

УДК 621.314.27

## ДВУХСТОРОННИЙ ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИЕЙ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Огарков Е.М., Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Чирков Д.А.

*ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
Пермь, e-mail: chirkov146@mail.ru*

В данной статье рассмотрены вопросы поперечного смещения вторичного немагнитного элемента относительно двухстороннего индуктора линейного асинхронного двигателя. Показано, что в ряде случаев оказывается целесообразным искусственно смещать вторичный элемент в поперечном направлении относительно индуктора для изменения тягового усилия и скорости движения. Возникающее при этом поперечное усилие может быть использовано как рабочее в некоторых устройствах специального назначения. Разработана расчетная модель и метод расчета характеристик двигателя при поперечном смещении вторичного элемента. Исследовано влияние поперечного смещения вторичного элемента, ширины индуктора и вторичного элемента на величину тягового и поперечного усилий. Показано, что путем изменения поперечного смещения вторичного элемента относительно индуктора можно регулировать тяговое усилие линейного двигателя. Данный способ может быть использован для регулирования тягового усилия и скорости специальных транспортных систем. Выполнена экспериментальная проверка разработанных методов. Показано, что они обеспечивают достаточную для практических целей точность расчета магнитного поля и интегральных характеристик линейного асинхронного двигателя с двухсторонним индуктором, как при симметричном положении, так и при поперечном смещении вторичного элемента относительно индуктора.

**Ключевые слова:** двухсторонний линейный асинхронный двигатель, уравнения электромагнитного поля, векторный потенциал, скалярный потенциал, тяговое усилие

## DOUBLE SIDED LINEAR INDUCTION MOTOR WITH TRANSVERSE ASYMMETRY FOR SPECIAL TRANSPORT SYSTEMS

Ogarkov E.M., Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D., Chirkov D.A.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Perm National Research  
Polytechnic University, Perm, e-mail: chirkov146@mail.ru*

This article considers questions of the transverse displacement of the secondary non-magnetic element with respect to the double sided inductor of linear induction motor. It is shown that in several cases it is expedient to displace artificially the secondary element in the transverse direction relative to the inductor for changing the driving force and the movement speed. The arising transverse force can be used as the operating in some devices of special purposes. A calculation model and method of calculating the characteristics of the motor at the transverse displacement of the secondary element were developed. The effect of the transverse displacement of the secondary element, width of the inductor and the secondary element on the value of the driving and transverse forces was researched. It was shown that by changing the transverse displacement of the secondary element relative to the inductor can adjust the driving force of a linear motor. This method can be used to control the driving force and the speed of special transport systems. The experimental verification of the developed methods was executed. It was shown that they provide sufficient for practical purposes accuracy of calculating the magnetic field and the integral characteristics of a linear induction motor with double sided inductor both in the symmetrical position and at transverse displacement of the secondary element relative to the inductor.

**Keywords:** double sided linear induction motor, electromagnetic field equations, vector potential, scalar potential, driving force

Линейные электродвигатели находят достаточно широкое применение в различных отраслях промышленности и на транспорте. Поэтому работы по исследованию, разработке и внедрению таких машин интенсивно ведутся как в России, так и в других странах.

По конструктивным и экономическим соображениям вторичный элемент линейного асинхронного двигателя с двухсторонним индуктором (ДЛАД) выполняется из сплошной немагнитной полосы. В транспортных системах с ДЛАД вторичный элемент часто бывает смещён в поперечном направлении относительно индуктора, что обусловлено

односторонним креплением вторичного элемента к путевой структуре и рабочим смещением в процессе эксплуатации.

В ряде случаев оказывается целесообразным искусственно смещать вторичный элемент в поперечном направлении относительно индуктора для изменения тягового усилия и скорости движения. Возникающее при этом поперечное усилие может быть использовано как рабочее в некоторых устройствах специального назначения [1–4].

Ограниченность ширины индуктора и вторичного элемента ДЛАД приводит к неравномерному распределению электромагнитного поля в поперечном направлении.

Неравномерность распределения поля ещё больше возрастает при поперечном смещении вторичного элемента относительно индуктора.

При ограниченной ширине индуктора и вторичного элемента возникают поперечные усилия  $F_1$  и  $F_2$ , показанные на рис. 1. Эти усилия обусловлены взаимодействием продольных составляющих индуцированного во вторичном элементе тока с нормальной составляющей магнитной индукции в зазоре, возбуждаемой обмоткой индуктора. Результирующее поперечное усилие в этом случае оказывается равным нулю.

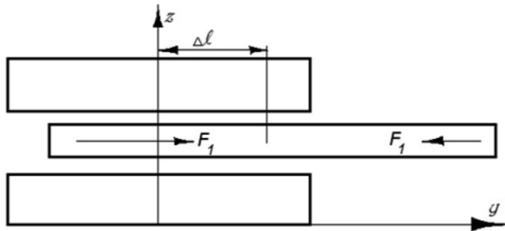


Рис. 1. Поперечное усилие при смещении вторичного элемента

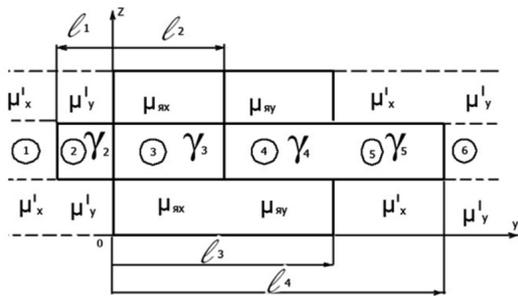


Рис. 2. Расчетная модель ДЛАД при поперечном смещении вторичного элемента

Поперечное смещение немагнитного вторичного элемента приводит к асимметрии индуцированных токов и магнитных полей по ширине вторичного элемента. Поэтому усилие  $F_1$  становится больше, чем усилие  $F_2$ , и появляется неуравновешенное поперечное усилие  $F_n = F_1 - F_2$ , которое всегда будет направлено в сторону смещения вторичного элемента.

Для аналитического исследования характеристик ДЛАД при поперечном смещении вторичного элемента относительно индуктора была разработана расчетная мо-

дель, позволяющая учесть реальный характер электромагнитного поля в боковых зонах. Эта модель показана на рис. 2.

В основу расчетной модели положены следующие допущения:

1. Длина ДЛАД достаточно велика и продольный краевой эффект отсутствует.

2. Наличие пазов на поверхности индуктора учитывается соответствующим увеличением зазора.

3. Вторичный элемент полностью заполняет эквивалентный зазор  $\delta'$ , имеет расчетные электропроводности  $\gamma_2 - \gamma_5$  и движется с постоянной скоростью в направлении оси  $x$ . Ось  $X$  перпендикулярна плоскости рисунка.

4. Магнитная проницаемость в зонах 1–6 по направлению оси  $Z$  равна  $\mu_0$ , а по направлению осей  $X$  и  $Y$  принята равной нулю [5]. При этом в зазоре будет только одна составляющая магнитной индукции, совпадающая по направлению с осью  $Z$ .

5. Магнитная проницаемость яра индуктора по направлению оси  $Z$  равна бесконечности, а в продольном и поперечном направлении имеет значения  $\mu_{яx}$  и  $\mu_{яy}$ .

6. Магнитное поле в боковой зоне полностью замыкается по бесконечно длинным расчетным шунтирующим участкам. Магнитная проницаемость шунтирующих участков по оси  $Z$  равна бесконечности, а по направлению осей  $X$  и  $Y$  определяются из условия, чтобы магнитное поле в боковых зонах было близким к реальному [5].

$$\mu'_x = \mu_0 / (\alpha \cdot h_{я}), \mu'_y = \mu_0 (1 + h_{п} / h_{я}),$$

где  $\alpha = \pi / \tau$ ;

$h_{п}$ ,  $h_{я}$  – высота паза и яра индуктора;

$\tau$  – длина полюсного деления.

При таком допущении магнитное поле боковых зон равномерно распределяется по высоте шунтирующих участков, что значительно упрощает расчеты. В расчетной модели различная ширина и смещение вторичного элемента относительно индуктора учитывается соответствующим изменением ширины и электропроводности зон (2–5).

Согласно принятым допущениям среда во всех зонах расчетной модели является магнито-анизотропной. На базе основных уравнений электромагнитного поля, используя граничные условия между зазором и индуктором, получены дифференциальные уравнения векторного потенциала в проводящей среде зазора с учётом анизотропных магнитных свойств яра и скалярного потенциала электрического поля [5].

$$\frac{d^4 \dot{A}_y}{dy^4} - (\alpha^2 \beta_\mu^2 + q_1^2) \frac{d^2 \dot{A}_y}{dy^2} + \alpha^2 \beta_\mu^2 \cdot q_2^2 \cdot \dot{A}_y = \mu_0 \beta_\mu^2 \alpha^2 J_m, \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{A}_y}{dy} - i \cdot \alpha \cdot \beta_\mu^2 \cdot \dot{A}_x = 0, \quad (2)$$

где

$$q_1^2 = \alpha^2 + \beta_\mu^2 + i\mu_0\omega\gamma s; \beta_\mu^2 = \frac{\mu_{yx}}{\mu_{yy}}; q_2^2 = \alpha^2 + \beta_x^2 + i\mu_0\omega\gamma s; \beta_x^2 = \frac{2\mu_0}{\mu_{yx}h_y\delta r}.$$

Решения уравнений (1) и (2) для составляющих  $\dot{A}_x, \dot{A}_y$  в виде табулированных функций комплексного аргумента.

$$\dot{A}_y = \frac{\mu_0 J_m}{q_2^2} + \dot{C}_{11} e^{p_{11}y} + \dot{C}_{12} e^{-p_{11}y} + \dot{C}_{13} e^{p_{13}y} + \dot{C}_{14} e^{-p_{13}y}, \quad (3)$$

$$\dot{A}_x = -\frac{i}{\alpha\beta_\mu^2} (\dot{C}_{11} p_{11} e^{p_{11}y} - \dot{C}_{12} p_{11} e^{-p_{11}y} + \dot{C}_{13} p_{13} e^{p_{13}y} - \dot{C}_{14} p_{13} e^{-p_{13}y}), \quad (4)$$

где  $\dot{C}_{11}, \dot{C}_{12}, \dot{C}_{13}, \dot{C}_{14}$  – постоянные интегрирования;

$p_{11}, p_{13}$  – корни характеристического уравнения.

Уравнения (1) и (2) описывают электромагнитное поле в электропроводящих зонах (2–5) расчетной модели. В зонах 1 и 6 проводящая среда отсутствует и скалярный потенциал  $\phi$  равен нулю, поэтому в этих зонах электромагнитное поле описывается более простыми уравнениями.

$$\frac{d^2 \dot{A}_y}{dy^2} - \beta_\mu^2 (\alpha^2 + \beta_x^2) \dot{A}_y = -\mu_0 \beta_\mu^2 \cdot J_m. \quad (5)$$

Решение уравнения

$$\dot{A}_y = \frac{\mu_0 J_m}{\alpha^2 + \beta_x^2} + \dot{C}_{31} e^{p_3 y} + \dot{C}_{32} e^{-p_3 y}, \quad (6)$$

где  $\dot{C}_{31}, \dot{C}_{32}$  – постоянные интегрирования;  $p_3$  – корень характеристического уравнения.

Значение  $\dot{A}_x$  находят из (2).

Постоянные интегрирования определялись из граничных уравнений. В качестве граничных условий использовались равенства касательных составляющих векторного потенциала, напряженности электрических и магнитных полей, а также условие непрерывности индуцированного тока в проводящей среде.

$$\dot{A}_{x(n)} = \dot{A}_{x(n+1)}, H_{x(n)} = H_{x(n+1)}, \quad (7)$$

$$\dot{E}_{x(n)} = \dot{E}_{x(n+1)}, \dot{I}_{y(n)} = \dot{I}_{y(n+1)}$$

где  $(n)$  и  $(n+1)$  – номера соседних зон.

Параметры электромагнитного поля и интегральные характеристики ДЛАД достаточно просто определяются через потенциалы поля.

Магнитная индукция в зазоре

$$B_z = \frac{\partial \dot{A}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{A}_x}{\partial y}. \quad (8)$$

Напряженность электрического поля вторичного элемента

$$\dot{E}_x = -i\omega \dot{A}_x - \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (9)$$

$$\dot{E}_y = -i\omega \dot{A}_y - \frac{\partial \phi}{\partial y} - \gamma v \cdot \left( \frac{\partial \dot{A}_y}{\partial x} - \frac{\partial \dot{A}_x}{\partial y} \right). \quad (10)$$

Ток, индуцированный во вторичном элементе

$$\dot{I}_x = \gamma \dot{E}_x, \dot{I}_y = \gamma \dot{E}_y. \quad (11)$$

Электромагнитная мощность

$$S_{(n)} = i\omega \delta' \int_{Q_{(n)}} \dot{A}_{y(n)} \dot{I}_m d\theta. \quad (12)$$

Тяговое усилие

$$F_T = \delta' \operatorname{Re} \left[ \int_{Q_{(n)}} B_{z(n)} \dot{I}_{y(n)} d\theta \right], \quad (13)$$

где  $Q_{(n)}$  – площадь зоны  $n$ .

Электромагнитное поле, мощности и тяговое усилие при поперечном смещении вторичного элемента рассчитываются по выражениям (8–13), а поперечные усилия в электропроводящих зонах (2–5) определяются по формуле

$$F_{\Pi} = \delta' \operatorname{Re} \left[ \int_{Q_{(n)}} B_{z(n)} \dot{I}_{x(n)} dQ \right]. \quad (14)$$

Результирующее поперечное усилие, действующее на вторичный элемент, равно сумме поперечных усилий этих зон.

По полученным выражениям была составлена программа расчета характеристик ДЛАД при поперечном смещении вторичного элемента, реализованная на ЭВМ.

Расчетные тяговые и поперечные усилия приведены на рис. 3, откуда следует, что при увеличении поперечного смещения тяговое усилие монотонно уменьшается, а поперечное усилие вначале увеличивается, достигая своего максимального значения, а затем уменьшается. Максимальное поперечное усилие возникает при входе края вторичного элемента в зону индуктора и достигает порядка 50% от максимального тягового усилия при симметричном положении вторичного элемента.

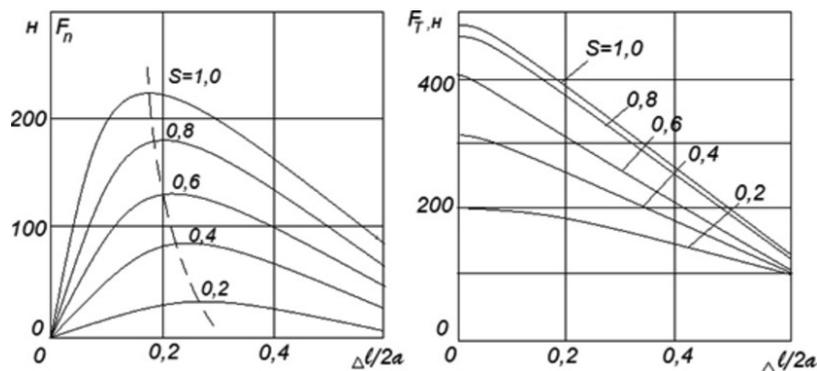


Рис. 3. Расчетные тяговые ( $F_t$ ) и поперечные ( $F_n$ ) усилия ДЛАД при поперечном смещении вторичного элемента

Для оценки точности разработанного метода расчета были выполнены экспериментальные исследования на круговом асинхронном двигателе. В качестве вторичного элемента использовался шихтованный ротор, покрытый медной лентой. При этом предусматривалась возможность смещения проводящей ленты в поперечном направлении относительно индуктора.

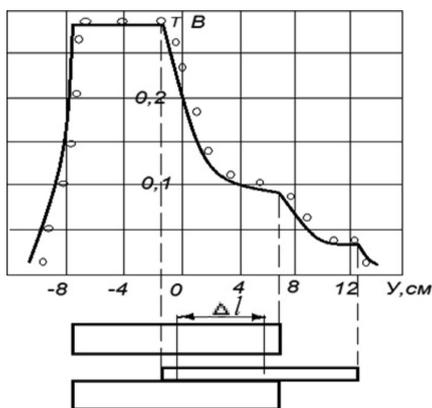


Рис. 4. Распределение индукции по ширине двигателя ( $\Delta l = 0,052$  м): непрерывной линией – расчет, кружками – экспериментальные точки

На рис. 4 показано положение проводящей ленты относительно индуктора и приведены экспериментальные и расчетные значения магнитной индукции в зазоре и в боковых зонах. Согласно этому рисунку поперечное смещение проводящей ленты приводит к значительной асимметрии распределения магнитной индукции по ширине двигателя. При этом на правом краю индуктора наблюдается значительное уменьшение магнитной индукции за счет размагничивающего действия индуцированных во вторичном элементе токов.

На рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные характеристики двигателя при поперечном смещении проводящей ленты. Расчетные зависимости изображены сплошными линиями, экспериментальные – точками.

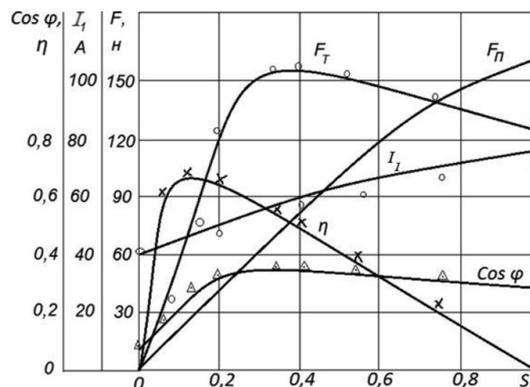


Рис. 5. Характеристики двигателя при  $\Delta l = 0,052$  м

Сопоставление результатов расчёта и эксперимента позволяет сделать вывод об удовлетворительной точности расчёта характеристик двигателя при поперечном смещении вторичного элемента.

Результаты проведенных исследований были использованы при проектировании линейных и дугостаторных асинхронных двигателей для транспортных систем общепромышленного и специального назначения, а также при создании тихоходного двигателя для электропривода станков-качалок в нефтяной промышленности.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО ПНИПУ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.310068 от 23.05.2013 г. в соста-

ве мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

### Список литературы

1. Аипов Р.С., Линенко А.В. Разработка и создание энергосберегающих установок с линейными асинхронными приводами для предприятий АПК. Материалы III международной конференции. Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. Сб. научных трудов. – Екатеринбург, 2014. – С. 152–155.

2. Огарков Е.М., Коротаев А.Д., Цылёв П.Н. Поперечный краевой эффект линейной индукционной машины при несимметричном расположении реактивной шины относительно индуктора. В кн.: Семинар по прикладной магнитной гидродинамике: Тез. докладов, АН СССР, Уральский научный центр., Отдел физики полимеров. – Пермь, 1978. – ч. II. – С. 66–68.

3. Огарков Е.М., Коротаев А.Д., Русов В.А. Расчёт расширения электромагнитного поля по ширине линейной индукционной машины. В кн.: Девятое Рижское совещание по магнитной гидродинамике. МГД – машины: Тезис доклада – Рига: Институт физики АН Латв. ССР, 1978. – ч. II. – С. 37–38.

4. Огарков Е.М. Квазитрёхмерная теория линейных асинхронных двигателей / Перм. гос. тех. ун-т. – Пермь, 2003. – 240 с.

5. Огарков Е.М., Коротаев А.Д. Поперечный эффект линейных асинхронных двигателей с учетом анизотропии вторичного элемента. Электричество. – 1991. – № 4. – С. 36–40.

### References

1. Aipov R.S., Linenko A.V. Razrabotka i sozdanie jenergosberegajushhh ustanovok s linejnymi asinhronnymi privodami dlja predpriyatij APK. Materialy III mezhdunarodnoj konferencii. Aktualnye problemy jenergosberegajushhh jelektrotehnologij. Sb. nauchnyh trudov. Ekaterinburg, 2014. pp. 152–155.

2. Ogarkov E.M., Korotaev A.D., Cylyov P.N. Poperechnyj kraevoj jeffekt linejnoy indukcionnoj mashiny pri nesimmetrichnom raspolozhenii reaktivnoj shiny otnositelno induktora. V kn.: Seminar po prikladnoj magnitnoj gidrodinamike: Tez. dokladov, AN.SSSR, Uralskij nauchnyj centr., Otdel fiziki polimerov. Perm, 1978. ch. II. pp. 66–68.

3. Ogarkov E.M., Korotaev A.D., Rusov V.A. Raschjot rasshirenija jelektromagnitnogo polja po shirine linejnoy indukcionnoj mashiny. V kn.: Devjatoe Rizhskoe soveshhanie po magnitnoj gidrodinamike. MGD mashiny: Tezis doklada Riga: Institut fiziki AN Latv. SSR, 1978. ch. II. pp. 37–38.

4. Ogarkov E.M. Kvazitrehmernaja teorija linejnyh asinhronnyh dvigatelej / Perm. gos. teh. un-t. Perm, 2003. 240 p.

5. Ogarkov E.M., Korotaev A.D. Poperechnyj jeffekt linejnyh asinhronnyh dvigatelej s uchetom anizotropii vtorichnogo jelementa. Jelektrichestvo. 1991. no. 4. pp. 36–40.