

УДК 621.365.2

А.И. ПАНКРАТОВ (канд. техн. наук, доц.), **А.В. АФАНАСЬЕВА**

Донбасская государственная машиностроительная академия

aassole@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ КАБЕЛЕЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ДСП-12

The article is devoted to research of influence of electrodynamic forces between flexible cables of three phases of an electric arc furnace at operational short circuits for work of automatic regulators of capacity. Model of electromechanical fluctuations of flexible cables of the electric arc furnaces is created. The given model allows to consider these revolting influences. The estimation of parameters of autovibrations will allow to raise quality of capacity regulation of the electric arc furnace. Results of researches can be used for all electroarc furnaces.

Введение. Объектом исследования является дуговая сталеплавильная печь ДСП-12НЗ ЗАО НКМЗ. Объект исследования можно представить функциональной схемой, показанной на рис. 1.

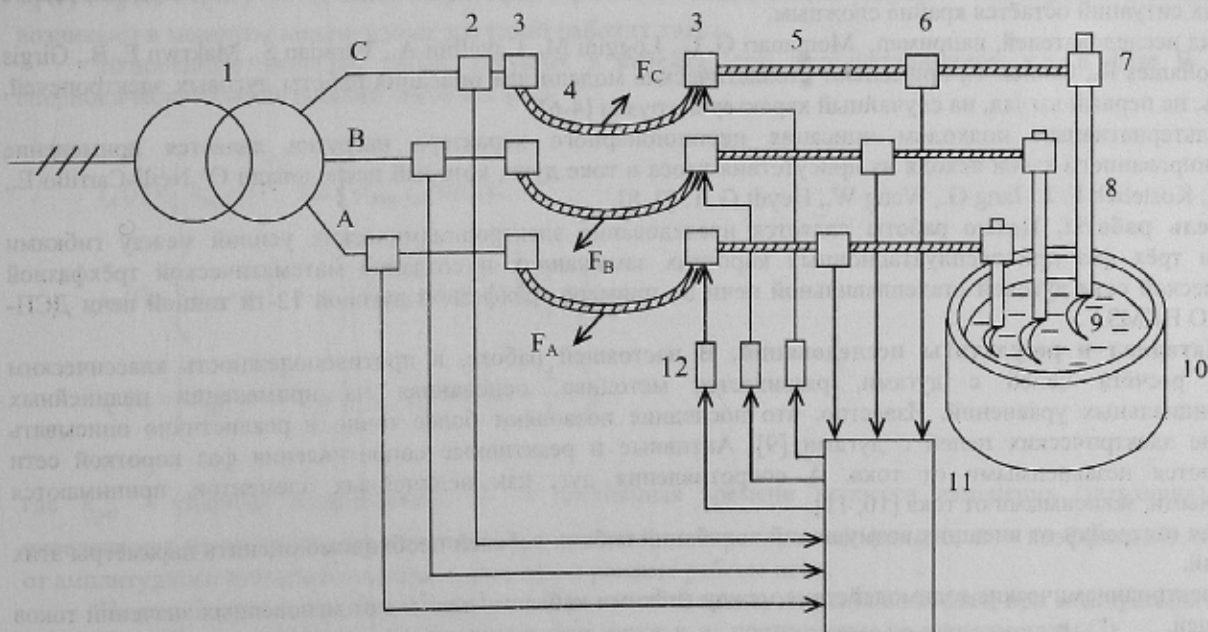


Рисунок 1- Функциональная схема объекта исследования: 1 – печной трансформатор; 2 – датчики тока; 3 – контактные соединения; 4 – гибкие кабели; 5 – трубчатые водоохлаждаемые шины; 6 – датчики напряжения; 7 – электрододержатели; 8 – электроды; 9 – электрическая дуга; 10 – дуговая печь; 11 – система управления перемещением электродов; 12 – механизмы перемещения электродов

Экспериментально установлено, что при эксплуатационных коротких замыканиях (при падениях кусков шихты и т. п.) возникают электродинамические усилия между гибкими кабелями трёх фаз. После исчезновения эксплуатационных коротких замыканий гибкие кабели совершают свободные затухающие. При этом изменяются расстояния между фазами, что приводит к соответствующему изменению взаимных индуктивностей фаз. Поэтому в токах фаз возникают соответствующие модулированные затухающие колебания, которые нарушают нормальную работу регуляторов мощностей дуговой сталеплавильной печи. Принцип работы автоматического регулятора мощности заключается в том, что напряжения $U_1(I_\phi)$ и $U_2(U_\phi)$, пропорциональные соответственно току I_ϕ и напряжению U_ϕ фазы, сравниваются в суммирующем блоке, который вырабатывает сигнал рассогласования (управляющий сигнал) U_y . Данный сигнал служит для управления перемещением электрода, т. е. для изменения длины электрической дуги. Электрод перемещается, вызывая уменьшение сигнала рассогласования. Колебания значений токов фаз вызывают соответственно колебания сигнала управления, а следовательно электроды также начинают совершать продольные колебания. Модулированные колебания в токах фаз приводят к колебаниям мощности, т. к. полная мощность для трёхфазной цепи напрямую зависит от электрических параметров фаз:

$$S = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi},$$

где S – полная мощность для трёхфазной цепи, Вт; U_{ϕ} – фазное напряжение, В; I_{ϕ} – ток фазы, А.

Такие возмущения ухудшают стабильную работу печи, происходит трата энергии, поломки электродов, увеличение времени расплавления металла и снижение производительности печи.

Для расчета как однофазных, так и трехфазных цепей ДСП разработаны различные подходы. Наиболее простым способом расчета является замена дуги регулируемым активным сопротивлением [1]. Нелинейность дуги в этом случае не учитывается. Этот способ весьма облегчает все расчеты цепей с дугами переменного тока.

Иным подходом к решению является метод, предложенный С. И. Тельным [2]. Мгновенные значения напряжения дуги за время ее горения в каждом полупериоде принимаются равными постоянному значению. Такой учет нелинейности дуги переменного тока усложняет расчеты, но в то же время позволяет получать более близкие к действительности результаты. Очевидно, что при этом методе форма кривой напряжения дуги принята прямоугольной.

Практический интерес представляет метод гармонического анализа, заключающийся в разложении напряжений и тока дуги в тригонометрический ряд. При этом выясняется роль высших гармоник тока и напряжения в цепи, их влияние на параметры установки, работу измерительных аппаратов и т. п. [2, 3].

Несмотря на то, что дуговые печи применяются и совершенствуются уже много лет, моделирование подобных ситуаций остаётся крайне сложным.

Ряд исследователей, например, Montanari G. C., Loggini M., Cavallini A., Varadan S., Makrwn E. B., Girgis A. A., Collantes R., Gomez T., применяют стохастические модели для описания работы дуговых электропечей, опираясь на первый взгляд, на случайный характер нагрузки [4-6].

Альтернативным подходом описания нестационарного характера нагрузки является применение детерминированного хаоса исходя из присутствия хаоса в токе дуги, который исследовали O' Neill-Carrillo E., Heydt G., Kostelich E. J., Jang G., Wang W., Heydt G. T. [7, 8].

Цель работы. Целью работы является исследование электродинамических усилий между гибкими кабелями трёх фаз при эксплуатационных коротких замыканиях и создание математической трёхфазной электрической сети дуговой сталеплавильной печи на примере трёхфазной дуговой 12-ти тонной печи ДСП-12НЗ ЗАО НКМЗ.

Материал и результаты исследований. В настоящей работе, в противоположность классическим методам расчёта цепей с дугами, развивается методика, основанная на применении нелинейных дифференциальных уравнений. Известно, что последние позволяют более точно и реалистично описывать поведение электрических цепей с дугами [9]. Активные и реактивные сопротивления фаз короткой сети принимаются независимыми от тока. А сопротивления дуг, как нелинейных элементов, принимаются переменными, зависимыми от тока [10, 11].

Для отстройки от внешних возмущений колебаний гибких кабелей необходимо оценить параметры этих колебаний.

Электродинамические взаимодействия между гибкими кабелями зависят от мгновенных значений токов фаз кабелей.

Мгновенные значения токов фаз кабелей при нормальном режиме работы печи

$$i_A(t) = I_{mA} \sin \omega t;$$

$$i_B(t) = I_{mB} \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$i_C(t) = I_{mC} \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right),$$

где I_{mA} , I_{mB} и I_{mC} – амплитудные значения токов фаз, А.

Электродинамические усилия, действующие на гибкие кабели при нормальном режиме работы печи

$$\begin{cases} F_A(t) = F_{AB}(t) + F_{AC}(t) = I_{mA} \sin \omega t \left[I_{mB} \cdot c_A \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + I_{mC} \cdot c_B \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \right]; \\ F_B(t) = F_{BA}(t) + F_{BC}(t) = I_{mB} \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \cdot \left[I_{mA} \cdot c_A \cdot \sin \omega t + I_{mC} \cdot c_C \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \right]; \\ F_C(t) = F_{CA}(t) + F_{CB}(t) = I_{mC} \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \cdot \left[I_{mA} \cdot c_A \cdot \sin \omega t + I_{mB} \cdot c_B \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где $F_{AB}(t)$, $F_{AC}(t)$ и $F_{BC}(t)$ – электродинамические силы между кабелями, Н;

$$c_A = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\ell}{a_{AB}}, \quad c_B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\ell}{a_{AC}}, \quad c_C = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\ell}{a_{BC}},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; ℓ – длина гибкого кабеля, м; a_{AB} , a_{BC} и a_{AC} – расстояние между осями кабелей А и В, В и С, и А и С, м.

Направления электродинамических сил зависят от момента времени к.з.

В зависимости от этого возможны различные варианты отклонений гибких кабелей в момент к.з.

Одним из наиболее неприятных случаев с точки зрения влияния на взаимные индуктивности между гибкими кабелями является случай, когда два кабеля отклоняются в одну сторону, а третий – в другую. Этот вариант и будем рассматривать на примере к.з. в фазе В.

Если к.з. происходит в одной из фаз, то ток в этой фазе может достигать трёхкратной величины по сравнению с номинальным значением тока фазы. Но т.к. подина печи является непроводящей и сопротивление между нулевыми точками печи и трансформатора равно бесконечности, то соблюдается условие $i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0$ (закон Кирхгофа). При этом максимальные ударные токи короткого замыкания фаз возникают в моменты амплитудных значений рабочих токов.

Мгновенные значения токов, текущих в кабелях, при эксплуатационном к.з. в фазе В с учётом аperiodических составляющих токов к.з. [12]

$$\begin{aligned} i_A(t) &= \left(k_{y\partial} \cdot e^{-\frac{1}{T}t} + a \right) \cdot I_{mк.з.А} \sin \omega t; \\ i_B(t) &= \left(k_{y\partial} \cdot e^{-\frac{1}{T}t} + a \right) \cdot I_{mк.з.В} \sin \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right); \\ i_C(t) &= \left(k_{y\partial} \cdot e^{-\frac{1}{T}t} + a \right) \cdot I_{mк.з.С} \sin \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $k_{y\partial}$ – ударный коэффициент; T – постоянная времени процесса изменения (затухания), которая определяется из соотношения реактивного и активного сопротивлений фазы; a – коэффициент, зависящий от амплитудного значения тока при нормальном режиме работы печи.

На рис. 2 приведены оценки мгновенных значений токов, текущих в кабелях, при эксплуатационном к.з. в фазе В с учётом аperiodических составляющих токов к.з., построенные по зависимостям (2).

Оценки мгновенных значений усреднённых электродинамических усилий при эксплуатационном к.з. в фазе В с учётом аperiodической составляющей тока к.з. приведены на рис. 3.

Из графиков рис. 2 видно, что соблюдается условие

$$i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0.$$

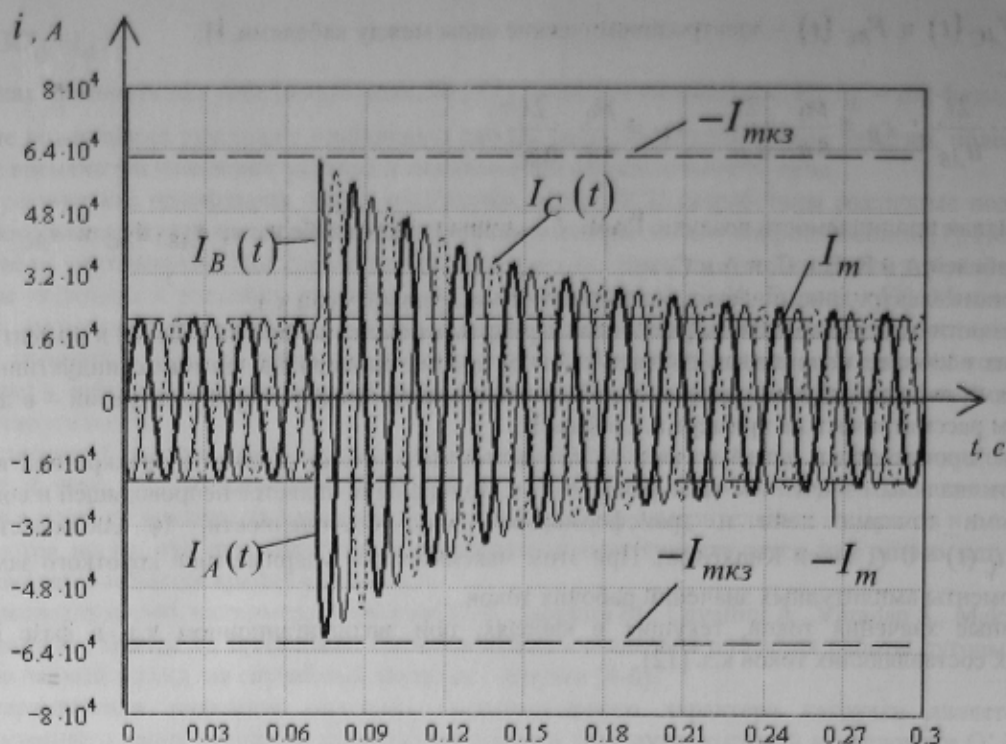


Рисунок 2 - Графики мгновенных значений токов при эксплуатационном к. з. в фазе В с учётом аperiodической составляющей тока к. з.

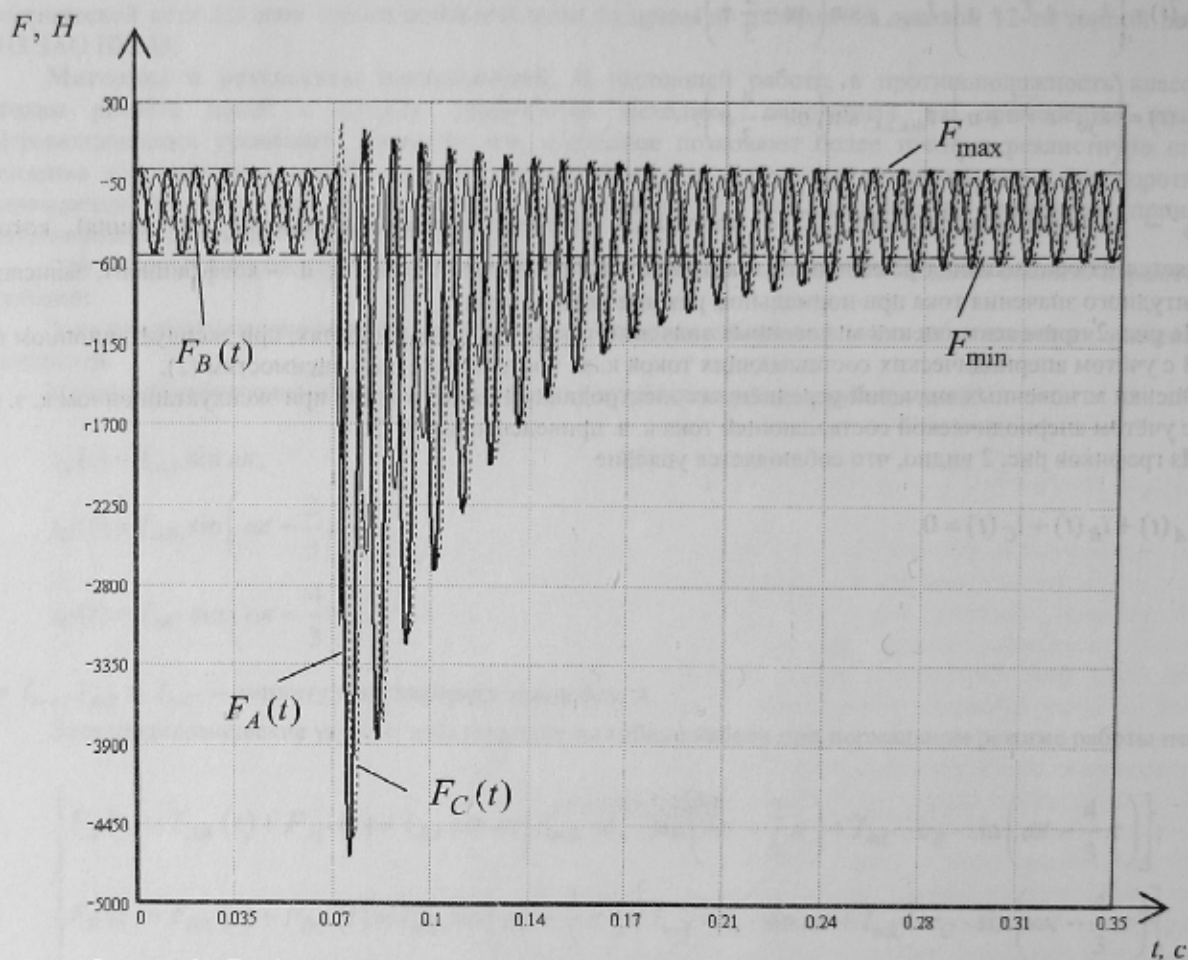


Рисунок 3 - Графики мгновенных значений усреднённых электродинамических усилий при эксплуатационном к. з. в фазе В с учётом аperiodической составляющей тока к. з.

Математическая модель, учитывающая электродинамические воздействия между фазами гибких кабелей, для трёхфазной цепи, соединённой в «звезду», каждая фаза которой содержит электрическую дугу, представляет систему уточнённых дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} U_A(t) &= r_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} + M_{AB}(t) \frac{di_B(t)}{dt} + M_{AC}(t) \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{i_A(t)}{g_A(t)} + u_0(t); \\ U_B(t) &= r_B i_B(t) + L_B \frac{di_B(t)}{dt} + M_{AB}(t) \frac{di_A(t)}{dt} + M_{BC}(t) \frac{di_C(t)}{dt} + \frac{i_B(t)}{g_B(t)} + u_0(t); \\ U_C(t) &= r_C i_C(t) + L_C \frac{di_C(t)}{dt} + M_{AC}(t) \frac{di_A(t)}{dt} + M_{CB}(t) \frac{di_B(t)}{dt} + \frac{i_C(t)}{g_C(t)} + u_0(t); \\ i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) &= 0; \\ \theta \frac{dg_A(t)}{dt} &= \frac{i_A^2(t) - g_A^2(t)}{U_0^2}; \\ \theta \frac{dg_B(t)}{dt} &= \frac{i_B^2(t) - g_B^2(t)}{U_0^2}; \\ \theta \frac{dg_C(t)}{dt} &= \frac{i_C^2(t) - g_C^2(t)}{U_0^2}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $U_A(t)$, $U_B(t)$ и $U_C(t)$ – фазные напряжения с низкой стороны трансформатора, В,

$$\left\{ \begin{aligned} U_A(t) &= U_{Am} \sin(\omega t); \\ U_B(t) &= U_{Bm} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right); \\ U_C(t) &= U_{Cm} \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right), \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где U_{Am} , U_{Bm} и U_{Cm} – амплитудные значения фазных напряжений с низкой стороны трансформатора, В; ω – угловая частота, с^{-1} ; r_A , r_B , r_C – суммарные эквивалентные активные сопротивления фаз трансформатора, приведенные ко вторичной стороне трансформатора, Ом; L_A , L_B , L_C – суммарные эквивалентные индуктивности фаз трансформатора, приведенные ко вторичной стороне трансформатора, Гн; $M_{AB}(t)$, $M_{BC}(t)$ и $M_{AC}(t)$ – взаимные индуктивности между фазами, Гн; $r_{Aэл}$, $r_{Bэл}$, $r_{Cэл}$ – сопротивления электродов фаз, Ом; $i_A(t)$, $i_B(t)$ и $i_C(t)$ – мгновенные значения токов фаз, А; $\frac{i_A(t)}{g_A(t)}$, $\frac{i_B(t)}{g_B(t)}$ и $\frac{i_C(t)}{g_C(t)}$ –

мгновенные значения напряжений дуг, В; $u_0(t)$ – мгновенное смещение нулевой точки печи относительно нуля трансформатора, которое определяется из системы уравнений (3); следует отметить, что в абсолютно симметричной трёхфазной системе напряжение смещения нулевой точки равно нулю, что не справедливо для систем, содержащих дуги, ввиду их нелинейности [2].

Для решения данной нелинейной системы уравнений необходимо установить зависимость взаимных индуктивностей фаз от изменения расстояния между кабелями.

Выводы. На основании исследований электродинамических усилий между гибкими кабелями трёх фаз при эксплуатационных к. з. установлены математические соотношения между параметрами короткой сети ДСП с учётом изменения взаимных индуктивностей между фазами.

Список літератури

1. Свенчанский А. Д. 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., ил.
2. Карпенко С. В. Разработка математической модели и компьютерной системы для исследования трёхфазных цепей с электрическими дугами / С. В. Карпенко, В. Д. Сарычев, С. П. Мочалов // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия № 6. – М., 2006. – С. 48-51.
3. Сисоян Г. А. Электрическая дуга в электрической печи. 3-е изд. – М. : Металлургия, 1974. – 304 с.
4. Montanari G. C., Loggini M., Cavallini A. e. a. // IEEE Transactions on Power Delivery, 1994. V. 8. № 4. P. 2026-2036.
5. Varadan S., Makrwn E. B., Girgis A. A. // IEEE Transactions on Power Delivery, 1996. V. 1. № 3. P. 1685-1691.
6. Collantes R., Gomez T. // IEEE Transactions on Power Delivery, 1997. V. 12. № 4. P. 1812-1817.
7. O'Neill-Carrillo E., Heydt G., Kostelich E. J. e. a. // IEEE Transactions on Power Delivery, 1999. V. 14. № 2. P. 537-542.
8. Jang G., Wang W., Heydt G. T. e. a. // IEEE Transactions on Power Delivery, 2001. V. 29. № 11. P. 1060-1073.
9. Acha E., Semlyen A., Rajakovich N. // IEEE Transactions on Power Delivery, 1990. V. 5. № 3. P. 1390-1395.
10. Игнатов И. И. Расчёт электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей / Игнатов И. И., Хаинсон А. В. // Электричество № 8, 1983.
11. Игнатов И. И. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей / Игнатов И. И., Хаинсон А. В. // Электричество № 8, 1985.
12. Фёдоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий : учебник для вузов / А. А. Фёдоров. – М. : «Энергия», 1982. – 416 с.

Надійшла до редколегії 27.04.2009

Рецензент: О.І.Толочко

А.И.ПАНКРАТОВ, А.В. АФАНАСЬЕВА

Донбасская государственная машиностроительная академия

А.И.ПАНКРАТОВ, А.В. АФАНАСЬЕВА

Донбаська державна машинобудівельна академія

Исследование электромеханических колебаний гибких кабелей дуговой сталеплавильной печи ДСП-12. Статья посвящена определению законов колебаний гибких кабелей трех фаз дуговой электросталеплавильной печи при возникновении эксплуатационных коротких замыканий и оценке изменения взаимных индуктивностей между гибкими кабелями трех фаз. Установлено, что изменение взаимных индуктивностей описывается законом затухающей синусоиды, а время свободных колебаний составляет 14с., это ухудшает стабильную работу печи.

Електромеханічні коливання, гнучкий кабель, дугова сталеплавильна печь

Дослідження електромеханічних коливань гнучких кабелів дугової сталеплавильної печі ДСП-12. Стаття призначена визначенню законів коливань гнучких кабелів трьох фаз дугової электросталеплавильної печі при виникненні експлуатаційних коротких замикань і оцінці зміни взаємних індуктивностей між гнучкими кабелями трьох фаз. Встановлено, що зміна взаємних індуктивностей описується законом затухаючої синусоїди, а час вільних коливань складає 14с, це погіршує стабільну роботу печі.

Електромеханічні коливання, гнучкий кабель, дугова сталеплавильна піч