4} G_p [T] - \\ -1,544 \cdot 10^{-6} (G_p [T])^2 + \\ + 7,885 \cdot 10^{-9} (G_p [T])^3 \end{array} \right]^{-1};$$

$$k_{pl}(I) = \left( \frac{P_d(I)}{G_p} \right) \left( \frac{P_\varepsilon(I)}{P_{edm}} \right) \left( \frac{P_d(I)}{P_{dm}} \right);$$

$$p_{ud}(I) = p_{udt}(G_p) \left( \frac{k_{plb}(G_p)}{k_{pl}(I)} \right)^{0,25}.$$

В качестве примера в табл. 3, 4 проведено сравнение рассчитанных характеристик ДСП действующего и рационального электрических режимов для печей Челябинского металлургического завода емкостью 100 т при условии сохранения полной мощности печного трансформатора. Также дано сравнение предельно допустимой скорости перемещения электродов  $V_{max}$  в автоматической системе регуляторов мощности ДСП, вычисленной с учетом апериодической устойчивости регуляторов и запаса устойчивости горения дуг по методу ТОМЭД [17] (табл. 3, 4).

Таблица 3

Таблица действующего электрического режима ДСП-100 ЧМЗ

Номер ДСП	Энергофизические характеристики					
	$S_p$ , МВА	$U_{2l}$ , В	$I_{rab}$ , кА	$\cos\varphi$	$p_{ud}$ , кВт·ч/т	$V_{max}$ , м/мин
1 (22) $n_{pm} = 1$ $K_x = 1,516$	29,125	486	34,6	0,8150	403,00	2,96
2 (23) $n_{pm} = 2$ $K_x = 1,500$	32,120	478	38,8	0,7790	405,70	2,16
3 (39) $n_{pm} = 1$ $K_x = 1,472$	24,990	417	34,6	0,7065	450,05	1,39
4 (40) $n_{pm} = 1$ $K_x = 1,490$	32,040	478	38,7	0,7200	433,80	1,78

Таблица рационального электрического режима ДСП-100 ЧМЗ

Номер ДСП	Энергофизические характеристики					
	$S_p$ , МВА	$U_{2l}$ , В	$I_{rab}$ , кА	cosφ	$P_{уд}$ , кВт·ч/т	$V_{max}$ , м/мин
1 (22) $n_{pm} = 1$ $K_x = 1,53$	29,19	468,04	36,00	0,8132	415	2,18
2 (23) $n_{pm} = 2$ $K_x = 1,50$	45,50	573,05	43,00	0,8132	389	2,51
3 (39) $n_{pm} = 1$ $K_x = 1,54$	21,68	419,33	29,85	0,8132	438	2,02
4 (40) $n_{pm} = 1$ $K_x = 1,54$	28,38	479,75	34,15	0,8132	413	2,49

При расчете характеристик рационального режима ДСП в соответствии с условиями наладки электрического режима действующей печи приняты неизменными значения:

- диаметра электрода печи;
- активного сопротивления  $R_p$  и реактивности  $X_{кз}$  эквивалентной схемы.

Как следует из данных табл. 3, 4, наиболее близок к рациональному отлаженный действующий режим печи № 22: ДСП-100. Остальные печи в результате аудита электрического режима методом ТОМЭД ДСП нуждаются в корректировке режима с целью снижения удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты и повышения устойчивости автоматических регуляторов мощности и горения дуг.

### Литература

1. Свенчанский А.Д. и др. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки специального нагрева. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Алиферов А.И. и др. Дуговые печи. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.
3. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю., Киселев А.Д. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010.
4. Миронова А.Н., Миронов Ю.М. Энерготехнологическая эффективность ДСП. Чебоксары: Изд-во Чувашского гос. ун-та им. И.Н. Ульянова, 1999.
5. Рябов А.В., Чумаков И.В., Шишимиров М.В. Современные способы выправки стали в дуговых печах. М.: Теплотехник, 2007.
6. Луценко В.Т., Павлов В.А., Докшицкая А.И. Дуговая сталеплавильная печь. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005.

### Заключение

Предложенный математический метод ТОМЭД ДСП демонстрирует возможность физически обоснованного на основе положений современной теории нагрева электрической дугой [16] определения рационального электрического режима ДСП на стадии, как проектирования, так и наладки. Таким образом, разработанный инженерный способ расчета энергофизических характеристик ДСП при ограниченных доступных исходных данных позволяет обеспечить проектирование и наладку электрического режима с минимальным значением удельного расхода электроэнергии на расплавление шихты и повышенными запасами устойчивости автоматических регуляторов мощности печи и горения дуг.

### References

1. Svenchanskiy A.D. i dr. Elektricheskie Promyshlennye Pechi: Dugovye Pechi i Ustanovki Spetsial'nogo Nagreva. M.: Energoizdat, 1981. (in Russian).
2. Aliferov A.I. i dr. Dugovye Pechi. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016. (in Russian).
3. Gudim Yu.A., Zinurov I.Yu., Kiselev A.D. Proizvodstvo Stali v Dugovykh Pechakh. Konstruktsii, Tekhnologiya, Materialy. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2010. (in Russian).
4. Mironova A.N., Mironov Yu.M. Energotekhnologicheskaya Effektivnost' DSP. Cheboksary: Izd-vo Chuvashskogo Gos. Un-ta im. I.N. Ul'yanova, 1999. (in Russian).
5. Ryabov A.V., Chumakov I.V., Shishimirov M.V. Sovremennye Sposoby Vypravki Stali v Dugovykh Pechakh. M.: Teplotekhnika, 2007. (in Russian).
6. Lutsenko V.T., Pavlov V.A., Dokshitskaya A.I. Dugovaya Staleplavil'naya Pech'. Ekaterinburg: Izd-vo GOU VPO UGTU–UPI, 2005. (in Russian).

7. **Алиферов А.И. и др.** Теория и практика применения дуговых печей. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.

8. **Кручинин А.М., Погребисский М.Я., Рязанова Е.С., Чурсин А.Ю.** Прогнозирование энергопотребления в период плавки шихты в дуговых сталеплавильных печах // Вестник МЭИ. 2019. № 6. С. 83—90.

9. **Кручинин А.М., Чурсин А.Ю.** Влияние формы тока дуги на реактивность эквивалентной схемы дуговых сталеплавильных печей // Электричество. 2020. № 9. С. 40—44.

10. **Миронова А.Н., Миронов Ю.М.** Электрооборудование и электроснабжение электротехнологических установок. М.: ИНФРА-М, 2020.

11. **Миронов Ю.М.** Электротехника электрометаллургических печей дугового, резистивного и смешанного нагрева. М.: ИНФРА-М, 2018.

12. **Черненко А.Н., Вахнин В.В.** Влияние режимов работы дуговой сталеплавильной печи 6ДСП-40 на уровень гармонических составляющих напряжения в точке подключения к электрической сети // Вектор науки Тольятинского гос. ун-та. 2015. № 1(31). С. 46—50.

13. **Миронов Ю.М., Миронова А.Н.** Повышение экономической эффективности дуговых сталеплавильных печей с помощью оптимизации энергопотребления // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 79—92.

14. **Миронов Ю.М., Матисон В.А., Волков А.В.** Анализ способов уменьшения влияния дуговых сталеплавильных печей на качество напряжения // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чувашского гос. ун-та им. И.Н. Ульянова, 2009. С. 344—345.

15. **Кувалдин А.Б., Птицына Е.В., Минеев Р.В., Минева А.Р.** Оптимизация электроснабжения дуговых сталеплавильных печей // Электрика. 2007. № 7. С. 11—14.

16. **Bowman B., Kruger K.** Arc Furnace Physics. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009.

17. **Кручинин А.М.** Проблема устойчивости электрического режима электроснабжения дуговых сталеплавильных печей (ДСП) в начале плавки // Фёдоровские чтения — 2016: Материалы XLVI Междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы. М.: Издат. дом МЭИ, 2016. С. 210—221.

7. **Aliferov A.I. i dr.** Teoriya i Praktika Primeneniya Dugovykh Pechey. SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2013. (in Russian).

8. **Kruchinin A.M., Pogrebisskiy M.Ya., Ryazanova E.S., Chursin A.Yu.** Prognozirovaniye Energopotrebleniya v Period Plavki Shikhty v Dugovykh Staleplavil'nykh Pechakh. Vestnik MEI. 2019;6:83—90. (in Russian).

9. **Kruchinin A.M., Chursin A.Yu.** Vliyanie Formy Toka Dugi na Reaktivnost' Ekvivalentnoy Skhemy Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey. Elektrichestvo. 2020; 9:40—44. (in Russian).

10. **Mironova A.N., Mironov Yu.M.** Elektrooborudovaniye i Elektrosnabzheniye Elektrotekhnologicheskikh Ustanovok. M.: INFRA-M, 2020. (in Russian).

11. **Mironov Yu.M.** Elektrotekhnika Elektrometallurgicheskikh Pechey Dugovogo, Rezistivnogo i Smeshannogo Nagreva. M.: INFRA-M, 2018. (in Russian).

12. **Chernenko A.N., Vakhnin V.V.** Vliyanie Rezhimov Raboty Dugovoy Staleplavil'noy Pechi 6DSP-40 na Uroven' Garmonicheskikh Sostavlyayushchikh Napryazheniya v Tochke Podklyucheniya k Elektricheskoy Seti. Vektor Nauki Tol'yatinskogo Gos. Un-ta. 2015;1(31): 46—50. (in Russian).

13. **Mironov Yu.M., Mironova A.N.** Povysheniye Ekonomicheskoy Effektivnosti Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey s Pomoshch'yu Optimizatsii Energopotrebleniya. Vestnik Chuvashskogo Universiteta. 2018;3:79—92. (in Russian).

14. **Mironov Yu.M., Matison V.A., Volkov A.V.** Analiz Sposobov Umen'sheniya Vliyaniya Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey na Kachestvo Napryazheniya. Dinamika Nelineynykh Diskretnykh Elektrotekhnicheskikh i Elektronnykh Sistem: Materialy VIII Vseros. Nauch.-tekhn. Konf. Cheboksary: Izd-vo Chuvashskogo Gos. Un-ta im. I.N. Ul'yanova, 2009:344—345. (in Russian).

15. **Kuvaldin A.B., Ptitsyna E.V., Mineev R.V., Mineva A.R.** Optimizatsiya Elektrosnabzheniya Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey. Elektrika. 2007;7:11—14. (in Russian).

16. **Bowman B., Kruger K.** Arc Furnace Physics. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009.

17. **Kruchinin A.M.** Problema Ustoychivosti Elektricheskogo Rezhima Elektrosnabzheniya Dugovykh Staleplavil'nykh Pechey (DSP) v Nachale Plavki. Fedorovskie Chteniye — 2016: Materialy XLVI Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. s Elementami Nauchnoy Shkoly. M.: Izdat. Dom MEI, 2016:210—221. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Кручинин Анатолий Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ancruhinin@yandex.ru

**Погребисский Михаил Яковлевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

**Рязанова Елена Сергеевна** — ведущий инженер кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: RiazanovaYS@mpei.ru

**Чурсин Андрей Юлианович** — заведующий учебной лабораторией кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: ChursinAY@mpei.ru

**Information about authors:**

**Kruchinin Anatoliy M.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ancruhinin@yandex.ru

**Pogrebisskiy Mikhail Ya.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: PogrebisskiyMY@mpei.ru

**Ryazanova Elena S.** — Leading Engineer of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: RiazanovaYS@mpei.ru

**Chursin Andrey Yu.** — Head of the Training Laboratory of Industrial Enterprises and Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ChursinAY@mpei.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 04.09.2020

**The article received to the editor:** 04.09.2020