

# Исследование тягового линейного асинхронного двигателя конвейерного поезда\*

Сарапулов Ф.Н., Смольянов И.А., Родионов И.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
г. Екатеринбург, Российская Федерация

[sarapulovfn@yandex.ru](mailto:sarapulovfn@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе рассматриваются результаты исследования тягового линейного асинхронного двигателя (ЛАД) для конвейерного транспорта в горнодобывающей промышленности. Описывается конструкция тягового двигателя. Приводятся результаты расчета характеристик двигателя с помощью метода детализированных магнитных схем замещения. Исследуется влияние выбора ферромагнитного материала (массивной стали 3, стали 20, а также шихтованной стали 2211) вторичного элемента (ВЭ) на характеристики двигателя. Показано влияние насыщения ферромагнитного слоя ВЭ на тяговое усилие двигателя. Оцениваются нормальные (притяжения и левитации) усилия, действующие на тележку конвейерного поезда. Полученные расчетные показатели двигателя сравниваются с полученными на заводе-изготовителе двигателей.

**Ключевые слова:** линейный асинхронный двигатель; конструкция; массивный вторичный элемент; характеристики; схемы замещения; тяговое усилие; показатели двигателя.

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация добычи полезных ископаемых открытым способом, повышение глубины разрезов и карьеров при высокой загазованности окружающей среды, ограниченный угол подъема рельсового пути или дорожного полотна делает актуальным создание экологически чистого вида рельсового транспорта, грузонесущий элемент которого способен двигаться со скоростью 40...50 км/час по рельсовому пути с углом подъема 10...12 градусов, а в отдельных случаях непродолжительно и 18...20 градусов, при исключении зависимости передаваемого тягового усилия от коэффициента трения. Таким видом транспорта является транспорт на базе конвейерных (тележечных) поездов (КП) с линейным асинхронным многодвигательным электроприводом (ЭП).

В работе рассматриваются некоторые результаты исследования тягового линейного асинхронного двигателя (ЛАД) для конвейерного транспорта [1-7].

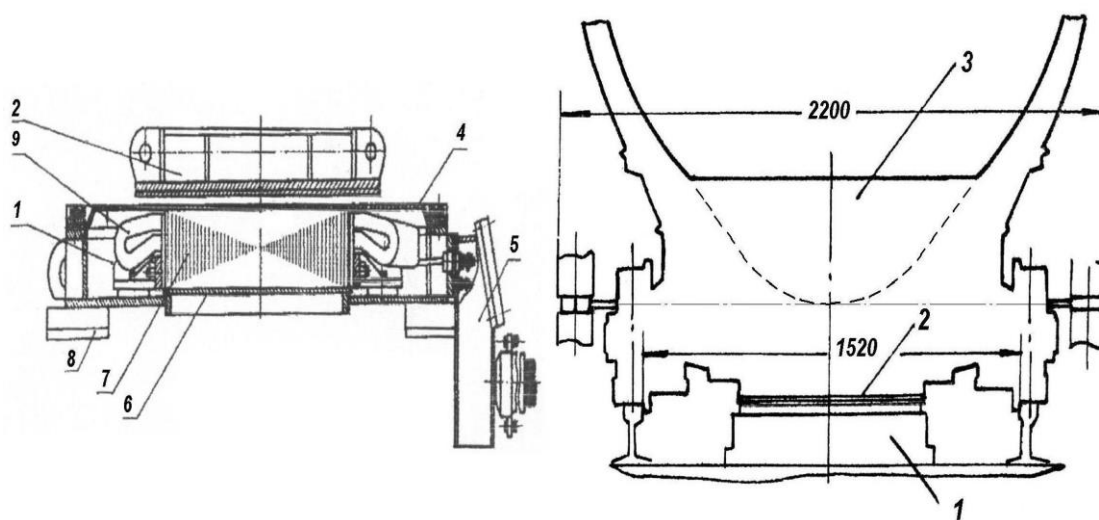
Линейные двигатели для привода конвейерного поезда были разработаны при участии авторов и изготовлены НПО "Взрывозащищенное электрооборудование", г. Донецк [8] для Междуреченского ГОК производственного объединения "Кемеровоуголь". Основные

параметры индуктора трехфазного линейного асинхронного двигателя транспортной системы: длина индуктора 0,792 м, ширина его сердечника 0,5 м, толщина индуктора 0,13 м, глубина паза 0,064 м, ширина паза 0,012 м, ширина зубца 0,01 м, число пазов 36. Вторичный элемент представляет собой биметаллическую полосу шириной 0,7 м. Толщина первого и второго медных слоев составляет (2+1) мм, общая толщина массивных стальных слоев равна 6 мм. Отношение полюсного деления к эквивалентному немагнитному зазору составляет 8,7, что соответствует рекомендациям по выбору главных размеров тяговых ЛАД [1-3, 8]. Установка двигателя на вагоне показана на рис. 1

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Электромагнитный расчет линейного асинхронного двигателя выполнялся с использованием детализированных магнитных схем замещения (ДМСЗ) [1, 5, 7] в пакете MathCAD. Влияние третьей координаты (ограниченной ширины вторичного элемента) в рассматриваемых методиках учитывается с помощью коэффициента Болтона [1], на который умножается электропроводность медного слоя вторичного элемента (ВЭ). Параметры индуктора в методе ДМСЗ рассчитываются с помощью известных выражений, применяемых для электрических машин классического исполнения [4]. Количество слоев в ДМСЗ варьируется, что отражается в ее названии – двухслойная и четырнадцатислойная. Количество участков по продольной координате принимается равным количеству пазов в индукторе – 36, и по 30 в двух краевых зонах. При числе пазов на полюс и фазу  $q = 2$  общее количество участков в слое равно 96. Общее количество контуров и количество уравнений магнитного равновесия равно произведению 96 на количество выделенных слоев. Поскольку слои, в которых находится вторичный элемент, движутся, возникает погрешность при вычислении ЭДС движения (через магнитные потоки по зубцовым делениям) в уравнениях электрического равновесия соответствующих контуров. Погрешность может быть уменьшена либо уточнением формулы вычисления производных по координате [7], либо делением слоев по продольной координате на большее количество участков.

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока" (ACED-2018)



$$\mu t := (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 90 \ 100 \ 101 \ 104 \ 240 \ 540 \ 910 \ 910 \ 1 \ 1)^T$$

$$\mu n := \mu t$$

$$h := 10^{-3} \cdot (6 \ 6 \ 2 \ 1 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 5 \ 5)^T$$



индуктор зазор медь      с т а л ь

$$\gamma_{отн} := (0.0001 \ 0.0001 \ 1 \ 1 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.182 \ 0.0001 \ 0.0001)^T$$

Рис. 1. Общий вид (а) и структура слоев 14-слойной модели (б) ЛАД\*

- 1- индуктор, 2 – вторичный элемент двигателя, 3- вагон-тележка, 4 – крышка-экран, 5 – съемный кабельный ввод, 2- б – днище корпуса индуктора, 7 – сердечник, 8 – лапы опорные, 9 лобовая часть обмотки

#### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматриваемый подход с использованием коэффициента Болтона характерен для так называемых квазитрехмерных моделей ЛАД, например, [1-3, 5]. Он обеспечивает достаточную для инженерных расчетов точность результатов при использовании скромных вычислительных ресурсах. Кроме этого применение метода детализированных схем замещения двигателя позволяет легко интегрировать их в полные структурные модели электро-механических систем, включающих в себя также блоки питания, механическую часть, систему автоматического управления.

Были рассмотрены различные варианты исполнения массивного ВЭ: 3 мм – медный слой и 6 мм – ферромагнитный массив из слоев стали:

- а) сталь 3, пластины 2 мм;
- б) сталь 3, поковка;
- в) сталь 20, поковка;
- г) шихтованная сталь 2211.

Зависимости относительной магнитной проницаемости и напряженности магнитного поля от магнитной индукции взяты из [10].

Зависимость магнитной проницаемости стального слоя от температуры в предлагаемом методе ДСЗ задается выражением [9]

$$f_4(z) = 1 + (f_2(z) - 1) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T_t}{750^\circ C} \right)^2 \right]$$

где функция  $f_2(z) = f_2(B)$  получена на основе кривой намагничивания стали для температуры  $T_t = 20^\circ C$ . В качестве примера на рис. 2 показаны зависимости напряженности магнитного поля и магнитной проницаемости от индукции для стали 20. Пунктирная кривая получена для температуры  $500^\circ C$ .

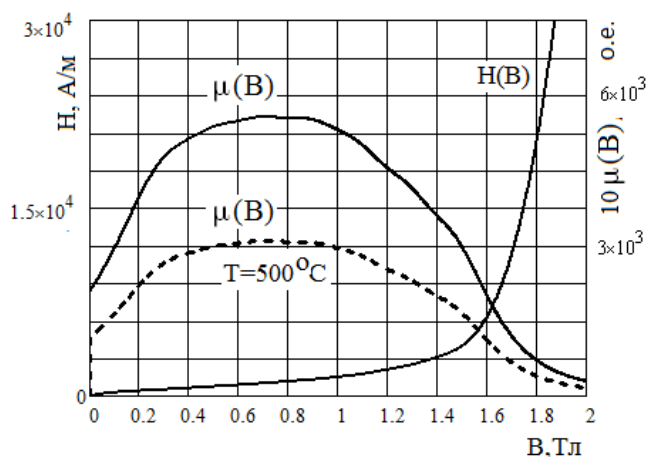


Рис. 2. Зависимости напряженности магнитного поля и магнитной проницаемости от индукции

На рис. 3 приведены кривые распределения вдоль индуктора тангенциальной составляющей индукции

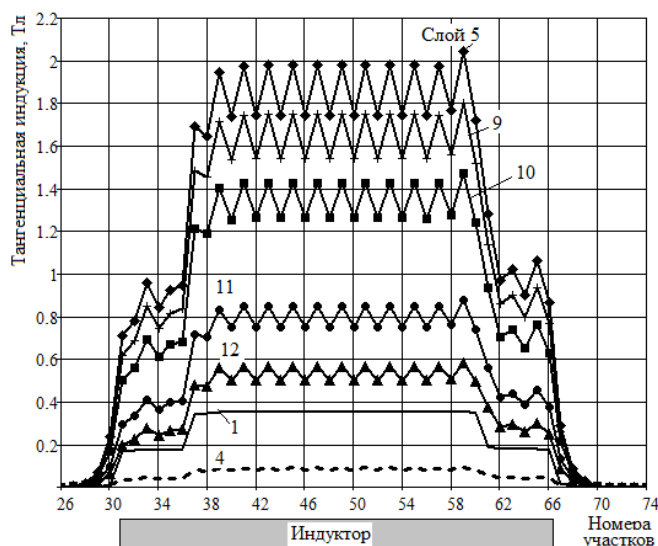


Рис. 3. Распределение тангенциальной составляющей индукции вдоль слоев

Как видно, ферромагнитные слои ВЭ находятся в глубоком насыщении (магнитная индукция в слоях стали достигает величины 2 Тл). В свою очередь это вызвано выбором малой толщины стальной пластины, нагретой до 500 °С.

На рис. 4 приведены зависимости тягового усилия, а также усилий притяжения и левитации от скольжения при  $B_i = 0,48$  м,  $B_{se} = 0,7$  м и постоянном питающем напряжении.

Критическое скольжение, при котором тяговое усилие достигает максимального значения, составляет 0,25. При малых скольжениях нормальное усилие притяжения превосходит усилие левитации, при скольжениях, близких к 1, наблюдается обратная картина.

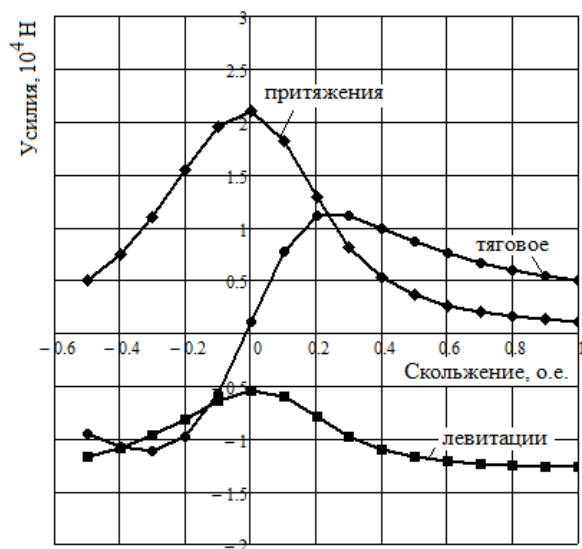


Рис. 4. Зависимости от скольжения тягового усилия, сил притяжения и левитации

В таблице приведена сводка показателей двигателя с различными исполнениями вторичного элемента:

- 1) медь (3 мм) + сталь 3, (пластины 2 мм толщиной, 6 мм всего);
- 2) медь (3 мм) + сталь 3, поковка (6 мм);
- 3) медь (3 мм) + сталь 20, массив (6 мм);
- 4) медь (3 мм) + сталь 2211 шихтованная, для ярма (6 мм);
- 5) 2-хслойная детализированная магнитная схема замещения с шихтованным ярмом вторичного элемента.

Таблица

№ п/п	Плотность тока в обмотке, А/мм <sup>2</sup>	Тяговое усилие, Н	Усилие левитации, Н	Коэффициент мощности, о.е.	Активная мощность, кВт
1	13,2	4664	13860	0,267	101,6
2	13,2	4698	13830	0,268	102
3	13,2	4626	13370	0,266	101,1
4	13,19	5187	6622	0,287	109,1
5	13,19	4743	12190	0,272	101,6

Как видно, варианты 1, 2, 3, 5 дают приблизительно одинаковые результаты. Вариант 4 с шихтованным ферромагнитным слоем ВЭ обеспечивает более высокие энергетические показатели. Однако изготовление шихтованного пакета толщиной 0,7 м и шириной пластины 6 мм трудно выполнить технологически.

При плотности тока в обмотке 13,9 А/мм<sup>2</sup> и скольжении 0,25 расчетное номинальное тяговое усилие составляет 12,25 кН (по данным завода-изготовителя 13 кН), коэффициент мощности 0,35 (0,32 соответственно). Сходимость результатов можно считать удовлетворительной.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно заключить, что метод детализированных магнитных схем замещения дает широкие возможности для анализа динамических и статических характеристик линейных асинхронных двигателей при достаточно высокой точности результатов. При ограниченном уровне детализации активной зоны двигателя он позволяет корректно учесть магнитную и тепловую нелинейности параметров ее ферромагнитных участков. Длительность расчета тяговых и тепловых характеристик двигателя ограничена минутами при использовании созданных авторами программ и ЭВМ массового применения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с.
3. Gieras J.F. Linear Induction Drives: monographs in Electrical and Electronic Engineering. – Oxford: Clarendon Press, 1994. – 271 p.
4. Ostovic V. Dynamics of Saturated Electric Machines. – New York, USA: Springer-Verlag, 1989. – 445 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-8933-0
5. Иванушкин В.А. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов / В.А. Иванушкин, Ф.Н. Сарапулов, П. Шымчак. – Щецин: ЩТУ, 2000. – 310 с.

6. Shiri A. Design optimization and analysis of single-sided linear induction motor, Considering All Phenomena / A. Shiri, A. Shoulaie // IEEE Transactions on energy conversion. – 2012. – vol. 27, no.2. – P. 516-525. DOI: 10.1109/TEC.2012.2190416

7. Choice of a numerical differentiation formula in detailed equivalent circuits models of linear induction motors / V. Dmitrievskii, V. Goman, F. Sarapulov et al. // 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (Capri, Italy 22-24 June 2016). – Capri, 2016. – P. 458-463. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525888

8. Захарченко П.И. Особенности структуры и режимов работы линейного электропривода конвейерного (теле-

жечного) поезда / П.И. Захарченко, С.В. Карась, Ф.Н. Сарапулов. // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ; Под общей ред. академика НАН Украины Г.Г. Пивняка. – Донецк: ООО "Юго-Восток, Лтд", 2007. – С. 331-343.

9. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

10. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов. / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.

DOI: 10.24892/RIJEE/20180106

# Investigation of the Traction Linear Induction Motor for Conveyor Train

Sarapulov F.N., Smolianov I.A., Rodionov I.E.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Ekaterinburg, Russian Federation

[sarapulovfn@yandex.ru](mailto:sarapulovfn@yandex.ru)

**Abstract.** The paper reviews the results of the study of traction linear induction motor (LIM) for conveyor transport in the mining industry. The design of the traction motor is described. The results of calculating the characteristics of the engine using the method of detailed magnetic replacement circuits are given. The influence of the choice of the ferromagnetic material (massive steel 3, steel 20, alloy of steel 2211) of the secondary element (SE) on the characteristics of the engine is studied. The influence of the saturation of the ferromagnetic layer of SE on the traction force of the engine is shown. The normal forces (attraction and levitation) acting on the conveyor train cart are evaluated. The calculated design parameters of the engine are compared with the data obtained at the engine manufacturer.

**Keywords:** linear induction motor; construction; massive secondary element; characteristics; equivalent circuit; traction; performance of the motor.

## REFERENCES

1. Veselovsky O.N., Konyaev A.Yu., Sarapuly F.N. *Lineynye asinkhronnye dvigateli* [Linear induction motors], Moscow, Energoatomizdat, 1991, 256 p. (in Russ.)

2. Yamamura S. *Teoriya lineynykh asinkhronnykh dvigateley* [Theory of Linear Asynchronous Motors], Leningrad, Energoatomizdat, 1983, 180 p. (in Russ.)

3. Gieras J.F. *Linear Induction Drives: monographs in Electrical and Electronic Engineering*, Oxford, Clarendon Press, 1994, 271 p.

4. Ostovic V. *Dynamics of Saturated Electric Machines*, New York, USA, Spring-Verlag, 1989, 445 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-8933-0

5. Ivanushkin V.A., Sarapulov F.N., Shymchak P. *Strukturnoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem i ikh elementov* [Structural modeling of electromechanical systems and their elements], Szczecin, SCHTU, 2000, 310 p. (in Russ.)

6. Shiri A., Shoulaie A. Design optimization and analysis of single-sided linear induction motor, Considering All Phenomena, *IEEE Transactions on energy conversion*, 2012, vol. 27, no.2, pp. 516-525. DOI: 10.1109/TEC.2012.2190416

7. Dmitrievskii V., Goman V., Sarapulov F. et al. Choice of a numerical differentiation formula in detailed equivalent circuits models of linear induction motors, *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)* (Capri, Italy 22-24 June 2016), Capri, 2016, pp. 458-463. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525888

8. Zakharchenko P.I., Karas S.V., Sarapulov F.N. Features of the structure and operating modes of a linear electric drive of a conveyor (trolley) train [Osobennosti struktury i rezhimov raboty lineynogo elektroprivoda konveyernogo (telezhechnogo) poezda], *Vzryvozashchishchennoe elektrooborudovanie: Sb. nauch. tr. UkrNIIVE* [Explosion-proof electrical equipment: Sat. sci. tr. UkrNIIVE], Donetsk, ООО "Yugo-Vostok, Ltd.", 2007, pp. 331-343. (in Russ.)

9. Kuvadin A.B. *Induktsionnyy nagrev ferromagnitnoy stali* [Induction heating of ferromagnetic steel], Moscow, Energoatomizdat, 1988, 200 p. (in Russ.)

10. Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klovov B.K. et al. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: ucheb. posobie dlya vuzov* [Designing electrical machines: training manual for universities], Moscow, Energia, 1980, 496 p. (in Russ.)

## Библиографическое описание статьи

Сарапулов Ф.Н. Исследование тягового линейного асинхронного двигателя конвейерного поезда / Ф.Н. Сарапулов, И.А. Смольянов, И.Е. Родионов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т.5, №1. – С. 34-37. DOI: 10.24892/RIJEE/20180106

## Reference to article

Sarapulov F.N., Smolianov I.A., Rodionov I.E. Investigation of the traction linear induction motor for conveyor train, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2018, vol.5, no.1, pp. 34-37. DOI: 10.24892/RIJEE/20180106