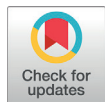


**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGY AND ELECTRICAL EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.344-366>EDN: <https://elibrary.ru/rzbghu>

УДК / UDK 621.313.13/.17:634

*Оригинальная статья / Original article***Оценка влияния количества немагнитных
вставок статора на величину силы тяги якоря
линейного электродвигателя секатора**

Г. В. Никитенко, С. Н. Антонов , **Н. С. Гаркавенко**
*Ставропольский государственный аграрный университет,
г. Ставрополь, Российская Федерация, <https://ror.org/02ne6gz21>
 antonov_serg@mail.ru*

Аннотация

Введение. Садоводство – это одно из передовых направлений сельского хозяйства, которое в последние годы демонстрирует количественный и качественный рост объема производства. Для обеспечения стабильности в долгосрочной перспективе необходима модернизация технических и технологических систем, используемых при детальной обрезке деревьев. В данный момент соотношение ручного и механизированного труда составляет 80 к 20 %. Высокая трудоемкость при работе с ручными или рычажно-приводными секаторами обуславливает неэффективность их использования и низкую производительность оператора. Наиболее актуальным является разработка устройств обрезки с приводом от линейного электродвигателя.

Цель исследования. Определить влияние количества немагнитных вставок статора и их геометрических размеров на силу тяги якоря.

Материалы и методы. Объект исследования – магнитная система линейного электродвигателя. Определялись конструктивные характеристики магнитной системы, влияющие на основной параметр работы линейного электродвигателя – силы тяги якоря. Исследования проводились с использованием законов электромеханики, теоретических основ электротехники, методов компьютерного моделирования.

Результаты исследования. При компьютерном моделировании магнитной системы изменялась длина немагнитной вставки статора от 8 до 18 мм, а также количество вставок от 1 до 5 шт. Получены зависимости изменения силы тяги, диапазон варьирования скорости при перемещении якоря и его взаимосвязь с количеством и длиной немагнитной вставки. При исследовании немагнитной вставки 8 мм максимальная сила тяги якоря 50 Н достигается при перемещении якоря за 3 мс. При этом для немагнитной вставки 18 мм максимальная сила равна 40 Н при перемещении якоря за 12 мс.

Обсуждение и заключение. Уменьшение длины немагнитных вставок статора, а также увеличение их количества приводит к повышению силы тяги якоря, что обеспечивает возрастание быстродействия, и улучшению качества поверхности

© Никитенко Г. В., Антонов С. Н., Гаркавенко Н. С., 2026



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

среза ветки. Представленные результаты рекомендуется использовать при проектировании линейного электропривода для ручного инструмента. Перспектива исследования предполагает изучение влияния формы немагнитных и магнитных вставок на силу тяги якоря.

Ключевые слова: линейный электродвигатель, магнитная система, сила тяги якоря, садоводство, обрезка деревьев, электрифицированный инструмент

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Гаркавенко Н.С. Оценка влияния количества немагнитных вставок статора на величину силы тяги якоря линейного электродвигателя секатора. *Инженерные технологии и системы.* 2026;36(2):344–366. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.344-366>

Assessing the Effect of the Number of Stator Non-Magnetic Spacers on Armature Pulling Force of Pruner Linear Motor

G. V. Nikitenko, S. N. Antonov[✉], N. S. Garkavenko

Stavropol State Agrarian University,

Stavropol, Russian Federation, <https://ror.org/02ne6gz21>

[✉] antonov_serg@mail.ru

Abstract

Introduction. Horticulture is one of the leading areas of agriculture, which has been demonstrating the increase in quantity and quality of products in recent years. To ensure long-term stability, it is necessary to modernize the technical and technological systems used for tree pruning. Currently, the ratio of manual and mechanized labor is 80 to 20%. High labor intensity when using manual or lever-driven pruners causes inefficiency of their use and low productivity of the operator. The most relevant is the development of pruning devices driven by a linear electric motor.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the effect of the number of non-magnetic stator spacers and their geometric dimensions on the armature pulling force.

Materials and Methods. The subject of the study is the magnetic system of a linear electric motor. There have been determined the design characteristics of the magnetic system affecting the main parameter of the linear electric motor operation – armature pulling force. The study was conducted using the laws of electromechanics, the electrical engineering theoretical fundamentals, and computer modeling methods.

Results. During computer modeling of the magnetic system, the length of the non-magnetic stator spacers changed from 8 to 18 mm and the number of spacers changed from 1 to 5 pcs. There have been found the dependences of the change in pulling force, the range of speed variation during armature movement on the length and number and of the non-magnetic spacers. In examining a non-magnetic spacer of 8 mm, it was found that the maximum armature pulling force of 50 N was achieved in 3 ms and for a non-magnetic spacer of 18 mm, the maximum pulling force is 40 N in 12 ms.

Discussion and Conclusion. Decreasing the length of the non-magnetic stator spacers and increasing their number, leads to increases in the armature pulling force resulting in increased operation speed and improved quality of the branch cut surface. It is recommended to use the presented results for designing a linear electric drive for hand tools. Future studies suggest studying the influence of the shape of non-magnetic and magnetic spacers on the armature pulling force.

Keywords: linear electric motor, magnetic system, armature pulling force, horticulture, tree pruning, electric tool

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Nikitenko G.V., Antonov S.N., Garkavenko N.S. Assessing the Effect of the Number of Stator Non-Magnetic Spacers on Armature Pulling Force of Pruner Linear Motor. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):344–366. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.344-366>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перед садоводами России стоят задачи, связанные с внедрением передовых технологий выращивания фруктовых деревьев, повышением урожайности, формированием кроны деревьев и кустарников¹. Самыми трудоемкими процессами в садоводстве считаются: уборка плодов, прополка сорных растений и обрезка деревьев. Для выполнения этих работ необходима большая численность персонала. Нехватка специалистов приводит к снижению эффективности производства в сфере выращивания фруктов, росту цен на продукцию садоводства. Дефицит кадров обуславливает интенсивное внедрение прогрессивных технологий выращивания фруктов и повышение конкурентоспособности отечественной продукции.

Для повышения производительности труда работников садов разработано и выпускается несколько видов технологического оборудования. Например, для обрезки крон плодовых деревьев и избавления их от сухих веток и сучьев, а также ограничения роста растений, используются различные секаторы². Наиболее применяемыми инструментами являются: садовые ножницы, секатор, сучкорез, секатор с храповым механизмом, ножницы для фигурной стрижки растений, секатор прививочный и др. Все перечисленные механические секаторы имеют ручной или рычажный привод, что снижает эффективность их использования и приводит к низкой производительности работника.

На замену ручных секаторов приходят инструменты с различными видами приводов. Наиболее широкое распространение получил электрический привод с применением вращательных электромашин, однако он имеет ряд недостатков: высокая цена, наличие передаточного механизма, низкая скорость срабатывания режущего инструмента, что ухудшает качества среза.

По мнению некоторых исследователей, перспективным приводом для ручных инструментов, используемых в садоводческом хозяйстве, считается линейный электропривод. Его использование позволяет быстрее и точнее

¹ Развитие садоводства и питомниководства: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://фнтп.пф/subprogramms/gardening> (дата обращения: 21.06.2025).

² Тавасиев Р.М. Средства малой механизации для плодовых насаждений крестьянских (фермерских) хозяйств: дисс. ... д-ра техн. наук. Владикавказ; 2009. 277 с.; Тавасиев Р.М., Каргаев М.Л., Икаев Д.А. Разработка штангового секатора ветвей и кустарников с электроприводом. В: Перспективы развития АПК в современных условиях: Материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. Владикавказ: Горский гос. аграрный ун-т; 2019. С. 138–142. <https://elibrary.ru/znstci>; Темиржанов И.О. Разработка и обоснование основных параметров веткорезного агрегата для детальной обрезки плодовых деревьев: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Нальчик; 2000. 24 с.

выполнить обрезку кроны фруктовых деревьев с меньшими затратами физического труда³.

Подбор линейного электродвигателя (ЛЭД) к режущему устройству начинается с разработки его конструкции, в частности, рационализации магнитной системы статора и якоря [1–3]. От конструкции магнитной системы ЛЭД зависит сила тяги, длина хода режущего инструмента и быстродействие срабатывания⁴ [4]. Якорь ЛЭД, соединенный с лезвием секатора, необходим для линейного перемещения и осуществления процесса резания веток. Линейные электродвигатели преобразуют потребляемую энергию от источника питания в возвратно-поступательное движение якоря без использования передаточных элементов, поэтому их характеристики должны соответствовать параметрам режущего инструмента. Рационализация магнитной системы статора и якоря электродвигателя дает возможность повысить эффективность его работы, увеличить усилие на вторичном элементе и магнитный КПД.

Целью исследования является оценка влияния количества немагнитных вставок и их размеров в магнитопроводе статора линейного электродвигателя на силу тяги якоря. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу по рационализации конструкции магнитной системы: длина немагнитной вставки статора, количество немагнитных вставок статора.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для обрезки деревьев в садоводческих хозяйствах используют инструменты с пневматическим, гидравлическим и электрическим приводами. Ручной инструмент состоит из привода, передаточного устройства, рабочего органа и системы управления. Основным элементом конструкций секаторов является приводное устройство. От вида привода зависит производительность работы секатора, длительность выполняемых технологических операций по обрезке и надежность устройства в процессе его эксплуатации.

В начале развития ручного инструмента для фруктовых садов выпускались секаторы, пилы и ножницы с пневмоприводом. Эти устройства не нашли широкого применения в садоводческих хозяйствах потому, что разработчики не смогли создать легкий, компактный, надежный и дешевый инструмент. Предлагаемые производителями пневмоинструменты, например, для обрезки деревьев до сих пор имеют низкий коэффициент полезного действия – 7–16 % [5].

Пневматический инструмент требует наличия компрессорной установки, воздухопроводной сети или съемных баков со сжатым воздухом, у него ограничена маневренность, и его корпус сильно охлаждается от сжатого воздуха, поэтому работнику необходима защита – перчатки. Из-за множества подвижных

³ Антонов С.Н. Возможности использования линейных электродвигателей в ручных электрифицированных инструментах для промышленного садоводства. В: Состояние и инновации технического сервиса конструкций, машин и оборудования: Материалы XVI междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-ти -летию Инженерного института. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос»; 2024. С. 340–343. <https://elibrary.ru/ivpunu>

⁴ Каргин В.А. Повышение эффективности технических средств для процессов и технологий АПК использованием машин с линейным электромагнитным приводом: дисс. ... д-ра техн. наук. Саратов; 2020. 375 с.

элементов конструкции поршневые компрессоры создают большой шум, появляется отдача, вибрация инструмента и утечка воздуха, что негативно сказывается на качестве обрезки деревьев и состоянии здоровья обрезчика [5].

Инструменты с использованием гидравлического привода имеют силовую установку, которая состоит из гидроцилиндра, гидромагистралей и гидрокомпенсаторов. Перечисленный набор элементов гидропривода существенно снижает надежность при эксплуатации инструментов, усложняет конструкцию устройств для обрезки деревьев. Также они обладают низким КПД – 50–75 %. Кроме того, наличие гидролиний, подающих поток гидравлической жидкости к инструменту, ухудшает ремонтпригодность в полевых условиях и понижает эффективность действий обрезчика из-за ограничения радиуса работы [5].

В настоящее время наиболее перспективным для ручного электрифицированного инструмента считается электрический привод, обладающий высоким КПД и надежностью. Электрифицированные инструменты имеют ряд преимуществ перед ручными орудиями и агрегатами, работающими от пневмо- и гидроприводов. Они позволяют выполнять обрезку быстрее и точнее, с меньшим физическим усилием и затратами времени. Электрические приводы для ручного инструмента имеют доказанную эффективность, но при этом у них есть ряд недостатков [6–8].

Еще недавно широкому использованию электроприводов в ручных инструментах препятствовало отсутствие эффективных источников питания – аккумуляторных батарей. В качестве источников энергии применялись свинцовые аккумуляторы, которые имели большие габариты, вес и сложности в обслуживании. Появление никель-кадмиевых и литий-ионных батарей позволили вывести проектирование ручного электрифицированного инструмента для обрезки деревьев в садах на новый уровень развития, что позволило создавать инструменты, адаптированные для разных задач⁵.

Некоторые научные подходы, которые применялись на начальных этапах проектирования ручного электрифицированного инструмента, привели к тому, что российскими учеными предпринимались эксперименты по созданию устройств обрезки и источников энергии с использованием мобильной техники.

Были предприняты попытки по созданию измельчителя стволов деревьев, веткорезного агрегата и садовой механизированной пилы с питанием от генератора, приводимого в движение от вала отбора мощности трактора⁶. Электрообеспечение ручного инструмента осуществлялось от источников переменного тока напряжением 220 В и частотой питающего тока 50–200 Гц⁷. Предложенная система электрообеспечения ручного инструмента была малоэффективной, так как существенно удорожала конструкцию и ухудшала массогабаритные

⁵ Оськина А.С. Параметры и режимы асинхронных генераторов для питания электрифицированных инструментов, электротехнологических установок в садах и виноградниках: дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар; 2007. 138 с.

⁶ Тавасиев Р.М. Средства малой механизации для плодовых насаждений крестьянских (фермерских) хозяйств; Темиржанов И.О. Разработка и обоснование основных параметров веткорезного агрегата для детальной обрезки плодовых деревьев.

⁷ Оськина А.С. Параметры и режимы асинхронных генераторов для питания электрифицированных инструментов, электротехнологических установок в садах и виноградниках.

показатели передвижных электростанций из-за громоздких электродвигателей, систем управления и коммутации, а также требовала наличия дополнительных устройств для преобразования частоты.

В последнее время при разработке ручного электрифицированного инструмента наметилась тенденция по использованию машин постоянного тока в качестве элементов приводящих устройств, что дает определенные преимущества перед другими видами приводов. Однако их использование предполагает наличие механического преобразователя, который превращает вращательное движение в возвратно-поступательное⁸ [9]. В результате снижается надежность и суммарный КПД инструмента, ухудшаются массогабаритные показатели.

Ручному инструменту с машинами постоянного тока присуща высокая вибрация, большой вес и нагрев поверхностей, что накладывает определенные требования к режиму эксплуатации и времени работы оператора для снижения вредного воздействия на организм человека. Использование такого инструмента может вызвать профессиональные заболевания – вибрационную болезнь, сосудистые нарушения и разрушение скелетно-мышечной системы.

Для облегчения труда работников садоводческих хозяйств, повышения их производительности и сохранения здоровья возникла необходимость в разработке принципиально нового электрического привода для ручного инструмента, который частично позволит устранить недостатки вращательного электропривода за счет применения современных магнитных материалов, 3D-печати для изготовления элементов конструкции электрических двигателей, усовершенствованных систем управления, форсированных источников питания и отказа от передаточных устройств.

В настоящее время разработаны ручные электрифицированные инструменты: секатор, пила и стряхиватель плодов и ягод для садоводческих хозяйств на основе импульсного линейного электропривода [10–12]. Широкому производству и внедрению рассмотренных устройств препятствует отсутствие глубоких научных исследований использования новейших магнитных материалов и применения для моделирования современных компьютерных программ [13].

Для правильного выбора линейного электропривода к ручному инструменту необходимо знать усилие, требуемое для среза ветки. Это усилие зависит от физико-механических свойств и диаметра срезаемых веток, а также сорта плодового дерева. Учитывая это, необходимо обосновать характеристики ЛЭД. Например, величину активного сопротивления намагничивающей катушки, количество витков обмоточного провода, взаимозависимость силы тяги якоря в функции размеров магнитных и немагнитных элементов конструкции статора и якоря, значение силы тяги в момент трогания вторичного элемента, изменение скорости якоря в зависимости от вида источника питания и др.⁹ [14–16].

Быстрое получение необходимых результатов при расчетах возможно в результате применения современного компьютерного оборудования и программного

⁸ Антонов С.Н. Возможности использования линейных электродвигателей в ручных электрифицированных инструментах для промышленного садоводства.

⁹ Усанов К.М. Совершенствование технических средств и технологий АПК системами с электромагнитными импульсными машинами: дисс. ... д-ра техн. наук. Саратов; 2008. 433 с.

обеспечения [17]. Поэтому использование компьютерного моделирования для исследования технических характеристик линейных электродвигателей является актуальной задачей по нескольким причинам [18–20].

Автоматизированное проектирование позволяет прогнозировать и получать требуемые характеристики двигателей в различных режимах работы, например, в зависимости от вида применяемого материала и размеров магнитопровода электродвигателя, плотности тока в намагничивающей катушке, количества витков обмотки, площади и коэффициента заполнения обмоточного окна, вида намотки провода и др. Машинное проектирование дает возможность сократить время расчетов и визуально воспроизводить с высокой точностью сложные статические и динамические процессы, протекающие в линейных электродвигателях в виде двумерных графических зависимостей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рабочие характеристики импульсного линейного двигателя влияет множество различных параметров [21; 22]. В случае цилиндрического электродвигателя это – геометрические размеры элементов конструкции [23], обмоточные данные, расположение деталей и материалы, из которых они изготовлены, разновидности источников питания¹⁰ [24–26]. Для оценки влияния указанных параметров на технические характеристики линейного электропривода разрабатывается математическая модель, которая описывает исследуемые физические процессы с определенными допущениями. Анализ одного или нескольких режимов работы при неизменных размерах всех элементов конструкции и обмоточных данных выполняется с целью определения технической возможности совместного использования с нагрузочной машиной или инструментом.

Объект исследования

Рассмотрены параметры линейных электродвигателей: активное сопротивление намагничивающей катушки, элементы конструкционного характера. Размеры деталей и тип материалов, из которых изготовлены статор и якорь, влияние на силовые характеристики привода и его быстродействие.

Методы, оборудование и процедура исследования

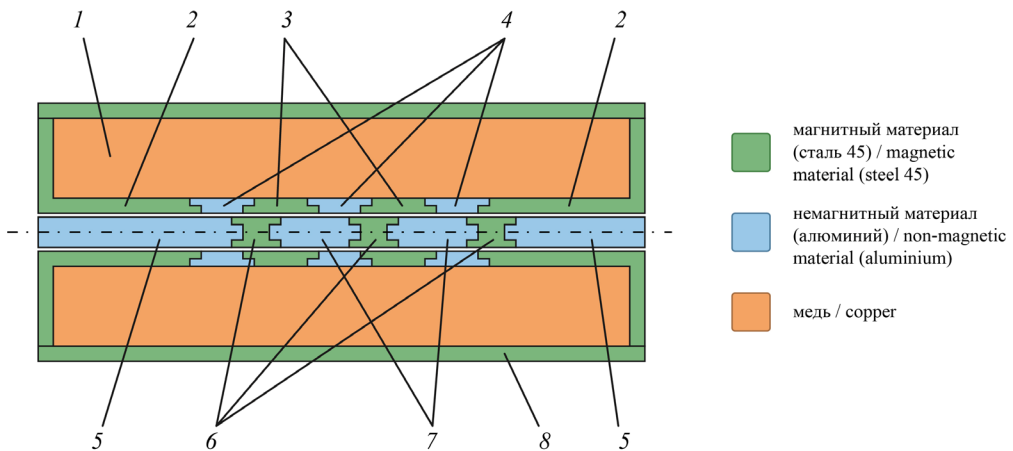
Математическое и компьютерное моделирование начинали с чертежного изображения устройства с точным соотношением его размеров. На рисунке 1 показан фронтальный разрез линейного электродвигателя с выделенными разным цветом зонами, которые соответствуют разным магнитным свойствам материалов.

Корпус линейного электродвигателя 8 представляет собой тонкостенный стальной цилиндр из магнитного материала. Он защищает намагничивающую катушку 1 от внешних механических воздействий и обеспечивает замыкание магнитного потока с торцевых частей статора. Намагничивающая катушка 1 в виде многослойной винтоспиральной обмотки из медного изолированного провода предназначена для протекания тока и создания магнитного поля. Торцевые части

¹⁰ Кочетков В.П., Беспалов В.Я., Глушкин Е.Я., Котеленец Н.Ф., Подборский Э.Н. Основы электромеханики: учеб. пособие. Саратов: Ай Пи Эр Медиа; 2018. 639 с. <https://elibrary.ru/ymksnv>; Атанов И.В. Линейный управляющий электродвигатель для привода стригальной машинки: дисс. ... канд. техн. наук. Ставрополь; 2000. 206 с.

статора 2 необходимы для прохождения магнитного потока. В целях снижения магнитного сопротивления они изготовлены из ферромагнитного материала. В качестве элементов магнитопровода статора выступают: магнитные втулки статора 3 для прохождения магнитного потока; немагнитные вставки статора 4 для создания искусственного разрыва в магнитопроводе статора. Торцевые части якоря 5 – элементы магнитопровода якоря, которые улучшают замыкание магнитного потока непосредственно на магнитные вставки якоря. Для прохождения магнитного потока, пересекающего воздушный рабочий зазор между статором и якорем, из ферромагнитного материала изготовлены магнитные кольца якоря 6. Кроме этого, для разделения магнитных колец якоря используются немагнитные вставки 7.

Принцип работы двигателя заключается в том, что в магнитопроводе статора создаются разрывы, в которые вставляются цилиндрические немагнитные элементы с большим магнитным сопротивлением, тем самым заставляя магнитный поток статора переходить через рабочий воздушный зазор к магнитопроводу якоря, создавая тяговое усилие. Магнитные кольца якоря 6 расположены со смещением относительно немагнитных вставок статора 4. При подаче напряжения на намагничивающую катушку 1, магнитные кольца якоря 6 шунтируют немагнитные вставки статора 4. При этом создается псевдозамкнутый магнитопровод линейного двигателя.



Р и с. 1. Фронтальный разрез линейного электродвигателя:

1 – намагничивающая катушка; 2 – торцевые части статора; 3 – магнитные втулки статора;
4 – немагнитные вставки статора; 5 – торцевые части якоря; 6 – магнитные кольца якоря;
7 – немагнитные вставки якоря; 8 – корпус

F i g. 1. Front section of linear electrical motor:

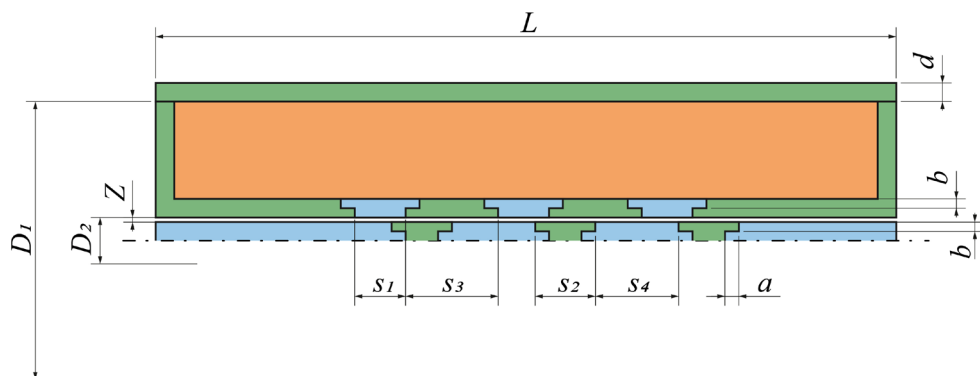
1 – magnetizing coil; 2 – end parts of a stator; 3 – magnetic spacers of a stator;
4 – non-magnetic spacers of stator; 5 – armature end parts; 6 – armature magnetic rings;
7 – non-magnetic spacers of a mover; 8 – case

Источник: рисунки 1, 2, 4, 5, 9 составлены авторами статьи.

Source: figures 1, 2, 4, 5, 9 were made by the authors of the article.

Конструкцию линейного электродвигателя (рис. 2) смоделировали с учетом потенциальной возможности установки в ручной электрифицированный инструмент, поэтому размеры и вес были минимальными, а усилие и ход якоря максимальными.

В связи с этим, общая длина L была принята 160 мм, а внешний диаметр без корпуса $D_1 = 60$ мм. Толщина корпуса и металла статора $d = 4$ мм. На резьбовые части заложено $a = 3$ мм, а в толщину они составляли половину толщины металла $b = d/2 = 2$ мм. Длины немагнитной вставки статора (НС) и магнитного кольца якоря (МЯ) связаны соотношением $S_2 = S_1 + p$, где S_1 – длина НС, S_2 – длина МЯ, p – величина, заложенная на перекрытие магнитного кольца якоря немагнитной вставкой статора в целях избегания дребезга и равная 3 мм. Длины магнитной втулки статора (МС) и немагнитной вставки якоря (НЯ) связаны соотношением $S_4 = S_3 - p$, где S_3 – длина МС, S_4 – длина НЯ. Непосредственную длину НС и МС определяли во время эксперимента. Внутренний диаметр статора $D_2 = 10$ мм, а величина воздушного зазора $Z = 0,3$ мм.



Р и с. 2. Размеры деталей, элементов и частей исследуемого линейного электродвигателя

F i g. 2. Dimensions of details, elements and parts of linear electrical motor

В качестве материалов, из которых изготовлен электродвигатель, были использованы:

- сталь 45 для элементов магнитопровода статора и якоря (корпус, торцевые части статора, втулки и кольца);
- алюминий для деталей, которые должны создавать большое магнитное сопротивление (немагнитные вставки статора и якоря, торцевые части якоря);
- медный изолированный провод для намагничивавшей катушки.

Для питания намагничивающей катушки линейного электродвигателя выбрали источник постоянного тока с выходным напряжением 20 В. Согласно технологическому процессу, электродвигатель работал в повторно-кратковременном режиме. Температура всех частей конструкции под нагрузкой не достигала установившегося значения для выбранного класса изоляции обмотки. Выбранный режим работы позволил увеличить плотность тока до 8 А/мм², что существенно

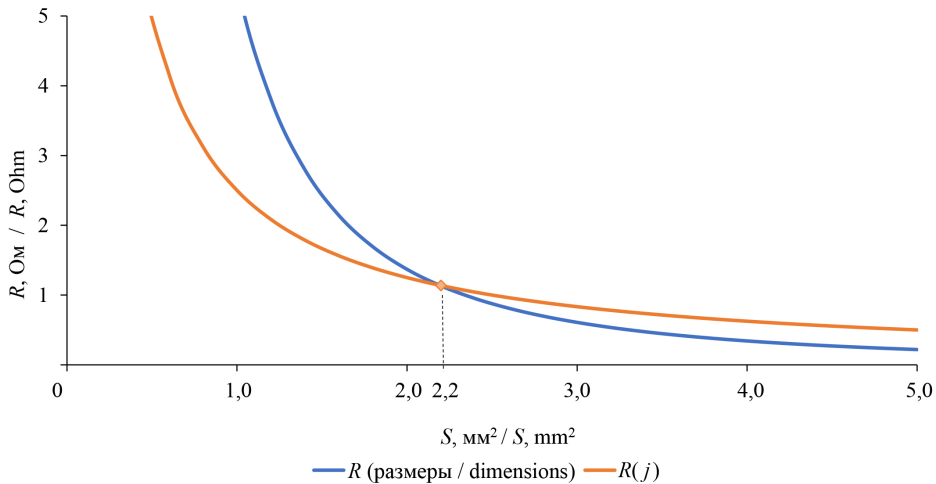
повысило удельные характеристики линейного двигателя – отношение мощности к единице объема.

Математическое моделирование электродвигателя начинали с расчета активного сопротивления намагничивающей катушки с учетом изменяющихся геометрических размеров элементов конструкции, напряжения источника питания, сечения обмоточного провода и плотности тока. Расчет осуществляли по двум уравнениям.

$$\begin{cases} R = \frac{\rho \epsilon \pi A (D_1^2 - D_4^2)}{4S^2} \\ R = \frac{U}{Sj} \end{cases}, \quad (1)$$

где R – активное сопротивление намагничивающей катушки, Ом; ρ – удельное сопротивление медного провода, Ом·мм; ϵ – коэффициент заполнения паза; A – длина паза, вычисляемая по формуле $A = L - 2d$, мм; D_1 – внешний диаметр двигателя без корпуса, мм; D_4 – диаметр дна паза, вычисляется по формуле $D_4 = D_2 + 2d$, мм; S – площадь поперечного сечения провода, мм²; U – напряжение, В; j – плотность тока, А/мм².

По результатам расчета были построены графические зависимости, представленные на рисунке 3.



Р и с. 3. Изменение активного сопротивления намагничивающей катушки в функции поперечного сечения провода обмотки

F i g. 3. Change in the active resistance of the magnetizing coil as a function of the cross-section of the winding wire

Источник: график построен авторами статьи при выборе сечения и сопротивления обмоточного провода по формуле (1).

Source: the graph was constructed by the authors of the article when selecting the cross-section and resistance of the winding wire according to formula (1).

По результатам расчета установлено, что значениями, удовлетворяющими обоим уравнениям, являются координаты точки пересечения графиков (рис. 3). Как видно результат по оси абсцисс, который соответствует поперечному сечению провода, составляет 2,19, значение по оси ординат, которое соответствует активному сопротивлению катушки – 1,14. В таком случае $R = 1,14 \text{ Ом}$, $S = 2,19 \text{ мм}^2$.

Очевидно, что намагничивающая катушка, намотанная круглым проводом, не может полностью заполнить паз, в который она укладывается. Поэтому при расчетах учитывали коэффициент заполнения паза ϵ , который может принимать значение в диапазоне от 0 до 1. Было выбрано значение 0,8.

Так как катушка заполняла не всю площадь окна паза, общую площадь поперечного сечения меди в окне паза с достаточной точностью определили по формуле (2):

$$S_M = \epsilon P, \quad (2)$$

где S_M – общая площадь поперечного сечения меди в окне паза, мм^2 ; P – площадь окна паза, мм^2 .

Применительно к данной конструкции, обозначая стороны окна паза за A и B , получили формулу (3):

$$S_M = \epsilon AB, \quad (3)$$

где A – длина паза, мм ; B – ширина паза, мм .

Поскольку катушка намотана круглым проводом одного диаметра, то справедливо сказать, что:

$$S_M = nS,$$

где n – количество витков в катушке.

В таком случае:

$$n = \frac{S_M}{S}.$$

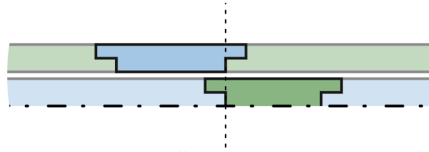
Подставляя ранее указанное уравнение общей площади меди (3) и принимая коэффициент заполнения $\epsilon = 0,8$, получили:

$$n = \frac{\epsilon AB}{S} = \frac{0,8 \cdot 152 \cdot 21}{2,19} = 1\,166,02.$$

Принятое для расчетов количество витков катушки – 1 166.

С целью определения степени влияния размеров немагнитных вставок статора на суммарную проводимость магнитопровода линейного электродвигателя и его рабочие характеристики, например, развиваемое тяговое усилие якоря, необходимо выполнить компьютерное моделирование в соответствии с расположением немагнитной вставки статора по отношению к ферромагнитному кольцу якоря (рис. 4).

Для простоты расчета и анализа результатов была использована конструкция электродвигателя с одной НС и одним МЯ. Длина НС принималась в диапазоне от 8 до 18 мм с шагом в 1 мм, с 8 по 12 мм и шагом в 2 мм, с 12 по 18 мм. Длина МЯ для всех случаев вычислялась по формуле $S_2 = S_1 + p$.



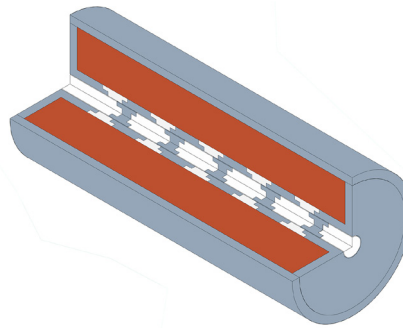
Р и с. 4. Расположение немагнитной вставки статора и магнитного кольца якоря относительно друг друга

F i g. 4. The location of the non-magnetic spacers and magnetic ring of the armature relative to each other

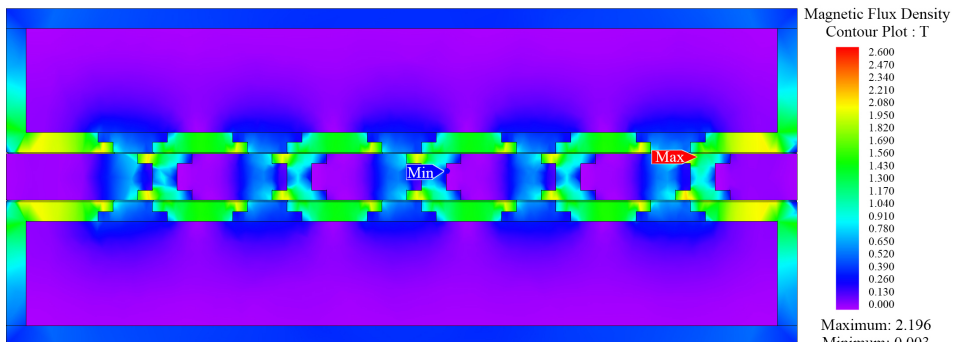
Немагнитная вставка статора расположена между ферромагнитными втулками магнитопровода статора ровно в середине. Магнитное кольцо якоря установлено со смещением относительно немагнитной вставки статора таким образом, что внутренние торцевые части элементов находятся в одной плоскости (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате выполнения компьютерного моделирования ЛЭД разработаны 3D-модели (рис. 5 а) и произведен расчет магнитных полей (рис. 5 б).



а)



б)

Р и с. 5. Компьютерное моделирование магнитной системы линейного электродвигателя:
а) 3D-модель ЛЭД; б) картина распределения магнитной индукции в элементах ЛЭД

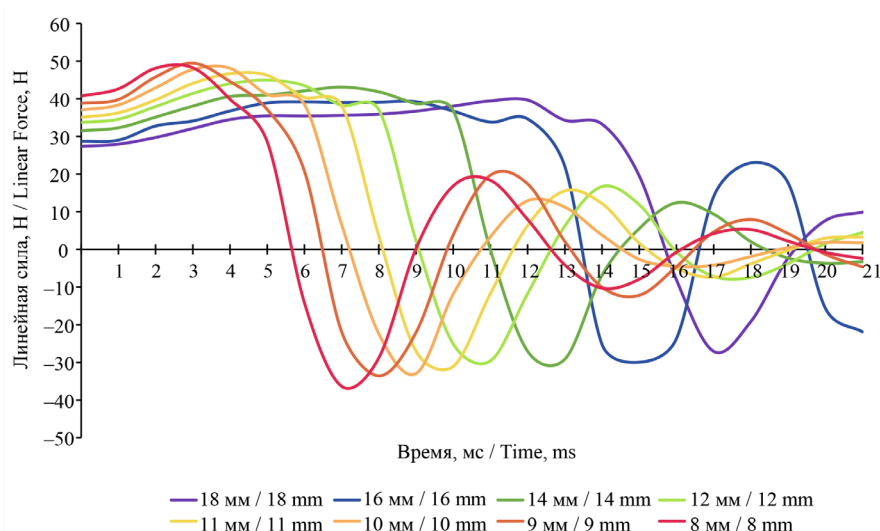
F i g. 5. Computer smodelingof the magnetic system of a linear electric motor:
а) 3D-model of linear electric motor; б) visual representation of the distribution of magnetic flux density in elements of linear electric motor

Из рисунка 5 видно, что линейный электродвигатель имеет немагнитные и магнитные вставки на статоре и в якоре (рис. 5 а), сочетание которых способствует их магнитному насыщению (рис. 5 б), необходимому для появления силы тяги якоря.

Результаты автоматизированного расчета приведены в виде графиков, связывающих между собой силу тяги, развиваемую электродвигателем, и время движения якоря (рис. 6) в зависимости от длины немагнитной вставки статора.

Для каждого момента времени от 0 до 21 мс с интервалом в 1 мс была рассчитана векторная сумма силы тяги, действующая на якорь.

Поскольку эта сила является векторной величиной, то по оси ординат отложены как положительные, так и отрицательные значения, где положительные указывают на перемещение в сторону начального перемещения, а отрицательные – в противоположную.



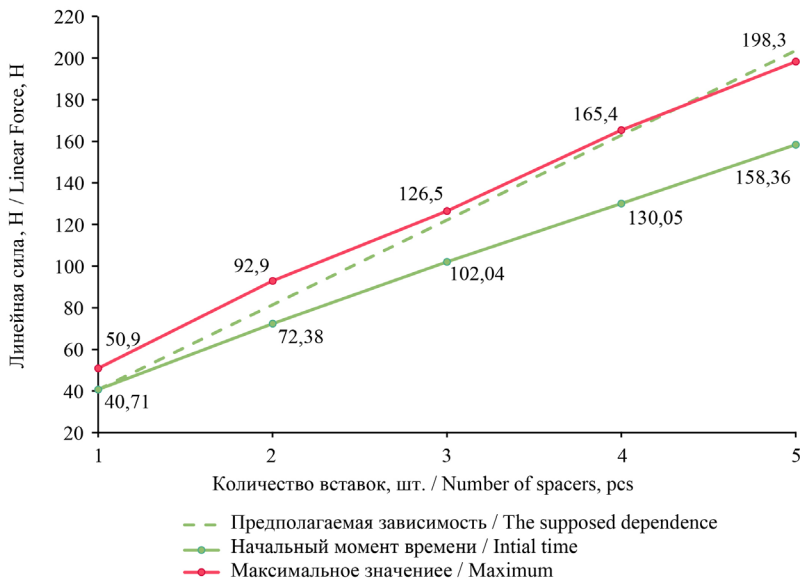
Р и с. 6. Изменение силы тяги во времени в зависимости от длины немагнитной вставки статора
F i g. 6. Change in pulling force over time depending on the length of the non-magnetic stator spacer

Источник: графики для рисунков 6–8, 10, 11 построены авторами статьи по результатам расчета различных конструкций линейного электродвигателя в программе JMAG.

Source: figures 6–8, 10, 11 were constructed by the authors of the article based on the results of calculations of various designs of a linear electric motor in the program JMAG.

Графическое представление результатов для немагнитной вставки статора размером 9 мм представлено на рисунке 7. После момента пуска в течение 3 мс значение силы возрастает, прежде чем развернуться и пересечь ось абсцисс на 6,5 мс, что соответствует положению равновесия, когда НС и МЯ находятся симметрично относительно друг друга.

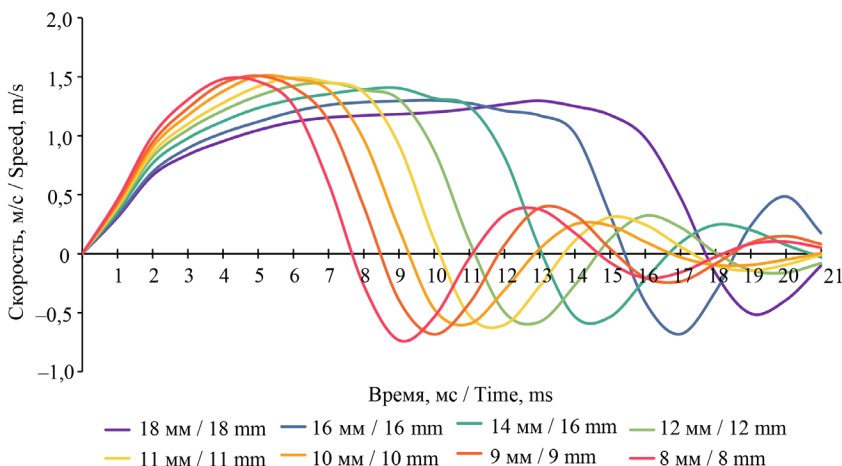
Присутствие смены знака силы тяги связано с тем, что за время перемещения якоря до равновесного положения он успевает достичь такой скорости, что по инерции пролетает чуть дальше, пока сила тяги, направленная уже в обратную сторону, не вернет его снова в равновесное положение. Эти колебания будут продолжаться некоторое время, пока, в конечном итоге, не затухнут.



Р и с. 7. Значения силы тяги в начальный момент времени в зависимости от длины немагнитной вставки статора

F i g. 7. Values of the pulling force at the initial moment of time depending on the length of the non-magnetic stator spacer

С увеличением длины немагнитной вставки статора, магнитного сопротивления, уменьшается максимальная скорость якоря и его ускорение. Это хорошо видно на графике (рис. 8). Амплитуда соответствующих пиков с увеличением длины уменьшается, а также снижается величина скорости, до которой разгоняется якорь за определенный промежуток времени. При длине вставки 8 мм якорь за 4 мс успевает разогнаться до скорости 1,5 м/с, а при 18 мм – всего до 0,95 м/с.



Р и с. 8. Изменение скорости якоря во времени в зависимости от длины немагнитной вставки статора

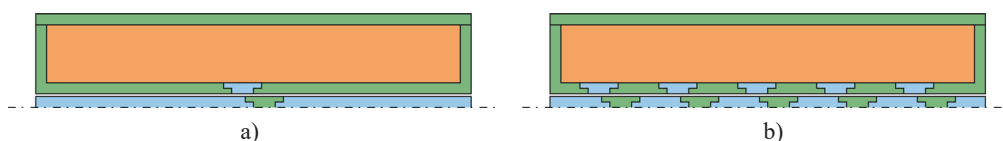
F i g. 8. Change in the armature speed over time depending on the length of the non-magnetic stator

Уменьшение длины немагнитной вставки статора позволяет добиться улучшения ряда рабочих характеристик линейного двигателя. Однако, несмотря на полученные положительные результаты, был выявлен и существенный недостаток в работе электродвигателя. С уменьшением длины немагнитной вставки статора сокращается расстояние, на которое смещается якорь для достижения положения равновесия, что приводит к убыванию полезной длины хода. Так, изменяя длину немагнитной вставки, возможно получить два конечных результата: либо наибольшее усилие, либо максимальный рабочий ход.

Если одно магнитное кольцо якоря втягивается с одним значением усилия, можно предположить, что два кольца будут втягиваться с силой в два раза большей. Магнитный поток, проходя воздушный зазор между статором и якорем, воздействует на ферромагнитное кольцо якоря. Следовательно, увеличение количества магнитных колец в составе магнитопровода якоря даст возможность добиться существенного повышения силы тяги на подвижном элементе линейного электродвигателя.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы были разработаны конструкции импульсных линейных электродвигателей с различным количеством немагнитных вставок на статоре и соответствующим числом магнитных колец на якоре.

Количество НС было принято в диапазоне от 1 (рис. 9 а) до 5 (рис. 9 б), поскольку 5 – максимальное количество вставок, которое может быть использовано при текущих линейных размерах электродвигателя. Количество МЯ равно количеству НС. Размер НС принят 8 мм, размер МЯ – 11 мм.



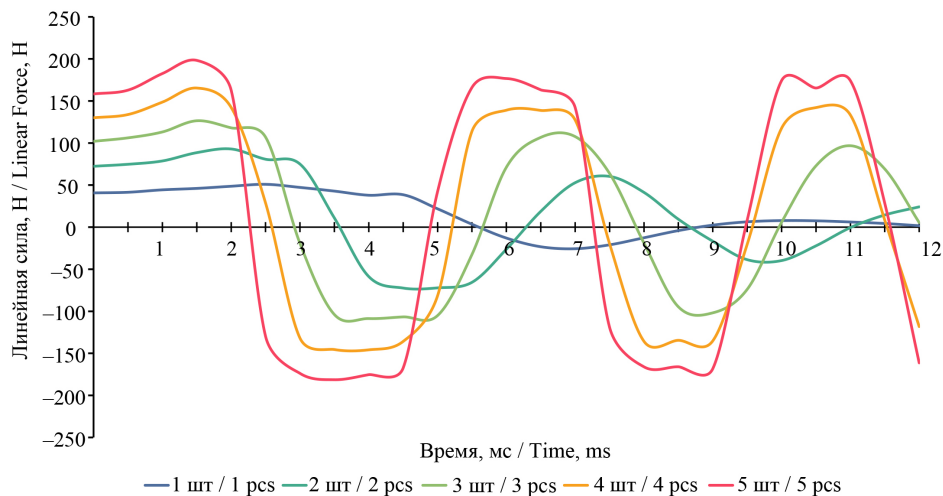
Р и с. 9. Количество немагнитных вставок статора: а) одна; б) пять

F i g. 9. Number of non-magnetic stator spacers: a) one; b) five

Когда количество НС и МЯ стало отличным от одного, потребовалось наличие между ними «противоположных» вставок. Немагнитные вставки статора разделились магнитными втулками статора (МС), а магнитные кольца якоря – немагнитными вставками якоря. Размер МС – 19,2 мм, размер немагнитных вставок якоря – 16,2 мм.

На графике (рис. 10) хорошо видно, что, как и предполагалось, с увеличением количества немагнитных вставок статора в магнитопроводе двигателя, возрастает сила тяги на якоре. Также увеличивается время, в течение которого якорь осциллирует около положения равновесия. Это наглядно видно при сравнении кривых для 1 вставки и 5 вставок. К моменту 11,5 мс якорь с 1 немагнитной вставкой статора за 1 период (если отсчитывать от момента первого пересечения графиком оси абсцисс) почти закончил колебания, в то время как якорь с 5 немагнитными вставками статора спустя 2 периода лишь немного снизил амплитуду.

Говоря о колебаниях, важно понимать, что при использовании импульсного линейного электродвигателя в ручном инструменте полезная работа будет совершаться только за то время, пока якорь перемещается от начального положения до конечного – равновесного. Поэтому при анализе кривых основной интерес представляет лишь та их часть, что расположена до первого пересечения оси абсцисс.



Р и с. 10. Изменение силы тяги якоря в функции времени движения и в зависимости от количества немагнитных вставок статора

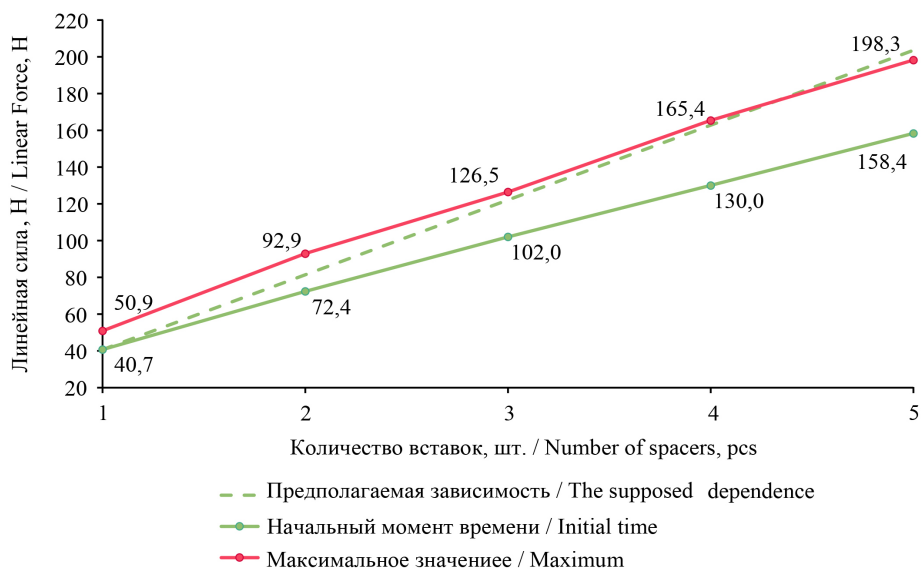
F i g. 10. Change in the armature pulling force as a function of the movement time and depending on the number of non-magnetic stator spacers

Проанализировать влияние количества немагнитных вставок статора на величину силы тяги якоря возможно, рассмотрев результаты, представленные на графике (рис. 11).

Зеленая штрихованная линия показывает предполагаемую прямо пропорциональную зависимость – с увеличением количества немагнитных вставок статора линейно возрастает сила тяги якоря. Зеленая сплошная линия демонстрирует фактические значения силы тяги, которые развиваются вторичным элементом двигателя в начальный момент времени в зависимости от количества немагнитных вставок статора. Красная непрерывная линия на графике отражает максимальные значения силы тяги в период перемещения якоря от начального положения до конечного – равновесного.

Из графика видно, что фактические значения силы тяги якоря в начальный момент времени сильно отличаются от предполагаемых. Например, максимальное значение силы тяги на якоре для магнитопровода с пятью немагнитными вставками на статоре электродвигателя существенно меньше, чем изначально предполагалось.

Полученные результаты говорят о том, что с увеличением количества немагнитных вставок статора повышается магнитное сопротивление электродвигателя.



Р и с. 11. Зависимость силы тяги якоря от количества немагнитных вставок статора для разных режимов работы линейного электродвигателя

Fig. 11. Dependence of the armature pulling force on the number of non-magnetic stator spacers for different operating modes of a linear electric motor

Зависимость максимальных значений силы тяги на якоре (рис. 11), обозначенная красным цветом, располагается выше прямой линии зеленого цвета – начальных величин силы тяги. Следовательно, с увеличением количества немагнитных вставок на статоре растет не только сила тяги, но и отношение максимальной тяги к начальной.

Подводя итог проделанным исследованиям, можно сказать, что увеличение количества немагнитных вставок в магнитопроводе статора приводит к росту силы тяги на якоре линейного электродвигателя.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанных теоретических исследований с учетом конструктивных особенностей магнитной системы линейного электродвигателя можно сделать следующие заключения.

Сравнение значения силы тяги в начальный момент времени, а также амплитуды графиков, говорит о том, что с увеличением длины НС уменьшается значение линейной силы тяги. Весьма закономерно будет предположить, что данная зависимость обусловлена увеличением магнитного сопротивления, которое необходимо преодолеть суммарному магнитному потоку.

На графике (рис. 6) прослеживается единая закономерность: после момента пуска значение силы тяги возрастает до определенного момента, пока не начинает идти на спад. Максимальное значение усилия, которое развивает электродвигатель соответствует не моменту трогания якоря, а положению, при котором магнитное кольцо якоря шунтирует ферромагнитную втулку статора, не достигая равновесного положения.

Возрастание силы тяги на якоре связано с сокращением магнитного сопротивления магнитной системы линейного двигателя из-за минимизации зазора между подвижным и неподвижным элементами, а спад усилия – с тем, что в определенный момент времени магнитное кольцо якоря оказывается в таком положении по отношению к магнитной втулке статора, что его начинает тянуть обратно, увеличивая зазор и повышая магнитное сопротивление.

Уменьшение длины немагнитной вставки с 18 до 8 мм приводит к увеличению максимально развиваемой силы тяги с 40 до 50 Н, при этом снижается время достижения максимума силы с 12 до 3 мс (увеличивается быстродействие).

В момент начала движения якоря, сила тяги минимальна и возрастает по мере движения якоря до максимального значения, которое соответствует началу шунтирования магнитной втулки статора ферромагнитным кольцом якоря, после чего она начинает убывать.

Снижения силы тяги связано с тем, что на магнитное кольцо якоря, по мере шунтирования магнитной втулки статора, начинает действовать усилие, направленное в обратную сторону движения якоря. В результате изменения магнитного сопротивления магнитопровода линейного электродвигателя в рабочем зазоре между статором и якорем наступает момент, когда две встречно направленные силы уравниваются и создаются предпосылки для полной остановки якоря.

Так же следует отметить, что при движении якоря характерно появление колебаний, которые появляются из-за инерции его движения. Перемещаясь по инерции, якорь проходит положение, для которого характерно магнитное равновесие, после чего он начинает перемещаться в обратном направлении. Чем меньше длина немагнитной вставки статора, тем выше амплитуда этих колебаний, но после 21 мс они практически затухают.

С уменьшением длины немагнитной вставки статора увеличивается скорость перемещения якоря, что говорит о повышении его быстродействия. При этом нужно учитывать, что снижение длины немагнитной вставки статора приводит к уменьшению длины рабочего хода. Поэтому выбор оптимальных параметров немагнитных вставок статора должен быть согласован с требованиями к работе рабочей машины.

Увеличение количества немагнитных вставок статора от 1 до 5 вызывает повышение силы тяги якоря с 50 до 200 Н, при этом увеличивается быстродействие с 2,5 до 1,5 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение длины и увеличение количества немагнитных вставок статора линейного электродвигателя приводит к улучшению рабочих характеристик линейного электродвигателя, например, повышению силы тяги на якоре в четыре раза. Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании ручного инструмента с приводом от линейного электродвигателя. Это позволит снизить массогабаритные показатели, повысить энергоэффективность в процессе эксплуатации при обрезке веток в промышленных садах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усанов К.М., Каргин В.А., Моисеев А.П., Волгин А.В. Дискретные электромагнитные приводы в процессах и технологиях сельхозпроизводства и АПК: моногр. Саратов: ООО «Амирит»; 2021. 184 с. <https://elibrary.ru/eopabd>
2. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P., Maradudin A.M., Leontiev A.A., Peretyatko A.V. Linear Stepping Electromagnetic Engine for Driving Conveyors. In: Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Information Technologies in Business and Industries, ITBI 2019. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing; 2019:052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
3. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A., Moiseev A.P., Chetverikov E.A. Electric Converters of Electromagnetic Strike Machine with Battery Power. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. Tomsk: Institute of Physics Publishing; 2018:052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>
4. Усанов К.М., Мошкин В.И., Каргин В.А., Волгин А.В. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях: моногр. Курган: Курганский государственный университет; 2015. 202 с. <https://elibrary.ru/vpdvcp>
5. Тавасиев Р.М., Кудзаев А.Б., Туриев О.И. Математическая модель гидравлической цепи обрезчика ветвей. *Аграрная наука*. 2008;(9):13. <https://elibrary.ru/juynpd>
6. Zhang J., Kang N., Qu Q., Zhou L., Zhang H. Automatic Fruit Picking Technology: A Comprehensive Review of Research Advances. *Artificial Intelligence Review*. 2024;57(54). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10674-2>
7. Karkee M., Gord J., Sallato B., Whiting M. Optimizing Fruit Production Efficiencies Through Mechanization. In: Achieving Sustainable Cultivation of Temperate Zone Tree Fruits and Berries. 2019. p. 347–372. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0040.10>
8. Khatri S., Shrestha S., Pokharel K.P. Evaluation of Manual Fruit Harvesters and Storability Characteristics of Harvested Sweet Orange Under Ordinary Room Storage Condition. *Sustainability in Food and Agriculture*. 2021;2(2):84–91. <https://doi.org/10.26480/sfna.02.2021.84.91>
9. Antonov S.N. Study of Linear Electric Motor Magnetic System of Hand-Held Electrified Tool. In: Engineering for Rural Development: 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava. 2021:1627–1631. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF349>
10. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Мазина Л.Э. Устройство съема плодов на основе линейного электродвигателя для садоводства. *Сельский механизатор*. 2025;(6):38–39. <https://elibrary.ru/wbkisi>
11. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Каитов М.Р. Садовая электрифицированная пила с линейным электродвигателем. *Сельский механизатор*. 2024;(12):30–31. <https://elibrary.ru/awzvoz>
12. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Адошев А.И., Каланчук И.В. Секатор с линейным электродвигателем для промышленного садоводства. *Сельский механизатор*. 2024;(10):36–37. <https://elibrary.ru/fwozes>
13. Никитенко Г.В., Антонов С.Н. Моделирование линейного электродвигателя для электрифицированного секатора, используемого в садоводстве. *Вестник НГИЭИ*. 2019;(10):74–84. <https://elibrary.ru/kgjqpj>
14. Kargin V., Usanov K., Moiseev A., Volgin A., Chetverikov E., Lagina L. Simulation of Energy Conversion Processes in Linear Electromagnetic Motors with Through Axial Channel. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2023;73(2):71–82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022>
15. Усанов К.М., Моисеев А.П. Некоторые перспективы применения электромагнитных машин с осевым каналом в процессах и технологиях АПК. *Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова*. 2008;(7):64–67. <https://www.elibrary.ru/jspqsd>

16. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: моногр. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та; 2010. 220 с. <https://www.elibrary.ru/qmhezf>
17. Moshkin V.I., Shestakov D.N., Pomyalov S.Y., Ugarov G.G. Mathematical Simulation of Electromagnetic Pulse Linear Motors. In: 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Apepe 2014: Conference Proceedings. Saratov: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2014. p. 348–352. <https://doi.org/10.1109/APEDE.2014.6958275>
18. Antonov S., Nikitenko G. Linear Electric Motor For Handheld Electrified Tools Used In Gardening. In: Engineering for Rural Development: 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava; 2019. p. 804–807. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N233>
19. Forbes M., Robertson W.S.P., Zander A.C., Paulides J.J.H. An Elemental Modelling Method for Linear Motor Parametric Studies Using Boundary-Free Analytic Magnetic Field Solutions: Including 3D Geometry, Permeability, and End Effects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025;(630):173416. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173416>
20. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A., Devederkin I., Efanov A. Simulation of the Magnetic System of a Linear Motor for a Delimber. In: International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences; 2021. p. 00097. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700097>
21. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: моногр. Курган: Курганский государственный университет; 2010. 220 с. <https://elibrary.ru/qmhezf>
22. Усанов К.М., Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием: моногр. Курган: Курганский государственный университет; 2006. 283 с. <https://elibrary.ru/qmeyhv>
23. Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Мазинова Л.Э., Сергиенко Е.Г. Линейный электродвигатель. Патент 2792975 С1 Российская Федерация. 28 марта 2023. <https://elibrary.ru/hlvafj>
24. Тавасиев Р.М., Дулаев А.К., Бекузаров А.Б., Дзабиев В.З., Туриев О.И. Секатор. Патент 2142221 С1 Российская Федерация. 12 октября 1999. <https://elibrary.ru/aiypvi>
25. Hsieh M.-F., Tung C.-J., Yao W.-S., Wu M.-C., Liao Y.-S. Servo Design of a Vertical Axis Drive Using Dual Linear Motors for High Speed Electric Discharge Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(3–4):546–554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.011>
26. Guo G., Zhao Y., Yu A. Analysis of Electromagnetic Vibration of Submerged Tubular Linear Motors Based on Wave Propagation Approach. *Wave Motion*. 2024;(127):103287. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2024.103287>

REFERENCES

1. Usanov K.M., Kargin V.A., Moiseev A.P., Volgin A.V. [Discrete Electromagnetic Drives in Agricultural Production Processes and Technologies]: A Monography. Saratov: LLC “Amirit”; 2021. 184 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/eopabd>
2. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P., Maradudin A.M., Leontiev A.A., Peretyatko A.V. Linear Stepping Electromagnetic Engine for Driving Conveyors. In: Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Information Technologies in Business and Industries, ITBI 2019. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing; 2019:052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
3. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A., Moiseev A.P., Chetverikov E.A. Electric Converters of Electromagnetic Strike Machine with Battery Power. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. Tomsk: Institute of Physics Publishing; 2018:052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>

4. Usanov K.M., Moshkin V.I., Kargin V.A., Volgin A.V. [Linear Electromagnetic Motors and Drives in Pulse Processes and Technologies]: A Monography. Kurgan: Kurgan State University; 2015. 202 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/vpdvcp>
5. Tavasiev R.M., Kudzaev A.B., Turiev O.I. Mathematical Model of Hydraulic Chain of Branch Cutter. *Agrarian science*. 2008;(9):13. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/juynpd>
6. Zhang J., Kang N., Qu Q., Zhou L., Zhang H. Automatic Fruit Picking Technology: A Comprehensive Review of Research Advances. *Artificial Intelligence Review*. 2024;57(54). <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10674-2>
7. Karkee M., Gord J., Sallato B., Whiting M. Optimizing Fruit Production Efficiencies Through Mechanization. In: Achieving Sustainable Cultivation of Temperate Zone Tree Fruits and Berries. 2019. p. 347–372. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0040.10>
8. Khatri S., Shrestha S., Pokharel K.P. Evaluation of Manual Fruit Harvesters and Storability Characteristics of Harvested Sweet Orange Under Ordinary Room Storage Condition. *Sustainability in Food and Agriculture*. 2021;2(2):84–91. <https://doi.org/10.26480/sfna.02.2021.84.91>
9. Antonov S.N. Study of Linear Electric Motor Magnetic System of Hand-Held Electrified Tool. In: Engineering for Rural Development: 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava. 2021:1627–1631. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF349>
10. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Mazinova L.E. Fruit Removal Device Based on Linear Electric Motor for Horticulture. *Selskiy Mechanizator*. 2025;(6):38–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/wbkisi>
11. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Kaitov M.R. Garden Electric Saw with Linear Electric Motor. *Selskiy Mechanizator*. 2024;(12):30–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/awzvoz>
12. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Adoshev A.I., Kalanchuk I.V. Secateur with Linear Electric Motor for Industrial Gardening. *Selskiy Mechanizator*. 2024;(10):36–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/fwozes>
13. Nikitenko G.V., Antonov S.N. Modeling Linear Electric Motor for an Electrified Secator Used in Gardening. *NGIEI Bulletin*. 2019;(10):74–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/kgjqpj>
14. Kargin V., Usanov K., Moiseev A., Volgin A., Chetverikov E., Lagina L. Simulation of Energy Conversion Processes in Linear Electromagnetic Motors with Through Axial Channel. *Strojnicky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2023;73(2):71–82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022>
15. Usanov K.M., Moiseev A.P. Somewhat About the Perspectives to Use of the Elektromagnetic Machines with Axial Canal in The Processes and Tehnologies of Aic. *The Bulletin Saratov State Agrarian University in Honor of N. I. Vavilov*. 2008;(7):64–67. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/jspqsd>
16. Moshkin V.I., Neiman V.Yu., Ugarov G.G. [Pulse Linear Electromagnetic Motors]: A Monography. Kurgan: Publishing House of Kurgan State University; 2010. 220 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/qmhezf>
17. Moshkin V.I., Shestakov D.N., Pomyalov S.Y., Ugarov G.G. Mathematical Simulation of Electromagnetic Pulse Linear Motors. In: 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, Apepe 2014: Conference Proceedings. Saratov: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2014. p. 348–352. <https://doi.org/10.1109/APEDE.2014.6958275>
18. Antonov S., Nikitenko G. Linear Electric Motor For Handheld Electrified Tools Used In Gardening. In: Engineering for Rural Development: 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava; 2019. p. 804–807. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N233>
19. Forbes M., Robertson W.S.P., Zander A.C., Paulides J.J.H. An Elemental Modelling Method for Linear Motor Parametric Studies Using Boundary-Free Analytic Magnetic Field Solutions: Including 3D Geometry, Permeability, and End Effects. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2025;(630):173416. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2025.173416>

20. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A., Devederkin I., Efanov A. Simulation of the Magnetic System of a Linear Motor for a Delimber. In: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences; 2021. p. 00097. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700097>
21. Moshkin V.I., Neiman V.Yu., Ugarov G.G. [Pulsed Linear Electromagnetic Motors]: A Monography. Kurgan: Kurgan State University; 2010. 220 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qmhezf>
22. Usanov K.M., Moshkin V.I., Ugarov G.G. [Linear Pulse Electromagnetic Drive of Machines With Autonomous Power Supply]: A Monography. Kurgan: Kurgan State University; 2006. 283 p. (In Russ.) <https://elibrary.ru/qmehyv>
23. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Mazinova L.E., Sergienko E.G. Linear Electric Motor. Patent 2792975 C1 Russian Federation. 2023 March 28. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/hlvafj>
24. Tavasiev R.M., Dulaev A.K., Bekuzarov A.B., Dzabiev V.Z., Turiev O.I. Pruner. Patent 2142221 C1 Russian Federation. 1999 October 12. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/aiypvi>
25. Hsieh M.-F., Tung C.-J., Yao W.-S., Wu M.-C., Liao Y.-S. Servo Design of a Vertical Axis Drive Using Dual Linear Motors for High Speed Electric Discharge Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(3–4):546–554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.011>
26. Guo G., Zhao Y., Yu A. Analysis of Electromagnetic Vibration of Submerged Tubular Linear Motors Based on Wave Propagation Approach. *Wave Motion*. 2024;(127):103287. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2024.103287>

Об авторах:

Никитенко Геннадий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования и энергообеспечения АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, Researcher ID: N-1769-2014, Scopus ID: 57202640003, SPIN-код: 9068-0520, nikitenko_gv@mail.ru

Антонов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и энергообеспечения АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, Researcher ID: V-1081-2017, Scopus ID: 57021226800, SPIN-код: 2575-3686, antonov_serg@mail.ru

Гаркавенко Никита Сергеевич, аспирант кафедры электрооборудования и энергообеспечения АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5948-391X>, Researcher ID: KCR-2037-2024, SPIN-код: 8319-7266, furfurlis@mail.ru

Вклад авторов:

Г. В. Никитенко – формулирование замысла / идеи исследования, целей и задач.

С. Н. Антонов – разработка или проектирование методологии исследования; создание моделей.

Н. С. Гаркавенко – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных / доказательств.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 29.09.2025; поступила после рецензирования 09.02.2026;
принята к публикации 27.02.2026*

About the authors:

Gennady V. Nikitenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Power Supply of the Agro-Industrial Complex, Stavropol State Agrarian University (12 Zootekhnicheskyy Lane, Stavropol 355035, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, Researcher ID: [N-1769-2014](#), Scopus ID: [57202640003](#), SPIN-code: [9068-0520](#), nikitenko_gv@mail.ru

Sergey N. Antonov, Cand.Sc. (Eng.), Associate Professor, the Department of Electrical Equipment and Power Supply for the Agricultural Sector, Stavropol State Agrarian University (12 Zootekhnicheskyy Lane, Stavropol 355035, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, Researcher ID: [V-1081-2017](#), Scopus ID: [57021226800](#), SPIN-code: [2575-3686](#), antonov_serg@mail.ru

Nikita S. Garkavenko, Post-Graduate Student of the Department of Electrical Equipment and Power Supply for the Agricultural Sector, Stavropol State Agrarian University (12 Zootekhnicheskyy Lane, Stavropol 355035, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5948-391X>, Researcher ID: [KCR-2037-2024](#), SPIN-code: [8319-7266](#), furfurlis@mail.ru

Authors contribution:

G. V. Nikitenko – formulating the study ideas, aims and objectives.

S. N. Antonov – developing the study methodology; creating models.

N. S. Garkavenko – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data/evidence.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.09.2025; revised 09.02.2026; accepted 27.02.2026