

УДК 621.365.2

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

Донбасская государственная машиностроительная академия

aassole@mail.ru

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ВЗАИМНЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ МЕЖДУ ГИБКИМИ КАБЕЛЯМИ ТРЁХ ФАЗ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ДСП-12 ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

The article is devoted to definition of laws of fluctuations of flexible cables of three phases of an electric arc furnace at occurrence of operational short circuits and to an estimation of change of mutual inductances between flexible cables of three phases. It was established, that change of mutual inductances is described by the law of a fading sinusoid, and time of free fluctuations makes 14 second, it worsens stable work of the furnace.

Введение. При эксплуатационных коротких замыканиях возникают электродинамические усилия между гибкими кабелями трёх фаз. Изменение расстояний между гибкими кабелями приводит к колебательному изменению взаимных индуктивностей силовой цепи. Это в свою очередь приводит к появлению в токах фаз модулированных затухающих колебаний. Автоматические регуляторы, реагируя на изменения значений токов фаз, отрабатывают данные возмущения, меняя длины электрических дуг. т. е. электроды также начинают совершать продольные колебания, что ухудшает стабильность работы печи и увеличивает время расплава металла.

Для учёта данных возмущающих воздействий необходимо определить законы колебаний гибких кабелей трёх фаз дуговой электросталеплавильной печи при возникновении эксплуатационных коротких замыканий и найти зависимости изменения взаимных индуктивностей между гибкими кабелями фаз.

Цель работы. Целью работы является определение законов колебательного движения гибких кабелей трёх фаз дуговой электросталеплавильной печи при возникновении эксплуатационных коротких замыканий и определение зависимостей изменения взаимных индуктивностей между гибкими кабелями трёх фаз на примере ДСП-12.

Материал и результаты исследований. Для определения законов колебаний гибких кабелей в первом приближении представим их в виде математических круговых маятников (см. рис. 1).

Для оценки максимального влияния на взаимные индуктивности между гибкими кабелями рассмотрим случай, когда два кабеля отклоняются в одну сторону, а третий – в другую. Этот вариант и будем рассматривать на примере к. з. в фазе В.

В дальнейшем для удобства записи выражений необходимых величин и построения графиков исследуем все процессы с момента короткого замыкания.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: a_{AB}, a_{BC}, a_{AC} – расстояния между гибкими кабелями А и В, В и С, А и С соответственно, м; b_{AB}, b_{BC}, b_{AC} – расстояния между отклонившимися гибкими кабелями А и В, В и С, А и С соответственно под воздействием электродинамических сил, м; ℓ_1 – длина математического маятника, м; F_A, F_B, F_C – электродинамические силы, действующие на кабели А, В и С соответственно, Н; G – силы тяжести, действующие на каждый маятник, они одинаковы, т. к. равны массы m маятников, т. е. гибких кабелей, Н; $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы, на которые отклоняются кабели А, В и С соответственно под воздействием электродинамических сил, рад.

На рис. 1 расстояния между маятниками указаны непропорционально, т. к. на самом деле кабели расположены не в одной плоскости.

Расстояния между кабелями с учётом направлений их начальных отклонений определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} b_{AB} &= a_{AB} + \ell_1 \cdot (\sin \varphi_A(t) - \sin \varphi_B(t)); \\ b_{BC} &= a_{BC} + \ell_1 \cdot (-\sin \varphi_B(t) + \sin \varphi_C(t)); \\ b_{AC} &= a_{AC} + \ell_1 \cdot (-\sin \varphi_A(t) + \sin \varphi_C(t)). \end{aligned} \quad (1)$$

Знак направления отклонения кабеля определяется знаком угла отклонения.

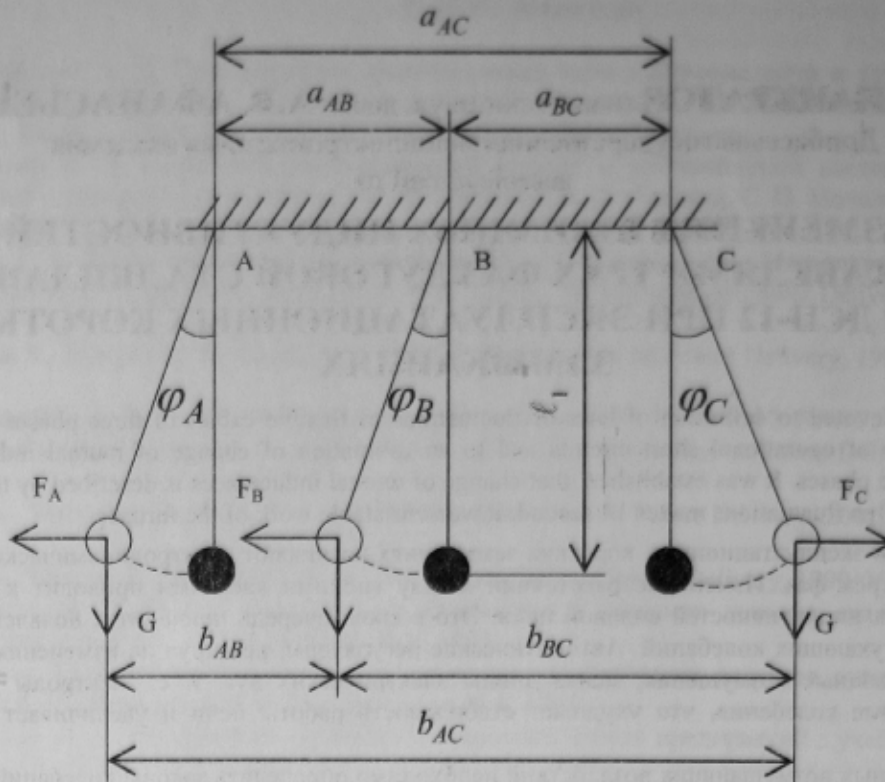


Рисунок 1 - Схемы отклонений кабелей от вертикали под воздействием электродинамических усилий

Для определения углов, на которые отклоняются кабели под воздействием электродинамических усилий, запишем в общем виде уравнение колебаний математического маятника [1] с учётом их затухания

$$\varphi(t) = Ae^{-\frac{t}{T_c}} \sin(kt + \alpha), \quad (2)$$

где $\varphi(t)$ – угол, отсчитываемый от вертикали положения равновесия маятника, рад; T_c – период собственных колебаний маятника,

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}};$$

A – амплитуда, т. е. максимальное значение угла φ , которое может быть найдено из схемы отклонения маятника от вертикали; k – собственная круговая частота колебаний маятника,

$$k = \sqrt{\frac{g}{\ell}}; \quad (3)$$

α – начальная фаза,

$$\alpha = 0. \quad (4)$$

Считаем, что в момент действия электродинамической силы плоская система сил, действующих на маятник, находится в равновесии. Тогда сумма алгебраических моментов сил относительно точки O равна нулю [2]:

$$\sum_{i=1}^n M_o(\bar{F}_i) = 0;$$

$$-F\ell \cos \varphi + G\ell \sin \varphi = 0;$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{F}{G}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{F}{G} \right);$$

$$A = \varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{F}{m_m g} \right), \quad (5)$$

где m_m – масса математического маятника, кг,

$$m_m = \frac{m}{3};$$

Подставив (3), (4) и (5) в (2), получим

$$\varphi(t) = A e^{-\frac{t}{T_c}} \sin(kt + \alpha) = e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F}{mg}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell}} \cdot t\right).$$

Теперь запишем уравнения колебаний гибких кабелей фаз А, В и С

$$\begin{aligned} \varphi_A(t) &= A_A e^{-\frac{t}{T_c}} \sin(k_A t + \alpha) = e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Acp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right); \\ \varphi_B(t) &= A_B e^{-\frac{t}{T_c}} \sin(k_B t + \alpha) = e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Bcp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right); \\ \varphi_C(t) &= A_C e^{-\frac{t}{T_c}} \sin(k_C t + \alpha) = e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Ccp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Теперь подставим (6) в (1), получим выражения расстояний между кабелями

$$\begin{aligned} b_{AB}(t) &= a_{AB} + \ell_1 \cdot \left(\sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Acp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) - \sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Bcp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) \right); \\ b_{BC}(t) &= a_{BC} + \ell_1 \cdot \left(-\sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Bcp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) + \sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Ccp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) \right); \\ b_{AC}(t) &= a_{AB} + \ell_1 \cdot \left(-\sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Acp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) + \sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Ccp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

В каждом кабеле трехфазной линии передачи индуцируется не только э. д. с. самоиндукции, обусловленная переменным током в этом проводе, но также и э. д. с. взаимной индукции, обусловленная токами в других проводах линии [3].

Определим законы изменения взаимных индуктивностей фаз.

В установившемся режиме, т. е. когда электродинамические усилия не действуют, гибкие кабели не отклоняются и, следовательно, расстояние между гибкими кабелями фаз А и В равно a_{AB} , фаз В и С равно a_{BC} и фаз А и С — a_{AC} . Тогда выражения для взаимных индуктивностей, наведенных в гибких кабелях в установившемся режиме, равны [3]

$$\begin{aligned} M_{AB} &= \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{a_{AB}} - 1 \right); \\ M_{BC} &= \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{a_{BC}} - 1 \right); \\ M_{AC} &= \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{a_{AC}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

При действии электродинамических усилий выражения для взаимных индуктивностей, наведенных в кабелях фаз А, В и С, примут вид

$$\begin{aligned} M_{AB}(t) &= M_{BA}(t) = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{b_{AB}(t)} - 1 \right); \\ M_{BC}(t) &= M_{CB}(t) = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{b_{BC}(t)} - 1 \right); \\ M_{AC}(t) &= M_{CA}(t) = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{b_{AC}(t)} - 1 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя в уравнения (9) выражения расстояний между отклонившимися кабелями (7), получим

$$M_{AB}(t) = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{a_{AB} + \ell_1 \cdot \left(\sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Acp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) - \sin\left(e^{-\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{Bcp}}{m_m g}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t\right) \right) \right) - 1 \right);$$

$$M_{BC}(t) = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \ln \frac{2\ell}{a_{BC} + \ell_1 \cdot \left(-\sin \left(e^{\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg} \left(\frac{F_{BCp}}{mg} \right) \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t \right) \right) + \sin \left(e^{\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg} \left(\frac{F_{Ccp}}{mg} \right) \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t \right) \right) \right)}$$

$$M_{AC}(t) = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \ln \frac{2\ell}{a_{AC} + \ell_1 \cdot \left(-\sin \left(e^{\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg} \left(\frac{F_{Acp}}{mg} \right) \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t \right) \right) + \sin \left(e^{\frac{t}{T_c}} \operatorname{arctg} \left(\frac{F_{Ccp}}{mg} \right) \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{g}{\ell_1}} \cdot t \right) \right) \right)}$$

На рис. 2 приведенные графики зависимостей взаимных индуктивностей в гибких кабелях в состоянии их свободных колебаний, полученные в результате расчётов.

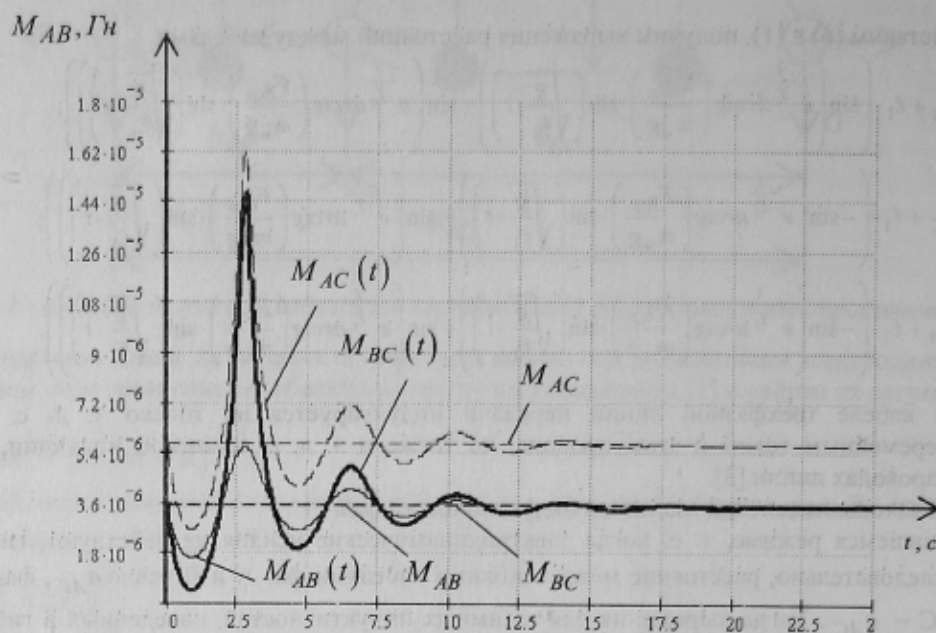


Рисунок 2 - Графики зависимостей взаимных индуктивностей в гибких кабелях в состоянии их свободных колебаний

Из рис. 2 можно сделать вывод, что время свободных колебаний составляет приблизительно 14 с. Амплитуды колебаний взаимных индуктивностей в гибких кабелях в состоянии свободных колебаний для дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 из рисунка 2 равны $2,046 \cdot 10^{-6}$, $0,973 \cdot 10^{-5}$ и $1,053 \cdot 10^{-5}$ Гн между фазами А и В, В и С, и А и С соответственно. Наиболее ярко выражено изменение взаимной индуктивности между фазами А и С, т. к. между этими фазами расстояние меньше, чем между двумя другими парами фаз.

Такие возмущения приводят к ухудшению стабильной работы печи, трате энергии, поломке электродов, увеличению времени расплавления металла и снижению производительности печи.

Выводы. В работе на основе исследований было установлено, что законы движения г. к. при эксплуатационных к. з. носят колебательный затухающий характер. При этом изменения взаимных индуктивностей между фазами способствуют нарушению стабильности токов дуг.

Список литературы

1. Добронравов В. В. Курс теоретической механики : учебник для машиностроительных вузов / В. В. Добронравов, Никитин И. П. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1983. – 575 с. : ил.
2. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Наука, 1970. – 478 с.
3. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 3. Теория магнитного поля : ученик для вузов / Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. – 4-е изд., перераб. – М. : Госэнергоиздат, 1984. – 248 с.

А.И.ПАНКРАТОВ, А.В. АФАНАСЬЕВА

Донбасская государственная машиностроительная академия

Оценка изменения взаимных индуктивностей между гибкими кабелями трёх фаз дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях. Статья посвящена исследованию влияния электродинамических усилий между гибкими кабелями трех фаз дуговой сталеплавильной печи при эксплуатационных коротких замыканиях на работу автоматических регуляторов мощности. Создана модель электромеханических колебаний гибких кабелей дуговых сталеплавильных печей. Данная модель позволяет учитывать эти возмущающие воздействия. Оценка параметров автоколебаний позволит повысить качество регулирования мощности дуговой сталеплавильной печи. Результаты исследований могут быть использованы для всех электродуговых печей.

Взаимная индуктивность, гибкий кабель, эксплуатационное короткое замыкание

А.И.ПАНКРАТОВ, А.В. АФАНАСЬЕВА

Донбасска державна машинобудівельна академія

Оцінка зміни взаємних індуктивностей між гнучкими кабелями трьох фаз дугової сталеплавильної печі ДСП-12 при експлуатаційних коротких замиканнях. Стаття присвячена дослідженню впливу електродинамічних зусиль між гнучкими кабелями трьох фаз дугової сталеплавильної печі при експлуатаційних коротких замиканнях на роботу автоматичних регулювальників потужності. Створена модель електромеханічних коливань гнучких кабелів дугових сталеплавильних печей. Дана модель дозволяє враховувати ці збурюючі дії. Оцінка параметрів автоколивань дозволить підвищити якість регулювання потужності дугової сталеплавильної печі. Результати досліджень можуть бути використані для всіх електродугових печей.

Взаємна індуктивність, гнучкий кабель, експлуатаційне коротке замикання