

Научная статья
 УДК 621.313.333.821
 doi:10.35694/YARCX.2023.64.4.013

МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОСКОРОСТНОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Алексей Павлович Епифанов¹, Дмитрий Богданович Криль²

^{1,2}Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹emeo.kaf@yandex.ru

²bruder_dan@mail.ru

Реферат. Модернизация внутреннего транспорта тепличных хозяйств и животноводческих ферм обусловлена оптимизацией трудовых затрат на перемещение различных грузов. Для грамотного проектирования электропривода на базе линейного асинхронного двигателя (ЛАД) транспортного средства необходимо рационально подойти к вопросу выбора конструктивных параметров. Решить данную задачу позволит правильный выбор методики расчёта интегральных тягово-энергетических характеристик ЛАД. В статье проведён анализ существующих методик, дана оценка каждой из них и границы применимости. Показано, что самой точной и адекватной является трёхмерная методика, базирующаяся на рассмотрении магнитного поля в воздушном зазоре и вторичном элементе, погрешность расчётов с экспериментальными данными не превосходит 10%. Также рассмотрены методики, основанные на численных методах расчёта магнитного поля. Они подходят для детального анализа распределения магнитного поля в различных частях машины, требуют достаточно больших расчётных ресурсов ЭВМ (точность зависит от размера участков) и предназначены для научных исследований. Помимо этого дано пояснение о разделении ЛАД на высоко- и низкоскоростные, влияние продольного концевой эффекта на характеристики машины.

Ключевые слова: расчётная схема, низкие скорости, линейный асинхронный двигатель, интегральные характеристики

THE CALCULATION METHODS OF INTEGRAL CHARACTERISTICS OF A LOW-SPEED LINEAR INDUCTION ELECTRIC DRIVE

Aleksey P. Epifanov¹, Dmitriy B. Kril²

^{1,2}Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

¹emeo.kaf@yandex.ru

²bruder_dan@mail.ru

Abstract. The modernization of internal transport of greenhouse facilities and livestock enterprises is due to the optimization of labor costs for shifting of various cargoes. To proper design an electric drive based on a linear induction motor (LIM) of a vehicle, it is necessary to rationally approach the issue of choosing design parameters. This problem will be solved by the correct choice of methodology for calculating the integral traction and energy characteristics of LIM. The article analyzed existing methods, assessed each of them and the limits of applicability. It has been shown that the most accurate and adequate is the three-dimensional method based on the consideration of the magnetic field in the air gap and the secondary element, the calculating error with experimental data does not exceed 10%. Techniques based on numerical methods of magnetic field calculation are also considered. They are suitable for a detailed analysis of the magnetic field distribution in various parts of the machine, require quite large designed life of ECM (the accuracy depends on the size of the sections) and are intended for scientific research. In addition, an explanation is given about the division of LIM into high- and low-speed, the influence of the longitudinal end effect on the characteristics of the machine.

Keywords: design diagram, low speeds, linear induction motor, integral characteristics

Введение. Перспектива модернизации внутреннего транспорта животноводческих ферм и тепличных хозяйств посредством использования монорельсовой транспортной системы, а также применение электропривода на базе линейного асинхронного двигателя (ЛАД) в таких системах была представлена и обоснована в работах [1; 2]. Там же приведены объективные доводы в пользу замены классического типа электропривода по системе «Вращающийся асинхронный двигатель – редуктор – ведущее колесо» на электропривод по системе «ЛАД – преобразователь частоты (ПЧ)».

Для получения объективных результатов при проектировании линейных асинхронных машин и рационального выбора конструктивных параметров необходимо выполнить анализ существующих методик расчёта интегральных характеристик ЛАД и выбрать ту, которая будет учитывать не только физические процессы, лежащие в основе принципа действия машины, но и особенности конструкции (краевые эффекты) и работы при низких скоростях.

Подávляющая часть научных публикаций в области исследований ЛАД посвящена изучению краевых эффектов, меньшая часть – анализу физических процессов [3; 4; 5], которые, по сути, аналогичны тем, что и во вращающихся асинхронных машинах и трансформаторах.

Методика. Расчётные методики интегральных характеристик (усилия, мощности, энергетические показатели) делятся на две категории:

- методики, в основе которых лежит решение задачи из теории поля и его распределении в воздушном зазоре и вторичном элементе;
- методики, базирующиеся на численных методах расчёта электромагнитного поля ЛАД (рис. 1).

В свою очередь, первые, в зависимости от принятых допущений и количества ортогональных осей, подразделяются на: а) одномерные; б) двумерные; в) трёхмерные (рис. 2) [3; 4]. Вторые же сводятся к составлению схем замещения с распределёнными параметрами или детализированных схем замещения с сосредоточенными параметрами [3].

Сначала были разработаны одномерные модели, которые учитывают распределение поля только в одном направлении – вдоль индуктора. Это обстоятельство, в совокупности с принятыми допущениями, не позволяет получить объективные характеристики машины. Погрешность расчётов зависит не только от отношения $\frac{\tau}{\delta}$, но и от типа обмотки (однослойная, двухслойная, с полузаполненными крайними пазми), а также от длины индуктора и реального количества магнитных полюсов. В большинстве случаев эта погрешность

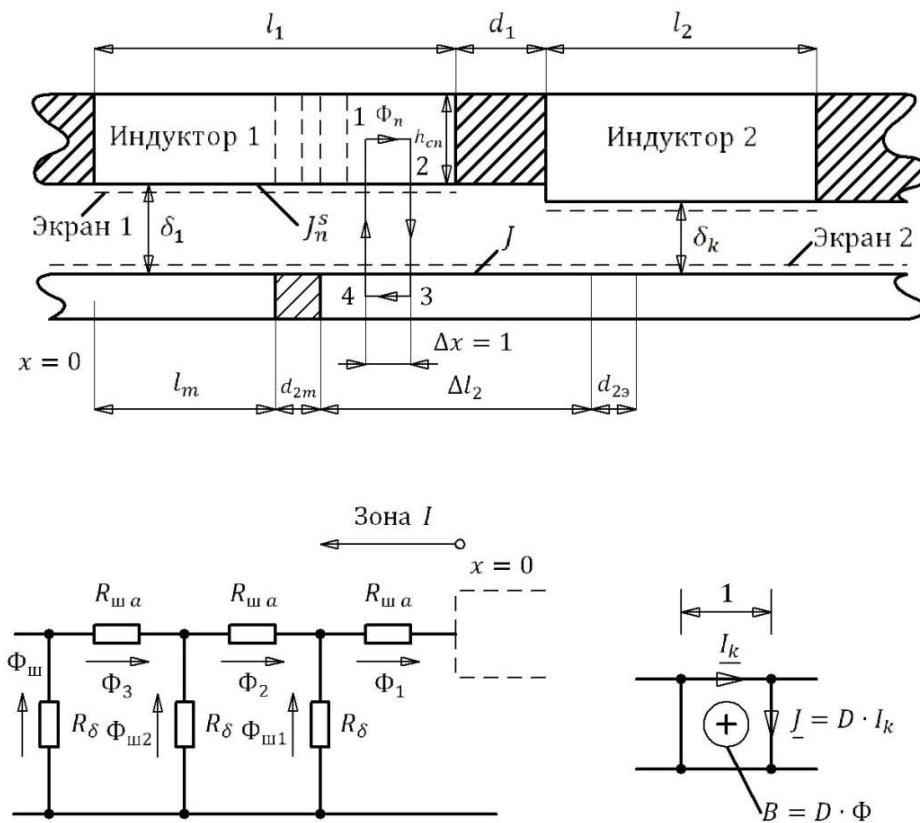
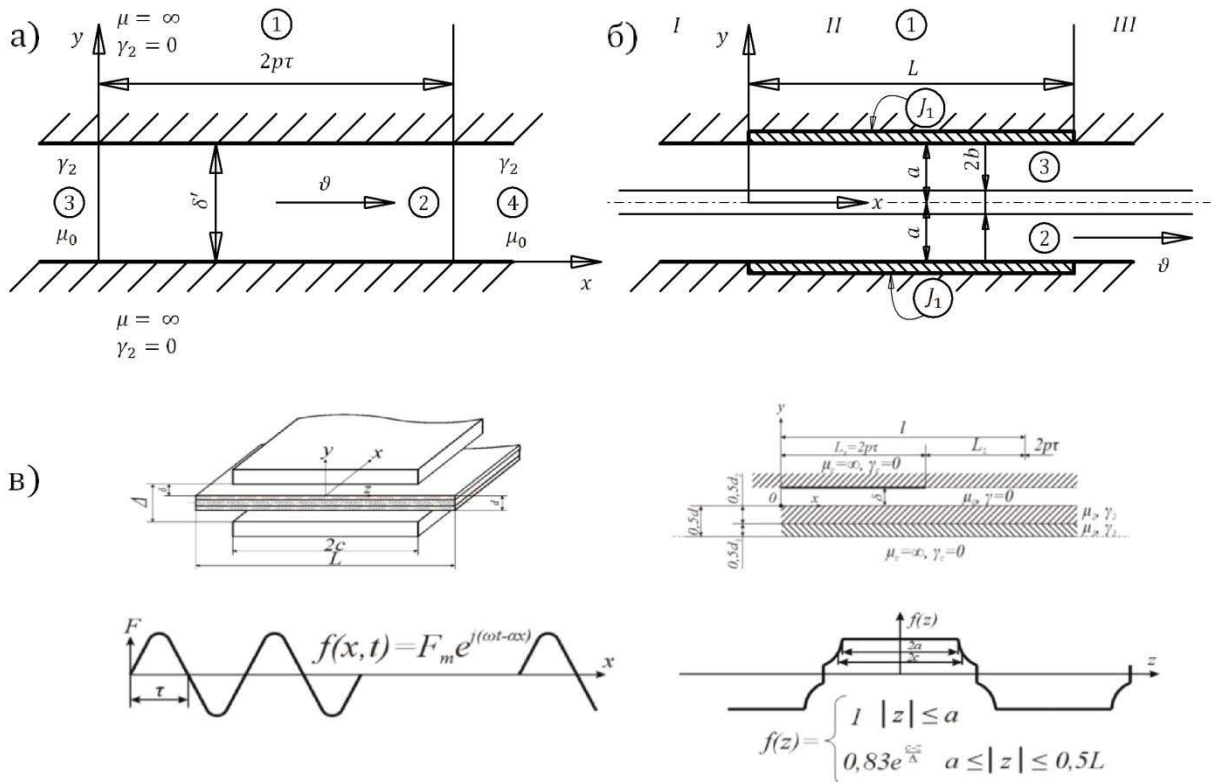


Рисунок 1 – Методика для расчёта электромагнитного поля численными методами (схема замещения с распределёнными параметрами)

Методики расчёта интегральных характеристик низкоскоростного линейного асинхронного электропривода



а) одномерная; б) двумерная; в) трёхмерная.

Рисунок 2 – Методики для расчёта электромагнитного поля (теория поля)

составляет 10 ÷ 20% [6], однако в случае коротких индукторов, в которых уложена двухслойная обмотка с полузаполненными крайними пазы, она может составлять 50 ÷ 60%. Из этого следует, что данная модель является оценочной.

Двухмерные модели стали результатом развития одномерной теории, поскольку магнитное поле в воздушном зазоре, помимо координаты x (по длине индуктора), имеет также составляющую по оси y (по ширине индуктора). Допущения для данной модели остаются такими же, что и для одномерной, за исключением того, что индуктор имеет конечную ширину. Анализ двухмерной модели является более точным на количественном уровне по сравнению с предыдущей моделью. Однако, как было сказано выше, анализ ЛАД при помощи одномерной методики в большинстве случаев практического применения также достаточно точен.

Самым точным является анализ трёхмерной модели, которая проводит расчёт магнитного поля по всем трём пространственным координатам, а также неравномерное распределение индукции магнитного поля в воздушном зазоре, вызванное продольным краевым эффектом.

При разработке вышеперечисленных методик сделаны следующие допущения: а) система фазных токов и напряжений в фазах симметричная;

б) магнитная проницаемость сердечников индукторов и обратного магнитопровода равна бесконечности $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ (в трёхмерной методике её можно задать произвольным постоянным числом). Это позволяет не учитывать насыщение отдельных участков магнитной цепи – сделать модель линейной; в) электропроводность сердечников индукторов $\gamma_1 = 0$ – тогда мы пренебрегаем влиянием поверхностного эффекта, вызванного вихревыми токами, электропроводность вторичного элемента (ВЭ) или обратного магнитопровода может быть также принята равной нулю или задана постоянным числом, соответствующим материалу; г) не учитывается распределение обмотки и наличие пазов – токи индуктора и ВЭ расположены в тонких слоях на их поверхностях. Учёт пазовой структуры осуществляется с помощью коэффициента Картера [7]; д) продольный и поперечный краевые эффекты учтены конечностью намагничивающих сил, но не сердечников.

В большинстве методов расчёт характеристик производится при питании обмоток индуктора от источника тока ($I_1 = const$). Это упрощает анализ, поскольку при изменении тока во ВЭ I_2 ток I_1 потери ΔP_{Cu1} , МДС F_1 линейная токовая нагрузка A_1 и плотность тока J_1 изменяться не будут. Однако следует учитывать, что механические характеристики ЛАД (как и вращающихся АД) при питании

от источника тока будут отличаться от таковых при питании ЭДС. В первом случае характеристика будет более жёсткая, т.е. $S_{kp}(I=const) < S_{kp}(E=const)$ и мощность P_2 для одной и той же частоты вращения будут различаться. Также нужно помнить, что эквивалентная замена идеального источника тока на идеальный источник ЭДС (напряжения) и наоборот невозможна [8].

Расчётные модели, базирующиеся на численных методах решения дифференциальных уравнений, составленных для магнитного потенциала A (1) (одномерные и двухмерные), подразумевают разбижку пространства, занятого магнитным полем на зоны, в пределах которых $\mu = const$. Эти зоны формируют сетку, состоящую из нескольких сотен узлов. Наиболее широкое применение для расчёта магнитного поля получил численный метод конечных элементов [3], в котором решение дифференциального уравнения (1) сводится к отысканию максимума функционала (2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J_{cm} - \gamma \cdot \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$F = \iint_G \left[\frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right\} - J_{cm} - \gamma \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \right] \cdot dx \cdot dy \text{ по } A \quad (2)$$

Точность получаемых результатов зависит лишь от вида и подробности (числа участков) разбиения области на элементы. Большое количество расчётных операций для каждого узла и вычисление магнитного состояния схемы замещения для i -слоёв подразумевает, что возможности использования таких моделей требуют достаточных вычислительных ресурсов.

Отдельно следует пояснить про классификацию ЛАД на высокоскоростные и низкоскоростные [3; 4]. Для анализа электромагнитных процессов в ЛАД был введён критерий:

$$\varepsilon_0 = \frac{\mu_0 \cdot v^2}{4 \cdot \omega \cdot \rho_s \cdot g}, \quad (3)$$

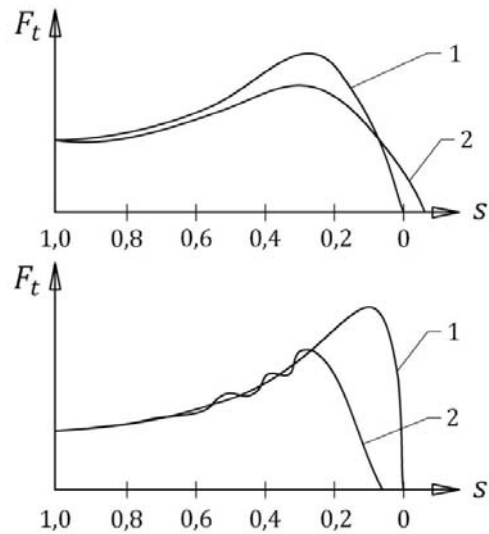
где ω – круговая частота; v – скорость движения подвижной части ЛАД (бегуна); ρ_s – удельное поверхностное сопротивление ВЭ; g – расстояние между индукторами.

Или по [4]:

$$\varepsilon_0 = \frac{\mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot \omega}{\alpha^2} = \frac{\mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot \omega \cdot \tau^2}{\pi^2}, \quad (4)$$

где γ_2 – удельная электропроводность ВЭ; τ – полюсное деление индуктора; α – волновое число $= \frac{\pi}{\tau}$.

Данный критерий получил название «магнитное число Рейнольдса», или электромагнитная добротность машины. Если $\varepsilon_0 \leq 1$ – двигатель низкоскоростной, если $\varepsilon_0 \gg 1$ – двигатель высо-



1 – без учёта продольного концевго эффекта; 2 – с его учётом;
а) схема замещения с распределёнными параметрами;
б) схема замещения с сосредоточенными параметрами.

Рисунок 3 – Влияние продольного концевго эффекта на механическую характеристику низкоскоростного (а) и высокоскоростного (б) ЛАД

коскоростной. Из анализа глубины проникновения волны продольного краевого эффекта (рис. 3) следует, что её влияние на характеристики высокоскоростных двигателей значительно больше, чем у низкоскоростных, особенно в области пониженных скольжений. На рис. 3 видно, что продольный концевой эффект в низкоскоростных двигателях уменьшает тяговое усилие F_x в области высоких скольжений и увеличивает его в области низких скольжений (в рабочей области). Количественное влияние этого эффекта связано не только со скоростью движения двигателя, но и с длиной индуктора и типом обмотки. При $L_{инд} \geq \frac{v_s}{2} \geq \frac{2 \cdot \tau \cdot f_1}{2} \geq \tau \cdot f_1$ и однослойной обмотке (или двухслойной с полностью заполненными крайними пазами) этим влиянием можно пренебречь.

Выводы. 1) При проектировании ЛАД для рационального выбора параметров и получения достаточно точных тягово-энергетических показателей необходимо проводить расчёты по трёхмерной методике, в то время как одномерная (двухмерная) методика может быть использована для оценочных расчётов черновых вариантов конструкции проектируемого ЛАД. 2) После расчёта характеристик по 3-мерной методике необходимо выполнить пересчёт некоторых характеристик при питании индуктора от источника ЭДС, в том числе и для определения устойчивости работы двигателя. 3) В низкоскоростных двигателях незначительным продольным краевым эффектом можно пренебречь.

Список источников

1. Епифанов А. П., Криль Д. Б. Анализ внутренних транспортных систем животноводческих комплексов и тепличных хозяйств и возможность их модернизации // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 1 (30). С. 33–43. ISSN 2410-5031.
2. Епифанов А. П., Малайчук Л. М., Самсонов Ю. А. Монорельсовый внутренний транспорт животноводческих комплексов и тепличных хозяйств с линейным асинхронным электроприводом // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2010. № 18. С. 235–242. ISSN 2078-1318.
3. Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф. Н. Линейные асинхронные двигатели. М. : Энергоатомиздат, 1991. 254 с. ISBN 5-283-00559-3.
4. Yamamura S., Ito H., Ishulawa Y. Theories of the Linear, Induction Motor and Compensated Linear Induction Motor // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1972. Vol. PAS-91, Is. 4. P. 1700–1710. DOI 10.1109/tpas.1972.293349.
5. Ahmadinia N. The linear induction motor (LIM) & single linear induction motor (SLIM) // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2014. Vol. 3, Is. 4. P. 71–75. DOI 10.11648/j.epes.20140304.11.
6. Scobelev V. E., Solovyev G. I., Epifanov A. P. The analysis of means of improving characteristics of linear induction traction motors for high-speed ground transport // Rail International. 1980. P. 369–381.
7. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 2. М.-Л. : «Энергия», 1965. 704 с.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М. : «Высшая школа», 1961. 791 с.

References

1. Epifanov A. P., Kril' D. B. Analiz vnutrennih transportnyh sistem zhivotnovodcheskih kompleksov i teplichnyh hozyajstv i vozmozhnost' ih modernizacii // Agrotekhnika i energoobespechenie. 2021. № 1 (30). S. 33–43. ISSN 2410-5031.
2. Epifanov A. P., Malajchuk L. M., Samsonov Yu. A. Monorel'sovyy vnutrennij transport zhivotnovodcheskih kompleksov i teplichnyh hozyajstv s linejnym asinhronnym elektroprivodom // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2010. № 18. S. 235–242. ISSN 2078-1318.
3. Veselovskij O. N., Konyaev A. Yu., Sarapulov F. N. Linejnye asinhronnye dvigateli. M. : Energoatomizdat, 1991. 254 s. ISBN 5-283-00559-3.
4. Yamamura S., Ito H., Ishulawa Y. Theories of the Linear, Induction Motor and Compensated Linear Induction Motor // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1972. Vol. PAS-91, Is. 4. P. 1700–1710. DOI 10.1109/tpas.1972.293349.
5. Ahmadinia N. The linear induction motor (LIM) & single linear induction motor (SLIM) // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2014. Vol. 3, Is. 4. P. 71–75. DOI 10.11648/j.epes.20140304.11.
6. Scobelev V. E., Solovyev G. I., Epifanov A. P. The analysis of means of improving characteristics of linear induction traction motors for high-speed ground transport // Rail International. 1980. P. 369–381.
7. Kostenko M. P., Piotrovskij L. M. Elektricheskie mashiny. Ch. 2. M.-L. : «Energiya», 1965. 704 s.
8. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. M. : «Vysshaya shkola», 1961. 791 s.

Сведения об авторах

Алексей Павлович Епифанов – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроэнергетики и электрооборудования, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», spin-код: 6774-3270.

Дмитрий Богданович Криль – старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электрооборудования, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», spin-код: 2185-9076.

Information about the authors

Aleksey P. Epifanov – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electrical Power Engineering and Electrical Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", spin-code: 6774-3270.

Dmitry B. Kril – Senior Lecturer of the Department of Electrical Power Engineering and Electrical Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", spin-code: 2185-9076.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.