

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-505-516>

УДК 621.313

Оптимизация параметров вторичного элемента односторонних линейных асинхронных электродвигателей с использованием генетического алгоритма

В. А. Прахт¹⁾, В. В. Гоман²⁾, А. С. Парамонов¹⁾

¹⁾Уральский федеральный университет (Екатеринбург, Российская Федерация),

²⁾Нижнетагильский технологический институт Уральского федерального университета
(Нижний Тагил, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Рассмотрено применение генетического алгоритма для проектирования линейных асинхронных электродвигателей, проведено его сравнение с классическими методами. Представлены результаты решения оптимизационной задачи для двух конструкций: лабораторного линейного асинхронного электродвигателя на базе трехфазного индуктора SL-5-100 и тягового одностороннего линейного асинхронного электродвигателя городской транспортной системы. Критерий оптимальности включал максимизацию коэффициентов мощности и полезного действия, а также жесткости механической характеристики при обеспечении пускового тягового усилия не менее заданного значения. Описаны результаты оптимизации таких параметров вторичного элемента, как ширина и толщина проводящей полосы, толщина магнитопровода. Актуальность задачи оптимизации параметров вторичного элемента при неизменных параметрах индуктора обусловлена тем, что один и тот же индуктор может использоваться для построения различных конструкций, при этом вторичный элемент создается под каждое конкретное применение и интегрируется непосредственно в рабочий орган механизма либо является приводимым в движение изделием. Для расчета тяговых и энергетических характеристик линейных асинхронных электродвигателей использовалась электромагнитная модель на основе детализированных схем замещения, учитывающая продольный и поперечный краевые эффекты и обеспечивающая время расчета для одного набора параметров около 1 с. В соответствии с данной моделью электродвигатель сводится к совокупности трех детализированных схем замещения: магнитной цепи, первичной и вторичной электрических цепей. Результатом оптимизации указанных электродвигателей стало повышение коэффициента полезного действия на 1,6 и 1,4 % соответственно, коэффициента мощности – на 0,9 и 0,2 %, увеличение жесткости тяговых характеристик и пускового тягового усилия.

Ключевые слова: оптимизация, линейный асинхронный электродвигатель, проектирование, генетический алгоритм, вторичный элемент, тяговое усилие, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, критерий оптимальности, детализированные электрические и магнитные схемы замещения

Для цитирования: Прахт, В. А. Оптимизация параметров вторичного элемента односторонних линейных асинхронных электродвигателей с использованием генетического алгоритма / В. А. Прахт, В. В. Гоман, А. С. Парамонов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 6. С. 505–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-505-516>

Адрес для переписки

Прахт Владимир Алексеевич
Уральский федеральный университет
ул. Мира, 19,
620002, г. Екатеринбург, Российская Федерация
Тел.: +7 343 375-45-07
va.praht@urfu.ru

Address for correspondence

Prakht Vladimir A.
Ural Federal University
19, Mira str.,
620002, Yekaterinburg, Russian Federation
Tel.: +7 343 375-45-07
va.praht@urfu.ru

Design Optimization of Secondary Element of Single-Sided Linear Induction Motors Using a Genetic Algorithm

V. A. Prakht¹⁾, V. V. Goman²⁾, A. S. Paramonov¹⁾

¹⁾Ural Federal University (Yekaterinburg, Russian Federation),

²⁾Nizhny Tagil Technological Institute of Ural Federal University (Nizhny Tagil, Russian Federation)

Abstract. The article focuses on the use of genetic algorithms for the design of linear induction motors. Comparison of genetic algorithm with classical methods in the context of electrical machines designing has been carried out. The results of solving an optimization problem for two designs are presented, viz. a laboratory linear induction electric motor based on a three-phase SL-5-100 inductor and a traction single-sided linear induction electric motor of an urban transport system. The optimality criterion included maximizing the power factor and efficiency, as well as the rigidity of the mechanical characteristic while ensuring a starting traction force of at least a set value. The results of optimization of such parameters of the secondary element as the width and thickness of the conductive strip as well as the thickness of the magnetic circuit are described. The relevance of the problem of optimizing the parameters of the secondary element with unchanged parameters of the inductor is due to the fact that the same inductor can be used to build various structures, while the secondary element is created for each specific application and integrated directly into the working body of the mechanism or is a driven product. To calculate the traction and energy characteristics of linear induction electric motors, an electromagnetic model based on detailed equivalent circuits was used, taking into account longitudinal and transverse edge effects and providing a calculation time for one set of parameters of about 1 s. In accordance with this model, the electric motor is reduced to a set of three detailed equivalent circuits: a magnetic circuit, primary and secondary electrical circuits. The result of the optimization of these electric motors was an increase in the efficiency by 1.6 and 1.4 %, respectively, an increase in the power factor by 0.9 and 0.2 %, and an increase in the rigidity of traction characteristics and starting traction force.

Keywords: optimization, linear induction motor, design, genetic algorithm, secondary element, tractive effort, efficiency, power factor, optimality criterion, detailed electrical and magnetic equivalent circuits

For citation: Prakht V. A., Goman V. V., Paramonov A. S. (2021) Design Optimization of Secondary Element of Single-Sided Linear Induction Motors Using a Genetic Algorithm. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 505–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-505-516> (in Russian)

Введение

Линейные асинхронные двигатели (ЛАД), широко применяемые в транспортных системах, имеют различные конструкции: односторонние, двусторонние, цилиндрические (трубчатые) и др. От вращающихся асинхронных двигателей ЛАД отличаются характером протекания электромагнитных процессов вследствие наличия продольного и поперечного краевых эффектов. Данные явления хорошо исследованы и описаны в [1–3]. Вопросы изучения характеристик тяговых электродвигателей актуальны в связи с широким развитием электрических транспортных систем [4, 5].

Поскольку методики проектирования вращающихся электродвигателей [6] и ЛАД отличаются, множество работ посвящено изучению влияния отдельных факторов на характеристики ЛАД [5, 7], оптимизации ЛАД

на основе различных моделей [8–11], в частности с использованием генетического алгоритма (ГА) [12–14]. Известно применение аппарата схем замещения для анализа электродвигателей и генераторов, в том числе линейного (возвратно-поступательного) действия [15, 16].

Наряду с методом конечных элементов (МКЭ) для исследования ЛАД и генераторов линейного действия широко распространен подход на основе схем замещения [17–22]. В данной статье для оптимизационного расчета применена модель, в соответствии с которой ЛАД сводится к совокупности трех детализированных схем замещения: магнитной цепи, первичной и вторичной электрических цепей [15, 16]. Электромагнитная модель может быть дополнена тепловой моделью, также основанной на детализированных тепловых схемах замещения [23]. Расчет характеристик ЛАД реализован в среде MATLAB. Одна итерация расчета модели на основе схем замещения занимает около 1 с, в отличие от МКЭ-моделей, расчет по которым длится полминуты или более [24].

Методы и подходы

Задача оптимального проектирования состоит в том, чтобы из множества реально возможных вариантов выбрать один наилучший по заданному критерию. Преимущество конкретного варианта определяется количественной оценкой наиболее важной характеристики (группы характеристик) электрической машины, т. е. критерием оптимальности [25]. Этот критерий должен принимать максимальное (минимальное) возможное значение при заданных ограничениях. Как правило, производятся максимизация КПД, тягового усилия (вращающего момента), выходной мощности и минимизация массы и габаритов, а для ряда видов электродвигателей актуальна также минимизация удерживающего момента и пульсаций момента [24].

При проектировании ЛАД целевые функции оптимизации, как правило, не обладают явной зависимостью от конструктивных размеров и других параметров. Кроме того, некоторые параметры могут иметь спектр дискретных значений. Наиболее распространенными в задачах целочисленного программирования, когда параметры оптимизации варьируются дискретно, являются методы динамического программирования и поиска глобального экстремума. Однако при большом числе параметров оптимизации пространство поиска возрастает настолько, что становится существенной проблема времени вычислений.

Таким образом, основные трудности применения классических методов оптимизации нелинейной функции, которой в общем случае является модель ЛАД [13], связаны с проблемами отыскания глобального экстремума и длительностью времени поиска оптимума при значительном числе параметров оптимизации [25]. Например, метод Нелдера – Мида [26], согласно опыту его применения для проектирования электродвигателей и генерато-

ров с постоянными магнитами [27–29], склонен к «застреванию» в локальных экстремумах и не эффективен при наличии более семи варьируемых параметров. Однако достоинством метода является относительно быстрое получение результата.

В статье исследована возможность применения ГА для оптимизации конструкции ЛАД с использованием модели на основе детализированных схем замещения [15, 16]. Генетический алгоритм – это метод решения задач оптимизации, основанный на естественном отборе, т. е. представляющий собой аналогию биологического процесса эволюции [30]. На каждом шаге ГА осуществляется вероятностный отбор неких индивидуальностей (возможных решений задачи) из текущего родительского поколения и производится последующее дочернее поколение. Через последовательный отбор поколений проходит эволюция продвижения к оптимальному решению [30]. Упрощенная блок-схема ГА [30] показана на рис. 1.

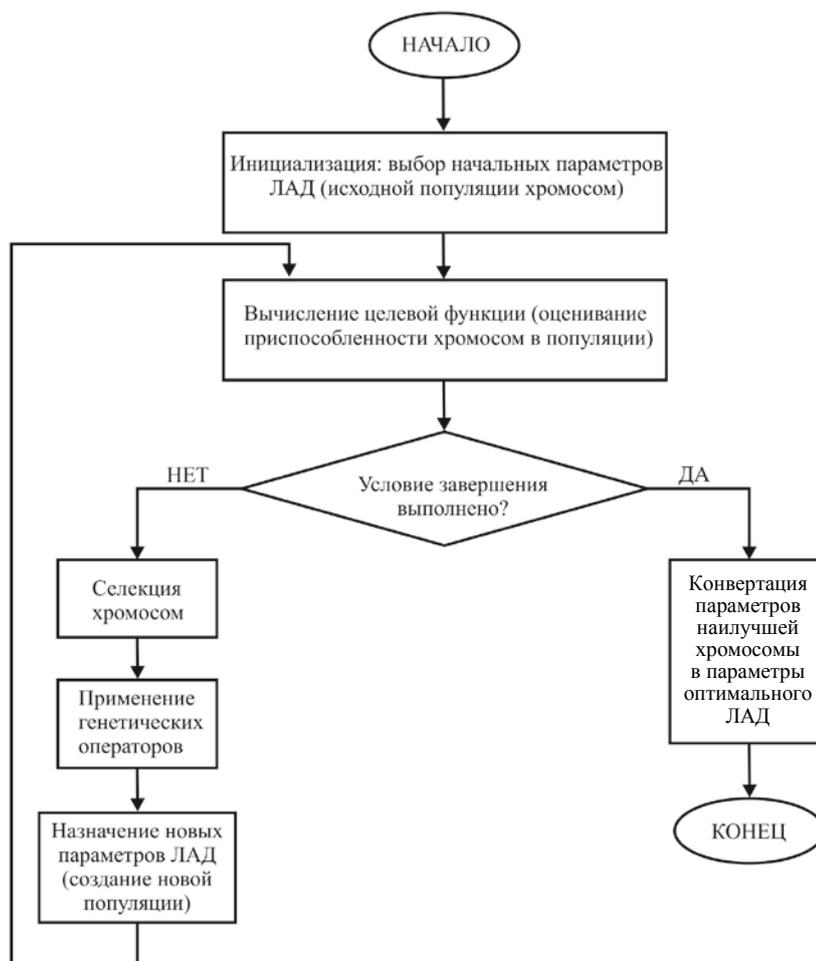


Рис. 1. Упрощенная блок-схема классического генетического алгоритма

Fig. 1. A simplified flowchart of classical genetic algorithm

Критерий оптимальности задавался таким образом, чтобы при пусковом усилии не ниже, чем у ЛАД с исходным набором параметров для номинального режима, производилась максимизация коэффициентов мощности и полезного действия, а также жесткости механической характеристики.

Целевая функция предполагает минимизацию разности между желаемым $F_{\text{ном}}^*$ и исходным $F_{\text{ном}}$ номинальными тяговыми усилиями, что обеспечивает повышение жесткости механической характеристики и минимизацию разности между желаемым F_{start}^* и исходным F_{start} пусковыми тяговыми усилиями, идеальными единичными значениями и исходными коэффициентами мощности $PF_{\text{ном}}$ и КПД $\eta_{\text{ном}}$:

$$F = k_1(F_{\text{ном}}^* - F_{\text{ном}}) + k_2(F_{\text{start}}^* - F_{\text{start}}) + k_3(1 - PF_{\text{ном}}) + k_4(1 - \eta_{\text{ном}}), \quad (1)$$

где $k_{1..4}$ – весовые коэффициенты каждого критерия.

Расчет параметров целевой функции (1) проводили на основе системы уравнений математической модели ЛАД [15, 16]:

$$\begin{cases} U = Z^f I^f + j\omega w K_E \Phi_1; \\ R_{11}\Phi_1 - R_{12}\Phi_2 = w K_{PR} I^f; \\ -R_{12}\Phi_1 + R_{22}\Phi_2 = I^c; \\ Z^c I^c = -V^c \Phi_2; \\ F_T - F_c = M \frac{dv}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где U – вектор линейных напряжений питающей сети; Z^f – матрица комплексных сопротивлений фаз индуктора, $Z^f = R^f + j\omega L^f$; R^f – активное сопротивление фазы индуктора; L^f – индуктивность фазы индуктора, не учтенная в схеме замещения магнитной цепи; j – мнимая единица; ω – угловая частота переменного тока; I^f – вектор фазных токов индуктора; w – число витков в пазу; K_E – матрица приведения пазовых ЭДС индуктора к контурным ЭДС; Φ_1, Φ_2 – векторы магнитных потоков ярм индуктора и вторичного элемента; R_{11}, R_{12}, R_{22} – матрицы магнитных сопротивлений; K_{PR} – матрица приведения фазных токов индуктора к пазовым; I^c – вектор токов приведенной электрической цепи вторичного элемента; Z^c – матрица сопротивлений приведенной электрической цепи вторичного элемента; V^c – то же формирования ЭДС, наводимых в условных контурах вторичного элемента; F_T – тяговое усилие; F_c – сумма сил сопротивления; M – масса подвижной части ЛАД; v – скорость перемещения подвижной части [21, 22].

Результаты и их обсуждение

Объекты исследования – лабораторный ЛАД на базе трехфазного индуктора SL-5-100 (рис. 2а) и тяговый односторонний ЛАД для городской транспортной системы, индуктор которого показан на (рис. 2б). Основные параметры обоих ЛАД приведены в табл. 1.

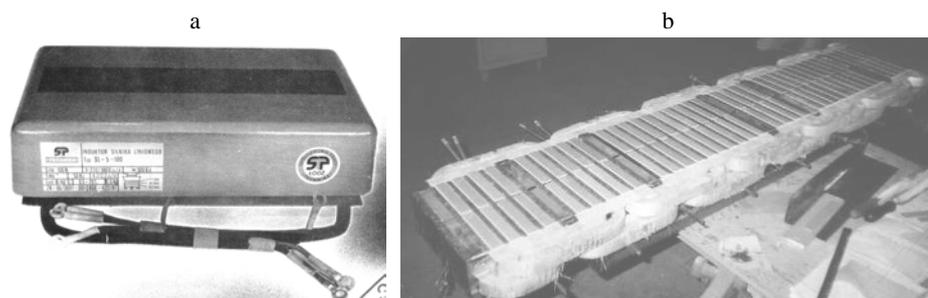


Рис. 2. Индукторы исследуемых линейных асинхронных двигателей:
а – SL-5-100; б – тягового двигателя

Fig. 2. Inductors of the linear induction motors under study:
a – of the SL-5-100; b – of a traction linear induction motor

Особенность линейного асинхронного электродвигателя в том, что он создается для конкретного механизма и хорошо с ним интегрируется, т. е., по сути, является мехатронным модулем. В частном случае вторичным элементом может быть приводимое в движение изделие или непосредственно рабочий орган механизма. По этой причине рассмотрена задача оптимизации параметров вторичного элемента при неизменных параметрах индуктора. В качестве начального приближения использовали параметры вторичного элемента, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры исследуемых линейных асинхронных двигателей
Specification of the linear induction motors under study

| Наименование параметра | Значение для двигателя | |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | лабораторного с индуктором SL-5-100 | тягового для транспортной системы |
| 1 | 2 | 3 |
| Частота питания, Гц | 50 | 23,2 |
| Номинальное фазное напряжение, В | 220 | 240 |
| Номинальный фазный ток, А | 7,1 | 270 |
| Номинальное тяговое усилие, Н | 100 | 2832 |
| Максимальное тяговое усилие, Н | 166 | 5500 |
| Синхронная скорость, м/с | 5 | 10 |
| Число полюсов | 4 | 8 |
| Число пазов | 12 | 50 |

Окончание табл. 1

| 1 | 2 | 3 |
|---|------|------|
| Число витков в пазу | 420 | 14 |
| Ширина магнитопровода индуктора, мм | 50 | 240 |
| Высота магнитопровода индуктора, мм | 80 | 110 |
| Высота ярма магнитопровода индуктора, мм | 35 | 40 |
| Длина магнитопровода индуктора, мм | 200 | 1740 |
| Зубцовое деление, мм | 16,7 | 35 |
| Ширина проводящей полосы вторичного элемента, мм | 50 | 240 |
| Толщина проводящей полосы вторичного элемента, мм | 3 | 6 |
| Ширина магнитопровода вторичного элемента, мм | 50 | 240 |
| Толщина магнитопровода вторичного элемента, мм | 5 | 20,7 |
| Воздушный зазор, мм | 1 | 10 |

Варьируемые параметры вторичного элемента и диапазоны их значений для ЛАД с индуктором SL-5-100 приведены в табл. 2, для тягового ЛАД транспортной системы – в табл. 3.

Таблица 2

**Варьируемые параметры вторичного элемента
для линейного асинхронного двигателя с индуктором SL-5-100**

**Variable parameters of the secondary element
for a linear induction motor with a SL-5-100 inductor**

| Наименование параметра вторичного элемента | Значение, мм | | | Шаг, мм |
|---|--------------|------|-----------------------|---------|
| | min | max | оптимизи- рованное | |
| Ширина проводящей полосы | 35,0 | 65,0 | 54,0 | 1,0 |
| Толщина проводящей полосы | 2,1 | 3,9 | 3,2 | 0,1 |
| Толщина магнитопровода | 3,5 | 6,5 | 5,5 | 0,1 |

Таблица 3

**Варьируемые параметры вторичного элемента
для тягового линейного асинхронного двигателя транспортной системы**

**Variable parameters of the secondary element
for a traction linear induction motor of transportation system**

| Наименование параметра вторичного элемента | Значение, мм | | | Шаг, мм |
|---|--------------|-------|-----------------------|---------|
| | min | max | оптимизи- рованное | |
| Ширина проводящей полосы | 168,0 | 312,0 | 258,0 | 1,0 |
| Толщина проводящей полосы | 4,2 | 7,8 | 6,4 | 0,1 |
| Толщина магнитопровода | 14,5 | 26,9 | 22,8 | 0,1 |

Результаты, полученные в процессе оптимизации для ЛАД с индуктором SL-5-100, представлены на рис. 3, 4а. По сравнению с исходной конструкцией ЛАД коэффициент мощности увеличился на 0,9 %, номинальный КПД – на 1,6 %. Кроме того, удалось получить более жесткую механическую характеристику при большем пусковом усилии и улучшенных энергетических показателях (рис. 4а).

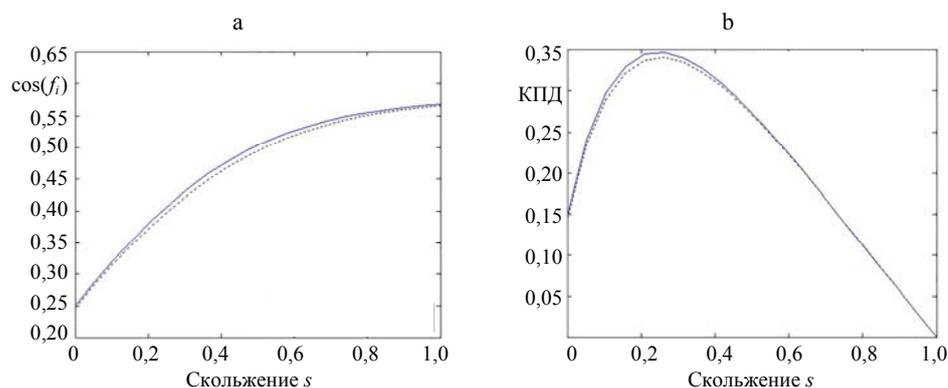


Рис. 3. Зависимость коэффициентов мощности (а) и полезного действия (б) от скольжения для линейного асинхронного двигателя с индуктором SL-5-100:

— спроектированный двигатель; — исходный двигатель

Fig. 3. Dependence of power coefficients (a) and efficiency (b) on sliding for a linear SL-5-100 induction motor

— the designed motor; — the original motor

Результаты оптимизации тягового ЛАД показаны на рис. 4б, 5.

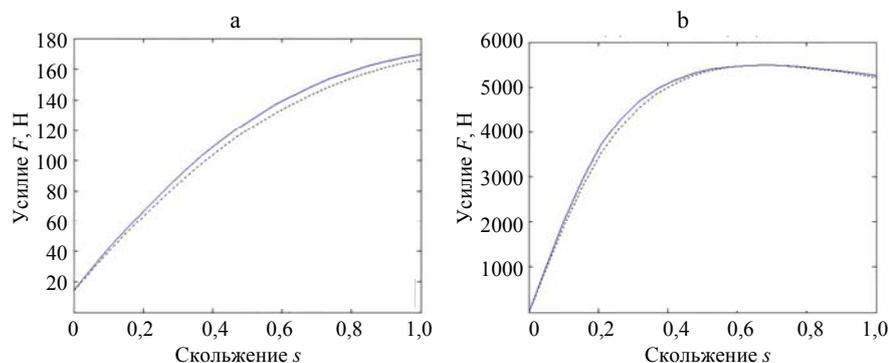


Рис. 4. Механическая характеристика линейного асинхронного двигателя:

а – с индуктором SL-5-100; б – тягового;

— спроектированный двигатель; — исходный двигатель

Fig. 4. Mechanical characteristics of a linear induction motor:

а – with a SL-5-100 inductor; б – of a traction one;

— the designed motor; — the original motor

По сравнению с исходной конструкцией ЛАД номинальный коэффициент мощности увеличился лишь на 0,2 %, номинальный КПД – на 1,4 %. Удалось получить более жесткую механическую характеристику при

приблизительно том же пусковом усилии и тех же улучшенных энергетических показателях (рис. 4b).

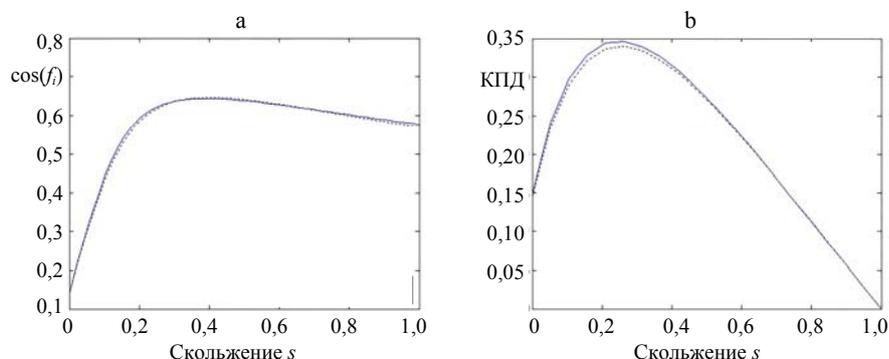


Рис. 5. Зависимость коэффициентов мощности (а) и полезного действия (б) от скольжения для тягового линейного асинхронного двигателя:

— спроектированный двигатель; — исходный двигатель

Fig. 5. Dependence of power factor (a) and efficiency (b) on slip for traction linear induction motor:

— the designed motor; — the original motor

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена оптимизация линейных асинхронных двигателей с помощью генетического алгоритма. Использована электромагнитная модель двигателя на базе детализированных схем замещения. Для двигателя лабораторной установки и тягового двигателя транспортной системы описаны результаты оптимизации параметров вторичного элемента, в результате чего улучшены их энергетические и механические характеристики.

2. Для линейного асинхронного двигателя на базе индуктора SL-5-100 определены значения ширины (54,0 мм) и толщины (3,2 мм) проводящей полосы, толщины магнитопровода (5,5 мм), при которых достигаются максимальные коэффициенты полезного действия и мощности.

3. Для тягового двигателя транспортной системы определены следующие оптимальные значения параметров вторичного элемента: ширина (258,0 мм) и толщина (6,4 мм) проводящей полосы, толщина магнитопровода (22,8 мм).

4. Найденные оптимальные параметры позволяют обеспечить повышение жесткости тяговых характеристик и пускового тягового усилия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский, О. Н. Линейные асинхронные двигатели / О. Н. Веселовский, А. Ю. Коняев, Ф. Н. Сарапулов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 255 с.
2. Yamamura, S. Theory of Linear Induction Motors / S. Yamamura. New York: Halsted, 1979. 180 p.
3. Gieras, J. F. Linear Induction Drives / J. F. Gieras. London: Oxford Univ. Press, 1994. 320 p.
4. Фьюнг Ле, Нго. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромотоцикла / Нго Фьюнг Ле, Г. И. Гульков // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 41–53. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53>.

5. Abdollahi, S. E. Design and Analysis of a Double-Sided Linear Induction Motor for Transportation / S. E. Abdollahi, M. Mirzayee, M. Mirsa // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. Vol. 51, Iss. 7. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2407856>.
6. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: в 2 ч. / И. П. Копылов; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2018. Ч. 1. 490 с.
7. Creppe, R. C. Influence of Design Parameters on Linear Induction Motor End Effect / R. C. Creppe, J. A. C. Ulson, J. F. Rodrigues // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2008. Vol. 23, Iss. 2. P. 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2008.918594>.
8. Laporte, B. An Approach to Optimize Winding Design in Linear Induction Motors / B. Laporte, N. Takorabet, G. Vinsard // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997. Vol. 33, Iss. 2. P. 1844–1847. <https://doi.org/10.1109/20.582640>.
9. Analysis and Optimal Design of the Slit Type Lowspeed Linear Induction Motors / S.-B. Yoon [et al.] // *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*. 1997. P. TB2-8.1–TB2-8.3. <https://doi.org/10.1109/iemdc.1997.604225>.
10. Pourmoosa, A. A. Design Optimization, Prototyping and Performance Evaluation of a Low-Speed Linear Induction Motor with Toroidal Winding / A. A. Pourmoosa, M. Mirsa // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015. Vol. 30, Iss. 4. P. 1546–1555. <https://doi.org/10.1109/tec.2015.2457397>.
11. Zare-Bazghaleh, A. Optimum Design of Single-Sided Linear Induction Motors for Improved Motor Performance / A. Zare-Bazghaleh, M. R. Naghashan, M. R. Meshkatoddini // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010. Vol. 46, Iss. 11. P. 3939–3947. <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2062528>.
12. Shiri, A. Design Optimization and Analysis of Singlesided Linear Induction Motor, Considering All Phenomena / A. Shiri, A. Shoulaie // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27, Iss. 2. P. 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2190416>.
13. Design of HTS Linear Induction Motor Using GA and the Finite Element Method / J. Zhao [et al.] // 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Taichung, 2010. P. 527–531. <https://doi.org/10.1109/iciea.2010.5517100>.
14. Isfahani, H. Design Optimization of a Low-Speed Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Efficiency and Power Factor / H. Isfahani, B. M. Ebrahimi, H. Lesani // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. Vol. 44, Iss. 2. P. 266–272. <https://doi.org/10.1109/tmag.2007.912646>.
15. Choice of a Numerical Differentiation Formula in Detailed Equivalent Circuits Models of Linear Induction Motors / V. Dmitrievskii [et al.] // 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Capri, 22–24 June 2016. Capri, 2016. P. 458–463. <https://doi.org/10.1109/speedam.2016.7525888>.
16. Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения / Ф. Н. Сарапулов [и др.] // *Электротехника*. 2018. № 4. С. 58–63.
17. Equivalent Circuits for Single-Sided Linear Induction Motors / W. Xu [et al.] // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010. Vol. 46, Iss. 6. P. 2410–2423. <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2073434>.
18. Zare-Bazghaleh, A. Derivation of Equivalent Circuit Parameters for Single-Sided Linear Induction Motors / A. Zare-Bazghaleh, M. Naghashan, A. Khodadoost // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015. Vol. 43, Iss. 10. P. 3637–3644. <https://doi.org/10.1109/tps.2015.2474746>.
19. An Improved Equivalent Circuit Model of a Single-Sided Linear Induction Motor / W. Xu [et al.] // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010. Vol. 59, Iss. 5. P. 2277–2289. <https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2043862>.
20. Amiri, E. A Novel Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motors Considering Static and Dynamic End Effects / E. Amiri, E. A. Mendrela // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50, Iss. 3. P. 120–128. <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2285222>.
21. Менжинский, А. Б. Разработка уточненных электромагнитных моделей электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 4. С. 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302>.

22. Woronowicz, K. A Novel Linear Induction Motor Equivalent-Circuit with Optimized End Effect Model / K. Woronowicz, A. Safaei // *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2014. Vol. 37, Iss. 1. P. 34–41. <https://doi.org/10.1109/cjece.2014.2311958>.
 23. Сарапулов, Ф. Н. Развитие математических моделей тепловых процессов в линейных асинхронных двигателях / Ф. Н. Сарапулов, В. В. Гоман // *Электротехника*. 2009. № 8. С. 17–21.
 24. A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines / G. Lei [et al.] // *Energies*. 2017. Vol. 10, Iss. 12. P. 1962. <https://doi.org/10.3390/en10121962>.
 25. Аветисян, Дж. А. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ / Дж. А. Аветисян, В. С. Соколов, В. Х. Хан. М.: Энергия, 1976. 208 с.
 26. Nelder, J. A. A Simplex Method for Function Minimization / J. A. Nelder, R. Mead // *The Computer Journal*. 1965. Vol. 7, Iss. 4. P. 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.
 27. Optimal Design of a High-Speed Single-Phase Flux Reversal Motor for Vacuum Cleaners / V. Dmitrievskii [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, Iss. 12. P. 3334. <https://doi.org/10.3390/en11123334>.
 28. Prakht, V. Optimal Design of Gearless Flux-Switching Generator with Ferrite Permanent Magnets / V. Prakht, V. Dmitrievskii, V. Kazakbaev // *Mathematics*. 2020. Vol. 8, Iss. 2. P. 206. <https://doi.org/10.3390/math8020206>.
 29. Dmitrievskii, V. Design Optimization of a Permanent-Magnet Flux-Switching Generator for Direct-Drive Wind Turbines / V. Dmitrievskii, V. Prakht, V. Kazakbaev // *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 19. P. 3636. <https://doi.org/10.3390/en12193636>.
 30. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. М.: Телеком, 2004. 383 с.
- Поступила 18.12.2020 Подписана в печать 23.02.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Veselovskii O. N., Konyaev A. Yu., Sarapulov F. N. (1991) *Linear Induction Motors*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 255 (in Russian).
2. Yamamura S. (1979) *Theory of Linear Induction Motors*. New York, Halsted Publ. 180.
3. Gieras J. F. (1994) *Linear Induction Drives*. London, Oxford Univ. Press. 320.
4. Ngo Phuong Le, Gul'kov G. I. (2017) Calculation of a Mechanical Characteristic of Electric Traction Motor of Electric Vehicle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 41–53. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-41-53> (in Russian).
5. Abdollahi S. E., Mirzayee M., Mirsa M. (2015) Design and Analysis of a Double-Sided Linear Induction Motor for Transportation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51 (7), 1–7. <https://doi.org/10.1109/tmag.2015.2407856>.
6. Kopylov I. P. (2018) *Design of Electric Machines*. Part 1. 4th ed., Revised and Expanded. Moscow, Yurait Publ. 490 (in Russian).
7. Crepe R. C., Ulson J. A. C., Rodrigues J. F. (2008) Influence of Design Parameters on Linear Induction Motor End Effect. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23 (2), 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2008.918594>.
8. Laporte B., Takorabet N., Vinsard G. (1997) An Approach to Optimize Winding Design in Linear Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 33 (2), 1844–1847. <https://doi.org/10.1109/20.582640>.
9. Yoon S.-B., Jung I.-S., Kim K.-C., Hyun D.-S. (1997) Analysis and Optimal Design of the Slit Type Low-speed Linear Induction Motors. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, TB2-8.1–TB2-8.3. <https://doi.org/10.1109/iemdc.1997.604225>.
10. Pourmoosa A. A., Mirsa M. (2015) Design Optimization, Prototyping and Performance Evaluation of a Low-Speed Linear Induction Motor with Toroidal Winding. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30 (4), 1546–1555. <https://doi.org/10.1109/tec.2015.2457397>.
11. Zare-Bazghaleh A., Naghashan M. R., Meshkatoddini M. R. (2010) Optimum Design of Single-Sided Linear Induction Motors for Improved Motor Performance. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46 (11), 3939–3947. <https://doi.org/10.1109/tmag.2010.2062528>.

12. Shiri A., Shoulaie A. (2012) Design Optimization and Analysis of Singlesided Linear Induction Motor, Considering All Phenomena. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (2), 358–362. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2190416>.
13. Zhao J., Zhang W., Fang J., Yang Z., Zheng T. Q., Liu Y. (2010) Design of HTS Linear Induction Motor Using GA and the Finite Element Method. *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Taichung, 2010. 527–531. <https://doi.org/10.1109/iciea.2010.5517100>.
14. Isfahani H., Ebrahimi B. M., Lesani H. (2008) Design Optimization of a Low-Speed Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Efficiency and Power Factor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44 (2), 266–272. <https://doi.org/10.1109/tmag.2007.912646>.
15. Dmitrievskii V., Goman V., Sarapulov F., Prakht V., Sarapulov S. (2016) 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, 22–24 June 2016, 458–463. <https://doi.org/10.1109/speedam.2016.7525888>.
16. Sarapulov F. N., Frizen V. E., Shvydkiy E. L., Smol'yanov I. A. (2018) Mathematical Modeling of a Linear-Induction Motor Based on Detailed Equivalent Circuits. *Russian Electrical Engineering*, 89 (4), 270–274. <https://doi.org/10.3103/S1068371218040119>.
17. Xu W., Zhu J. G., Zhang Y., Li Z., Li Y., Wang Y. [et al.] (2010) Equivalent Circuits for Single-Sided Linear Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46 (6), 2410–2423. <https://doi.org/10.1109/tia.2010.2073434>.
18. Zare-Bazghaleh A., Naghashan M., Khodadoost A. (2015) Derivation of Equivalent Circuit Parameters for Single-Sided Linear Induction Motors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (10), 3637–3644. <https://doi.org/10.1109/tps.2015.2474746>.
19. Xu W., Zhu J. G., Zhang Y., Li Y., Wang Y., Guo Y. (2010) An Improved Equivalent Circuit Model of a Single-Sided Linear Induction Motor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59 (5), 2277–2289. <https://doi.org/10.1109/tvt.2010.2043862>.
20. Amiri E., Mendrela E. A. (2014) A Novel Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motors Considering Static and Dynamic End Effects. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50 (3), 120–128. <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2285222>.
21. Menzhinski A. B., Malashin A. N., Menzhinski P. B. (2021) Development of Refined Electromagnetic Models of Reciprocating Electric Generators with Permanent Magnets. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (4), 291–302. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-291-302> (in Russian).
22. Woronowicz K., Safaee A. (2014) A Novel Linear Induction Motor Equivalent-Circuit with Optimized End Effect Model. *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 37 (1), 34–41. <https://doi.org/10.1109/cjece.2014.2311958>.
23. Sarapulov F. N., Goman V. V. (2009) Development of Mathematical Models of Thermal Processes in Linear Asynchronous Motors. *Russian Electrical Engineering*, 80 (8), 431–435. <https://doi.org/10.3103/S1068371209080045>.
24. Lei G., Zhu J., Guo Y., Liu C., Ma B. (2017) A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines. *Energies*, 10 (12), 1962. <https://doi.org/10.3390/en10121962>.
25. Avetisyan D. A., Sokolov V. S., Khan V. Kh. (1976) *Computer-Aided Optimal Design of Electrical Machines*. Moscow, Energiya Publ. 208 (in Russian).
26. Nelder J. A., Mead R. (1965) A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7 (4), 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.
27. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Sarapulov S. (2018) Optimal Design of a High-Speed Single-Phase Flux Reversal Motor for Vacuum Cleaners. *Energies*, 11 (12), 3334. <https://doi.org/10.3390/en11123334>.
28. Prakht V., Dmitrievskii V., Kazakbaev V. (2020) Optimal Design of Gearless Flux-Switching Generator with Ferrite Permanent Magnets. *Mathematics*, 8 (2), 206. <https://doi.org/10.3390/math8020206>.
29. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V. (2019) Design Optimization of a Permanent-Magnet Flux-Switching Generator for Direct-Drive Wind Turbines. *Energies*, 12 (19), 3636. <https://doi.org/10.3390/en12193636>.
30. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. (2004) *Neural Networks, Genetic Algorithm and Fuzzy Systems*. Moscow, Telecom Publ. 383 (in Russian).