

Г.Н. Цицикян, П.В. Бобровников

Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ НА СЕКЦИИ РОТОРА ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Объект и цель научной работы. Определение индуктивности обмоток ротора и сил, действующих на ротор в трехмерной модели линейных синхронных двигателей.

Материалы и методы. Используются методы теоретической электротехники.

Основные результаты. Получены формулы для индуктивности обмоток ротора и сил, действующих на ротор в трехмерной модели линейных синхронных двигателей.

Заключение. Найдены откорректированные выражения для расчета индуктивности секций и электродинамических сил ротора линейного синхронного двигателя.

Ключевые слова: линейный синхронный двигатель, секции ротора, коэффициенты само- и взаимной индукции, электродинамические силы.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Цицикян Г.Н., Бобровников П.В. К вопросу определения электродинамических сил на секции ротора линейного синхронного двигателя. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 122–126.

УДК 621.313.13

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-122-126

G.N. Tsitsikyan, P.V. Bobrovnikov

TSNII SET Branch, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ON DETERMINATION OF ELECTRO-DYNAMIC FORCES ON THE ROTOR SECTION OF A LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR

Object and purpose of research. Inductance of rotor windings and forces on rotor are determined using a three-dimensional model of linear synchronous motors.

Materials and methods. Electric engineering theory methods are employed.

Main results. Formulas for rotor winding inductance and forces acting on rotor in a three-dimensional model of linear synchronous motors are derived.

Conclusion. Updated relations are obtained for calculating the inductance of rotor sections and electro-dynamic rotor forces of linear synchronous motors.

Key words: linear synchronous motor, rotor sections, self and mutual inductance coefficients, electro-dynamic forces.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Tsitsikyan G.N., Bobrovnikov P.V. On determination of electro-dynamic forces on the rotor section of a linear synchronous motor. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 122–126 (in Russian).

UDC 621.313.13

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-122-126

В известной книге «Синхронные машины с немагнитным ротором» [1] наряду с общей характеристикой и классификацией синхронных машин с немагнитным ротором дано описание принципа действия линейных асинхронных и синхронных

двигателей вместе с расчетными выражениями для определения индуктивностей обмоток ротора и сил, действующих на ротор в трехмерной модели ротора линейного двигателя (уравнения (3-87)–(3-92) в [1]).

Соответствующие выражения для секций ротора линейного синхронного двигателя, которые имеют прямоугольную форму, основаны на формулах, заимствованных из справочника [2]. В свою очередь, в [3] были получены выражения (формулы 2.6–2.8) для взаимных индуктивностей компланарных контуров, изображенных здесь на рис. 1, с использованием общего выражения для двух параллельных прямолинейных проводников (рис. 2) в виде

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} \left[l_1 \ln \frac{l'_2 + l_2 - l_1 + a_1}{l'_2 - l_1 + a'_1} + l_2 \ln \frac{l'_2 + l_2 + a'_2}{l'_2 + l_2 - l_1 + a_1} + l'_2 \ln \frac{(l'_2 + l_2 + a'_2)(l'_2 + l_1 + a'_1)}{(l'_2 + l_2 - l_1 + a_1)(l'_2 + a_2)} + a_1 + a_2 - a'_1 - a'_2 \right], \quad (1)$$

где $a_1 = \sqrt{(l_2 + l'_2 - l_1)^2 + h^2}$; $a_2 = \sqrt{(l'_2)^2 + h^2}$;
 $a'_1 = \sqrt{(l_1 - l'_2)^2 + h^2}$; $a'_2 = \sqrt{(l'_2 + l_2)^2 + h^2}$.

Далее в [1, 2] была приведена формула для индуктивности прямоугольной рамки (рис. 9-6 в [2]), которая без учета относительно малого последнего члена, но с учетом разницы в обозначениях не должна отличаться от формулы (2.10) в [3], известной еще по публикациям [4, 5], при числе витков $w = 1,0$ и толщине рамки, равной нулю (рис. 9-6 в [2]), и рис. 3, а именно:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ l_a \ln \frac{2l_a l_b}{a(l_a + l_c)} + l_b \ln \frac{2l_a l_b}{a(l_b + l_c)} + 2[l_c - (l_a + l_b)] \right\}, \quad (2)$$

где $l_c = \sqrt{l_a^2 + l_b^2}$.

Отсюда, к сожалению, и проистекает ошибка при записи выражений для сил на основе формулы (3.88) в [1], отличной от формулы (П.1) Приложения.

Используя (2), можно найти силы, приложенные к сторонам l_a и l_b прямоугольной рамки, в соответствии с выражениями

$$f_b = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial l_a}, \quad f_a = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L}{\partial l_b}.$$

Результаты определения сил без промежуточных детализаций могут быть записаны в виде ($w = 1,0$)

$$f_b = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi} \left[\ln \frac{2l_a l_b}{r(l_a + l_c)} + \frac{l_c}{l_a} - 1 \right]; \quad (3)$$

$$f_a = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi} \left[\ln \frac{2l_a l_b}{r(l_b + l_c)} + \frac{l_c}{l_b} - 1 \right], \quad (4)$$

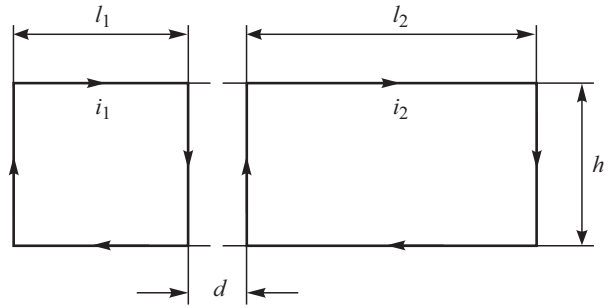


Рис. 1. Прямоугольные контуры, расположенные в одной плоскости

Fig. 1. In-plane rectangular loops

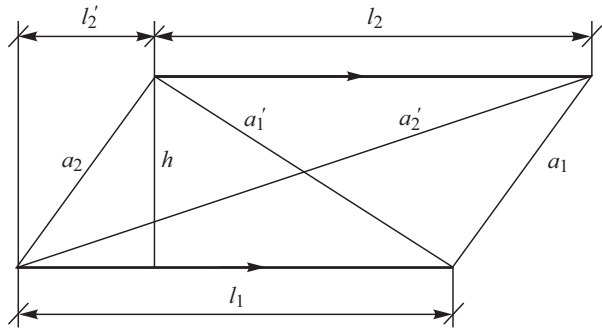


Рис. 2. Условные обозначения к формуле для коэффициента взаимной индукции двух параллельных прямолинейных проводников

Fig. 2. Symbols of the formula for mutual inductance coefficient of two parallel linear conductors

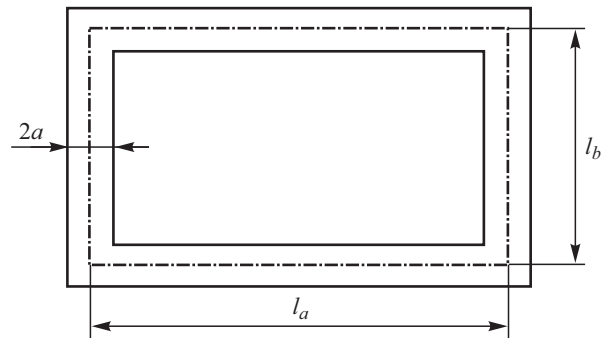


Рис. 3. Прямоугольная рамка шириной 2a как секция ротора

Fig. 3. Rectangular frame of 2a width representing a rotor section

но при этом обнаруживается разница между соответствующими формулами (3) и (4) с (3.90) и (3.91) в [1]. Последние в принятых здесь обозначениях записаны в виде

$$f_b = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi} \left[\ln \frac{l_a l_b}{r(l_a + l_c)} + \frac{l_c}{l_a} + \frac{1}{2} \right];$$

$$f_a = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi} \left[\ln \frac{l_a l_b}{r(l_b + l_c)} + \frac{l_c}{l_b} + \frac{1}{2} \right].$$

Обращает на себя внимание отсутствие в числителе двойки под знаком натурального логарифма, и вместо (-1) записано (+1/2). Продолжая сравнение, отметим, что выражение для взаимной индуктивности ближайших секций ротора (рис. 1) при $l_1 = l_2 = l$ должно отвечать записи в [3] в следующем окончательном виде:

$$M(l, d, h) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\begin{aligned} &2l \ln \frac{(2l+d)(l+d+S_l)}{(l+d)(2l+d+S_{2l})} + \\ &+ d \ln \frac{d(2l+d)(l+d+S_l)^2}{(l+d)^2(2l+d+S_{2l})(d+S_0)^2} + \\ &+ h \ln \frac{(h+S_l)^2(2l+d)d}{(l+d)^2(h+S_{2l})(h+S_0)} + \\ &+ 2(S_0+S_{2l}) - 4S_l \end{aligned} \right], \quad (5)$$

где $S_{2l} = \sqrt{h^2 + (2l+d)^2}$; $S_l = \sqrt{h^2 + (l+d)^2}$;
 $S_0 = \sqrt{h^2 + d^2}$. (6)

Для получения силы притяжения между соседними секциями в соответствии с рис. 4 нужно

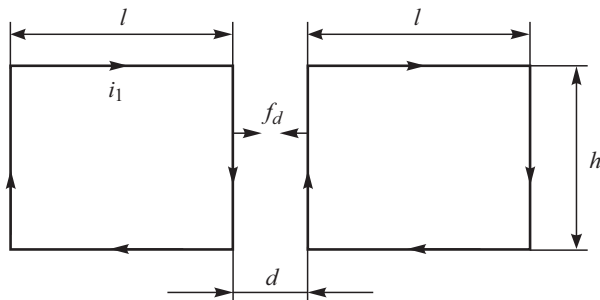


Рис. 4. К вопросу о силе притяжения между одинаковыми секциями с током
Fig. 4. On attraction force between similar live sections

воспользоваться следующей формулой ($w_1 = w_2 = 1,0$):

$$f_d = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial d}.$$

Результат дифференцирования позволяет записать силу в виде

$$f_d = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \left[\begin{aligned} &\ln \frac{d(2l+d)(l+d+S_l)^2}{(l+d)^2(2l+d+S_{2l})(d+S_0)} + \\ &+ \frac{2hl^2}{(2l+d)d(l+d)} + \frac{d}{h+S_0} + \\ &+ \frac{2l+d}{h+S_{2l}} - \frac{2(l+d)}{h+S_l} \end{aligned} \right]. \quad (7)$$

Запишем (7) иначе с учетом (6):

$$f_d = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \left[\begin{aligned} &\ln \frac{(l+d+\sqrt{h^2+(l+d)^2})^2}{(2l+d+\sqrt{h^2+(2l+d)^2})(d+\sqrt{h^2+d^2})} + \\ &+ \ln \frac{d(2l+d)}{(l+d)^2} + \frac{2hl^2}{(2l+d)d(l+d)} + \frac{(S_0-h)}{d} + \\ &+ \frac{(S_{2l}-h)}{2l+d} - \frac{2(S_l-h)}{l+d} \end{aligned} \right] =$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \left[\begin{aligned} &\ln \frac{(l+d+S_l)^2}{(2l+d+S_{2l})(d+S_0)} + \ln \frac{d(2l+d)}{(l+d)^2} + \\ &+ \frac{S_0}{d} + \frac{S_{2l}}{2l+d} - \frac{2S_l}{l+d} \end{aligned} \right]. \quad (7a)$$

Сопоставление (7a) с выражением (3.92) для силы в [1] с учетом разницы в обозначениях не оставляет сомнений в идентичности обоих выражений. Вместе с тем представляется целесообразным проверить выражение (5) с помощью общих формул для индуктивностей плоских контуров [2], кратко описанных и в [1] для определения взаимных индуктивностей секций ротора в соответствии с рис. 5.

Взаимная индуктивность секций i и k (рис. 5) при числе витков ($w = 1,0$) определяется в виде

$$M_{ik} = \frac{1}{2} [m(i+j+k) + m(j) - 2m(i+j)],$$

где $m(j)$, $m(i+j)$ и $m(i+j+k)$ равны

$$m(j) = \frac{\mu_0}{2\pi} l_j \left(\ln \frac{2S_j}{l_j} - \varphi_j \right);$$

$$m(i+j) = \frac{\mu_0}{2\pi} l_{i+j} \left(\ln \frac{2S_{i+j}}{l_{i+j}} - \varphi_{i+j} \right);$$

$$m(i+j+k) = \frac{\mu_0}{2\pi} l_{i+j+k} \left(\ln \frac{2S_{i+j+k}}{l_{i+j+k}} - \varphi_{i+j+k} \right),$$

где l_j , l_{i+j} , l_{i+j+k} – периметры прямоугольников; S_j , S_{i+j} , S_{i+j+k} – площади рассматриваемых прямоугольников. Величины φ_j , φ_{i+j} , φ_{i+j+k} определяются в соответствии с формулой для прямоугольников (4-31) в [2] как

$$\varphi = \frac{2a}{l} \ln \frac{a+D}{l} + \frac{2b}{l} \ln \frac{b+D}{l} - \frac{4D}{l} + 2,$$

где $l = 2(a+b)$; a и b – стороны прямоугольника; D – его диагональ.

Выписывая φ_j , φ_{i+j} и φ_{i+j+k} на основании предшествующего выражения и осуществляя необходимые преобразования, можно удостовериться в полной идентичности окончательного результата с выражением (5).

Приложение

Appendix

Откорректированная формула для индуктивности прямоугольной рамки (рис. 3) с учетом внутренней индуктивности записывается в виде

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ \begin{aligned} &(l_a + l_b) \ln \frac{2l_a l_b}{a} - l_b \ln(l_b + l_c) - \\ &- l_a \ln(l_a + l_c) + 2l_c - 2(l_a + l_b) \left. \right\}. \quad (\text{П.1}) \\ &+ 0,25(l_a + l_b) \end{aligned} \right.$$

Тогда для индуктивности квадратной рамки при $l_a = l_b = s$ и $a = R$ будем иметь

$$\begin{aligned} L_{\text{кв}} &= \frac{2\mu_0 s}{\pi} \left\{ \ln \left[\left(\frac{2}{l + \sqrt{2}} \right) \frac{s}{R} \right] + \sqrt{2} - 1,75 \right\} = \\ &= \frac{2\mu_0 s}{\pi} \left[\ln \frac{s}{R} - 0,1882 + 1,4142 - 1,75 \right] = \\ &= \frac{2\mu_0 s}{\pi} \left(\ln \frac{s}{R} - 0,524 \right) \quad (\text{П.2}) \end{aligned}$$

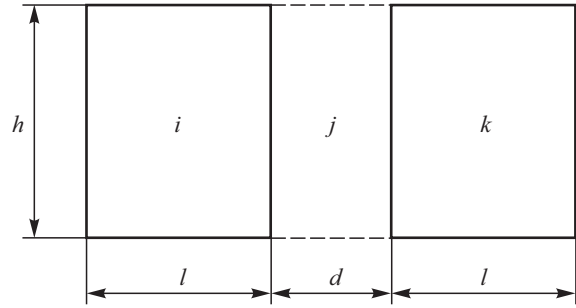


Рис. 5. К задаче определения взаимных индуктивностей секций ротора

Fig. 5. On determination of mutual rotor-section inductance

в полном согласии с выражением 60 в [6], записанном в виде

$$L = 0,008s \left[\ln \frac{s}{R} - 0,774 + \frac{\mu}{4} \right], \mu \text{Гн}. \quad (\text{П.3})$$

В (П.3) ρ для немагнитного материала $\mu = 1,0$ и линейные размеры берутся в сантиметрах.

Библиографический список

References

1. Коськин Ю.П., Цейтлин Л.А. Синхронные машины с немагнитным ротором. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. [Koskin Yu.P., Tseitlin L.A. Synchronous machines with non-magnetic rotor. L.: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1990. (in Russian)].
2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. [Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. Calculation of inductances. Reference book. L.: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1986. (in Russian)].
3. Цицкиан Г.Н., Антипов М.Ю. Автономные электроэнергетические системы. Вопросы электробезопасности и электромагнитной совместимости. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2017. [Tsitsikyan G.N., Antipov M.Yu. Self-contained electric power systems. Issues of electric safety and electromagnetic compatibility. SPb.: Krylov State Research Centre, 2017. (in Russian)].
4. Lee Y. Antenna circuit design for RFID applications. Microchip AN 710 // Technol. Inc. Chandler. USA, 2003. P. 1–50.

5. *Paul L.R.* Inductance: loop and partial. New York: Willy, 2011.
6. *Grover F.W.* Inductance calculations, working formulas and tables. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1947.

Сведения об авторах

Цицикян Георгий Николаевич, д.т.н., профессор, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: +7 (812) 748-52-39. E-mail: George.20021940@mail.ru.

Бобровников Петр Васильевич, инженер 1 категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Тел.: +7 (812) 369-03-18. E-mail: set@sp.ru.

About the author

Tsitsikyan, Georgy N., D. Sc., Prof., Head of Sector – Deputy Head of Department, TSNII SET, KSRC. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-39. E-mail: George20021940@mail.ru.

Petr A. Bobrovnikov, 1st Category Engineer, SET Branch of Krylov State Research Centre. Tel.: +7 (812) 369-03-18. E-mail: set@sp.ru.

Поступила / Received: 19.03.18
Принята в печать / Accepted: 22.08.18
© Цицикян Г.Н., Бобровников П.В., 2018