

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.313.282:634.1-13

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-92-102>**Линейный электродвигатель для электрифицированного секатора****Г.В. Никитенко¹✉, С.Н. Антонов², М.А. Мастепаненко³, И.В. Каланчук⁴**^{1,2,3,4} Ставропольский государственный аграрный университет; г. Ставрополь, Россия¹ nikitenko_gv@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755>² antonov_serg@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X>³ mma_26@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X>⁴ igor.kalanchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>

Аннотация. Ручные и электрические секаторы, используемые при обрезке деревьев в промышленном садоводстве, являются недостаточно эффективными. Электрифицированный секатор с усовершенствованным магнитопроводом (статором и якорем электродвигателя) и оптимальными энергетическими характеристиками будет способствовать эффективному развитию отрасли. Исследования проведены с целью разработки линейного электродвигателя (ЛЭД) для привода ручного электрифицированного секатора и адаптации его технических характеристик (силы резания) к условиям промышленного садоводства. В предлагаемой конструкции ЛЭД усилие резания создается двумя намагничивающими катушками (рабочей и пусковой). Первая катушка установлена на неподвижный магнитопровод, вторая расположена на магнитной системе, имеющей немагнитную вставку. Линейный размер немагнитной вставки якоря варьировался и достигал 5, 10 и 15 мм. Теоретические значения силы тяги якоря в зависимости от размера немагнитной вставки, полученные моделированием в программе ElCut, сравнивали с экспериментальными данными. Результаты исследований показали, что чем длиннее немагнитная вставка, тем больше длина эффективного хода второй (пусковой) катушки. Для немагнитной вставки размером 5 мм длина хода составила 3 мм, а у вставки 15 мм – 9 мм соответственно. Установлено, что с увеличением размера немагнитной вставки пусковое усилие снижается с 27 до 17 Н. Суммарное усилие, создаваемое двумя намагничивающими катушками, позволяет в начальный момент осуществить перемещение системы на холостом ходу, а в конце рабочего хода при действии первой (рабочей) катушки реализовать процесс резания ветки диаметром 6 мм с нарастающим усилием от 25 до 132 Н. Теоретические значения суммарной силы тяги практически совпадают с экспериментальной кривой. Полученные характеристики силы резания ветки и работы линейного электродвигателя можно использовать при проектировании ручных электрифицированных секаторов.

Ключевые слова: садоводство; обрезка деревьев; линейный электродвигатель; электродвигатель для электрифицированного секатора; секатор; процесс резания; магнитопровод; немагнитная вставка

Благодарности. Статья подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-591) в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ, утвержденной протоколом заседания президиума Комиссии по научно-технологическому развитию Российской Федерации от 29 мая 2025 г. № 3.

Для цитирования: Никитенко Г.В., Антонов С.Н., Мастепаненко М.А., Каланчук И.В. Линейный электродвигатель для электрифицированного секатора // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 92-102. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-92-102>

ORIGINAL ARTICLE

Linear electric motor for an electric pruner

G.V. Nikitenko¹, S.N. Antonov², M.A. Mastepanenko³, I.V. Kalanchuk⁴^{1,2,3,4} Stavropol State Agrarian University; Stavropol, Russia¹nikitenko_gv@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755>²antonov_serg@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X>³mma_26@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X>⁴igor.kalanchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>

Abstract. Manual and electric pruners used for tree pruning in industrial horticulture are insufficiently effective. An electric pruner with an improved magnetic circuit (a stator and an armature of the electric motor) and optimal energy characteristics will contribute to the effective development of the industry. The research aimed to develop a linear electric motor (LEM) for driving a manual electric pruner and to adapt its technical characteristics (cutting force) to the conditions of industrial horticulture. In the proposed LEM design, the cutting force is generated by two magnetizing coils (working and starting). The first coil is mounted on a stationary magnetic circuit, while the second is located on a magnetic system featuring a non-magnetic insert. The linear dimension of the armature non-magnetic insert was varied to 5, 10, and 15 mm. Theoretical values of the armature traction force depending on the size of the non-magnetic insert, obtained through simulation in the ElCut software, were compared with experimental data. The research results showed that the longer the non-magnetic insert, the greater the effective stroke length of the second (starting) coil. For a non-magnetic insert size of 5 mm, the stroke length was 3 mm, while for a 15 mm insert, it was 9 mm, respectively. It was established that with an increase in the size of the non-magnetic insert, the starting force decreases from 27 to 17 N. The total force generated by the two magnetizing coils enables the system to move at idle at the initial moment. At the end of the working stroke, under the action of the first (working) coil, a 6 mm diameter branch is cut with a force increasing from 25 to 132 N. The theoretical values of the total traction force practically coincide with the experimental curve. The obtained characteristics of the branch cutting force and the operation of the linear electric motor can be used in the design of manual electrified pruners.

Keywords: horticulture; tree pruning; linear electric motor; electric motor for electric pruners; pruner; cutting process; magnetic circuit; non-magnetic insert

Funding. The article was prepared with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2025-591) as part of the implementation of the development program for the World-Class Scientific Center “Agroengineering of the Future” of Stavropol State Agrarian University, approved by the minutes of the meeting of the Presidium of the Commission for the Scientific and Technological Development of the Russian Federation on May 29, 2025, No. 3.

For citation: Nikitenko G.V., Antonov S.N., Mastepanenko M.A., Kalanchuk I.V. Linear electric motor for an electric pruner. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):92-102 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-92-102>

Введение

Низкий уровень механизации и автоматизации технологических процессов садоводства препятствует эффективному развитию отрасли [1]. Самым продолжительным и трудоемким процессом является детальная обрезка деревьев. Разработанные различные механизированные и электрифицированные инструменты не нашли широкого применения в садах промышленного типа¹ [2]. Недостатками

пневмо- и гидравлических инструментов являются низкий КПД, потери при передаче энергии и необходимость использования дополнительного оборудования. Электрифицированный инструмент на основе щеточных машин постоянного тока отличается низкой эксплуатационной надежностью и необходимостью преобразования вращательного движения якоря электродвигателя в поступательное движение рабочего органа инструмента [3-5].

¹ Апажев А.К., Хагажеев Х.Х., Абдулхаликов Р.З. и др. Теоретические основы разработки технологии и технических решений по уходу за кроной плодовых насаждений в садах на склоновых землях Кабардино-Балкарской Республики, обеспечивающих получение экологически чистой продукции. Нальчик: ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, 2024. 132 с. EDN: EDJDFQ.

Использование линейного электродвигателя (ЛЭД) позволяет устранить данные недостатки^{2,3}. Линейные электродвигатели применяются в отраслях народного хозяйства, где требуется высокоточное и скоростное перемещение рабочего органа в пространстве [7, 8]. Применение линейного электродвигателя в ручных инструментах для ухода за промышленными садами и, в частности, для привода в секаторах позволит повысить эффективность обрезки [9].

Зарубежными учеными проводятся активные научные исследования линейных электродвигателей, применяемых в различных технологических процессах [10-12]. В России широкому внедрению ЛЭД препятствует отсутствие научно обоснованных рекомендаций по их разработке и применению в садоводческих хозяйствах в качестве элемента привода электрифицированного инструмента.

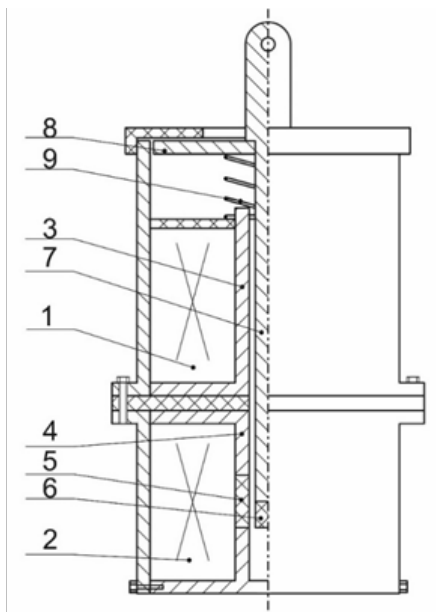


Рис. 1. Линейный электродвигатель (ЛЭД):

- 1, 2 – первая и вторая намагничивающие катушки;
- 3 – магнитопровод; 4 – магнитная система;
- 5 – немагнитная вставка; 6 – немагнитная втулка;
- 7 – магнитная втулка; 8 – подвижный магнитопровод;
- 9 – пружина

Fig. 1. Linear electric motor (LEM):

- 1, 2 – first and second magnetizing coils; 3 – magnetic core;
- 4 – magnetic system; 5 – non-magnetic insert;
- 6 – non-magnetic bushing; 7 – magnetic bushing;
- 8 – movable magnetic core; 9 – spring

Цель исследований: разработать ЛЭД для привода ручного электрифицированного секатора и адаптировать его технические характеристики под производственные условия.

Материалы и методы

В качестве привода для электрифицированного секатора предлагается линейный электродвигатель с двумя намагничивающими катушками 1 и 2 (рис. 1). Первая катушка установлена на неподвижный магнитопровод 3. Вторая катушка расположена на магнитной системе 4, имеющей немагнитную вставку 5. Якорь линейного электродвигателя выполнен из немагнитной втулки 6, магнитной втулки 7 и подвижного магнитопровода 8. Для возврата якоря в исходное положение используется пружина 9 [13].

Линейный электродвигатель работает следующим образом. При отсутствии питания на намагничивающих катушках якорь занимает верхнее положение под действием пружины (рис. 2). При подаче напряжения на первую и вторую намагничивающие катушки по ним начинает протекать ток, который создает

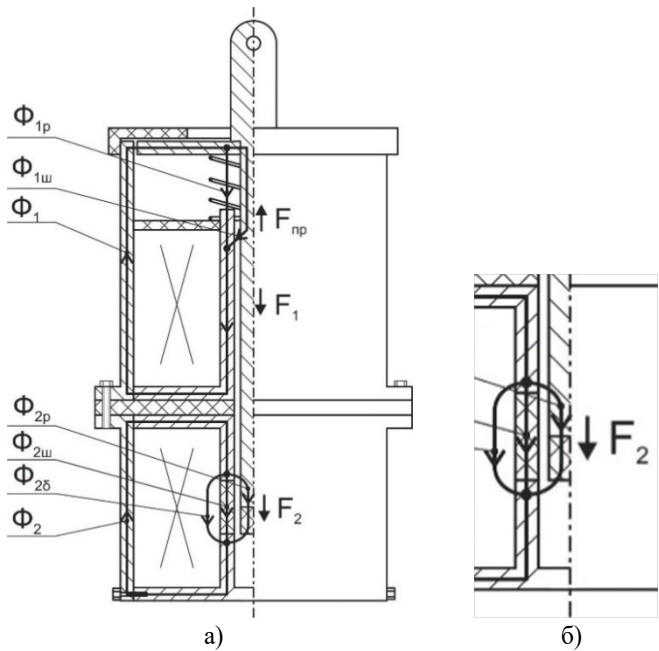


Рис. 2. Основные магнитные потоки в начале работы ЛЭД:

- а – общий вид; б – фрагмент с немагнитной вставкой

Fig. 2. Main magnetic fluxes at the start of the LEM operation:

- а – general view; б – fragment with a non-magnetic insert

² Усанов К.М., Каргин В.А., Моисеев А.П., Волгин А.В. Дискретные электромагнитные приводы в процессах и технологиях сельхозпроизводства и АПК: Монография. Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2021. 184 с. EDN: EOPABD.

³ Усанов К.М., Мошкин В.И., Каргин В.А., Волгин А.В. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях: Монография. Курган: Курганский государственный университет, 2015. 202 с. EDN: VPDVEP

магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 . Магнитный поток Φ_1 , проходя по магнитному корпусу и подвижному магнитопроводу, разделяется на два основных потока Φ_{1p} и $\Phi_{1ш}$, которые суммируются в неподвижном магнитопроводе.

Магнитный поток Φ_2 , проходя по магнитному корпусу второй катушки, разделяется на три основных потока Φ_{2p} и $\Phi_{2ш}$ и $\Phi_{2\delta}$ ввиду наличия немагнитной вставки, а затем потоки суммируются в магнитопроводе. В результате прохождения магнитных потоков Φ_{1p} и Φ_{2p} возникают силы F_1 и F_2 , которые приводят к перемещению якоря в нижнее положение (рис. 3). При отключении питания от намагничивающих катушек якорь под воздействием пружины возвращается в верхнее положение.

Линейный электродвигатель имеет две намагничивающие катушки и магнитопровод статора, который отделен воздушным зазором от магнитной системы якоря. Большое магнитное сопротивление воздушного зазора не позволяет создать достаточную силу тяги якоря в момент пуска при подаче напряжения на первую намагничивающую катушку. Поэтому для повышения тягового усилия в момент трогания к источнику питания одновременно подключаются две намагничивающие катушки электродвигателя. Кроме того, величина начального усилия трогания якоря зависит от линейного размера – длины немагнитной вставки (h) (рис. 4), что требует дополнительного теоретического исследования. При этом отметим, что длина воздушного зазора (l) равна длине рабочего хода – 15 мм.

Изучение влияния размера немагнитной вставки якоря на величину тягового усилия электродвигателя проводили для разных конструкций магнитной системы с длиной вставок (h) 5, 10, 15 мм. Максимальное значение этой длины обусловлено длиной хода якоря (15 мм), а минимальное – возможностью появления магнитных потоков Φ_{2p} и $\Phi_{2ш}$ и $\Phi_{2\delta}$, создающих силу трогания якоря.

Расчеты производили с помощью программного пакета ElCut, предназначенного для инженерного моделирования двумерных электромагнитных полей методом конечных элементов.

При создании компьютерной модели ЛЭД учитывали геометрию ЛЭД и свойства сред (воздуха, изотропных и ортотропных материалов, изотропных ферромагнетиков, проводников с током), источники поля (ток распределенный или сосредоточенный, плотность тока, постоянный магнит или однородное внешнее поле) и граничные условия (условие Дирихле). С помощью интегрального калькулятора и мастера индуктивностей были рассчитаны магнитная индукция, магнитный потенциал, напряженность магнитного поля, сила, энергия магнитного поля, потокосцепление, индуктивность.

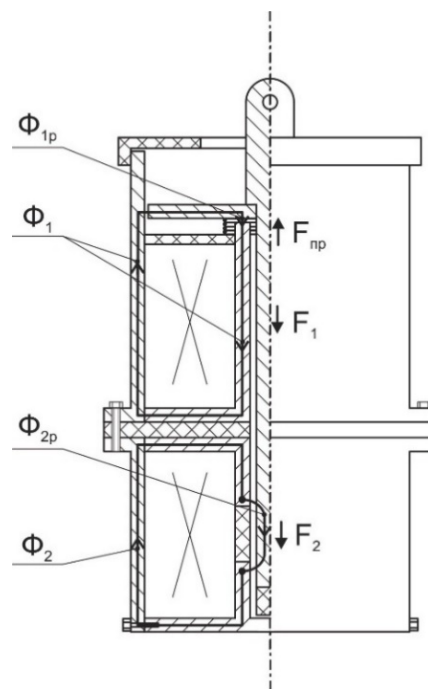


Рис. 3. Основные магнитные потоки в конце работы ЛЭД

Fig. 3. Main magnetic fluxes at the end of the LEM operation

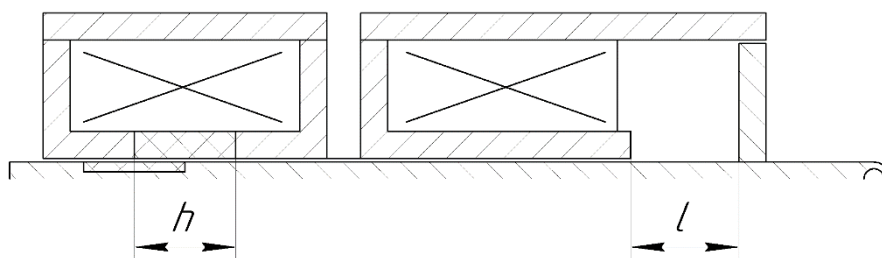


Рис. 4. Расположение немагнитной вставки

Fig. 4. Location of the non-magnetic insert

Результаты и их обсуждение

Моделирование ЛЭД началось с построения геометрической модели и задания свойств материалов и граничных условий. Далее автоматический генератор сетки покрывает сечение электродвигателя треугольными конечными элементами (рис. 5).

Сетку построили таким образом, чтобы ее плотность была выше в местах прохождения основных магнитных потоков, которые создают силу тяги якоря.

Параметры питания катушек намагничивания задали в виде плотности тока, в размере 12 А/мм², что соответствует повторно-кратковременному режиму работы электродвигателя.

По результатам расчета магнитной системы ЛЭД в программном комплексе ElCut получили картины распределения магнитных силовых линий (рис. 6).

Перемещая якорь ЛЭД от начального до конечного положения с шагом 2 мм, определили силу тяги, создаваемую магнитной системой при отдельном и одновременном включении катушек 1 и 2 (рис. 7).

Анализируя данные рисунка 7, можно сделать вывод: для второй (пусковой) катушки характерна начальная сила трогания в диапазоне 27...38 Н, что достаточно для начала движения якоря. При дальнейшем перемещении якоря усилие достигает максимального значения, а потом резко падает практически до нуля. Отметим, что чем длиннее немагнитная вставка, тем более максимум усилия сдвигается в сторону увеличения хода. Например, при длине немагнитной вставки 5 мм пусковая сила тяги равна 27 Н, а при перемещении якоря на 2 мм достигается максимум 38 Н. При использовании в конструкции магнитопровода якоря электродвигателя немагнитной вставки длиной 15 мм пусковое усилие составляет 17 Н, а максимальное значение 23,5 Н достигается при перемещении якоря на 6 мм.

Во всех рассмотренных магнитных системах показатели начальной силы тяги для первой намагниченной катушки не превышают 10 Н. Максимальное усилие 132 Н всегда достигается в конечном положении якоря.

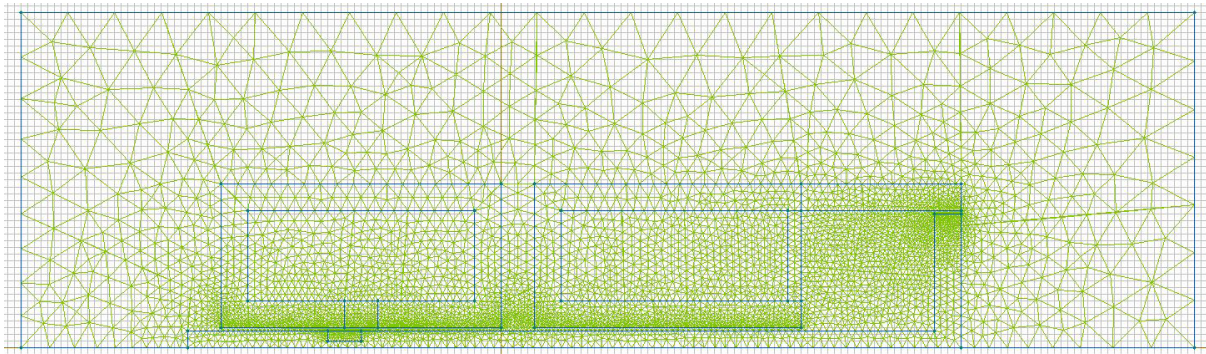


Рис. 5. Сетка конечных элементов
Fig. 5. Finite element mesh

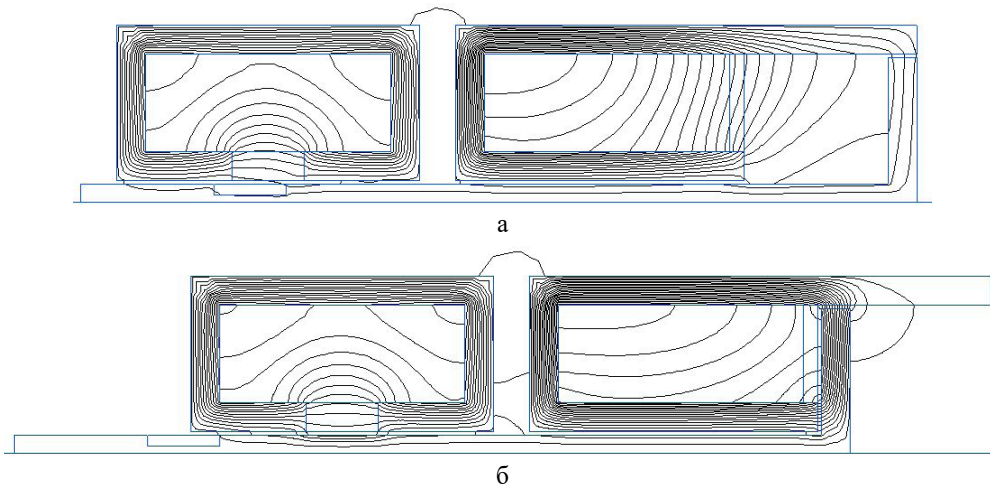
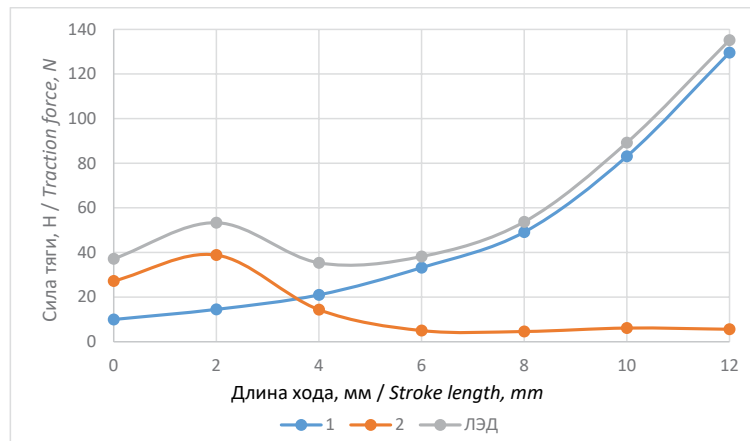
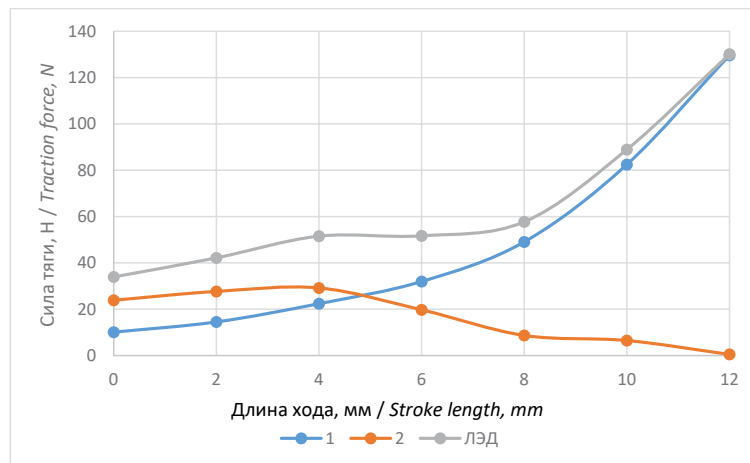


Рис. 6. Картина распределения силовых магнитных линий ЛЭД:
а – в начале рабочего хода; б – в конце рабочего хода

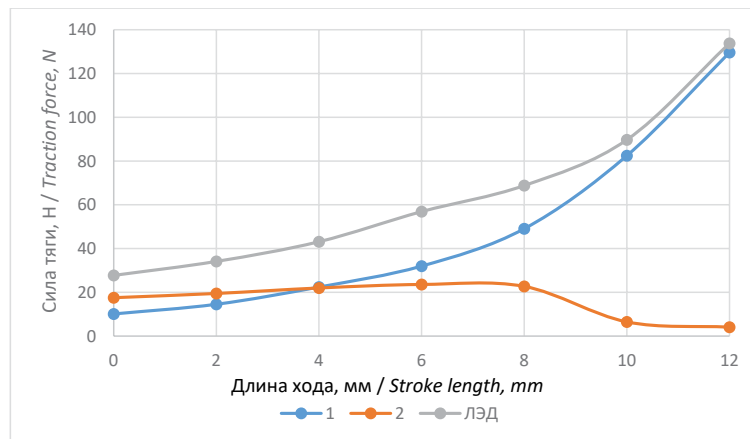
Fig. 6. Magnetic field line distribution pattern of the LEM:
a – at the beginning of the working stroke; б – at the end of the working stroke



а



б



в

Рис. 7. Сравнение силовых характеристик линейного электродвигателя при перемещении якоря и различной длине немагнитной вставки:
а – 5 мм; б – 10 мм; в – 15 мм

Fig. 7. Comparison of force characteristics of the linear electric motor in different operating modes:
а – with a non-magnetic insert of 5 mm; б – 10 mm; в – 15 mm

Значение силы тяги линейного электродвигателя (рис. 8) при длине вставки 15 мм нелинейно возрастает и не имеет явно выраженного снижения на 4 мм по сравнению с вставкой длиной 5 мм. Снижение общего усилия может приводить к заклиниванию ветки между лезвиями секатора в процессе резания.

Для подтверждения результатов компьютерного моделирования магнитной системы линейного электродвигателя спроектирован и изготовлен опытный образец двигателя с немагнитной вставкой якоря длиной 15 мм (рис. 9).

Одним из показателей работы ЛЭД является график изменения силы тяги якоря в функции его

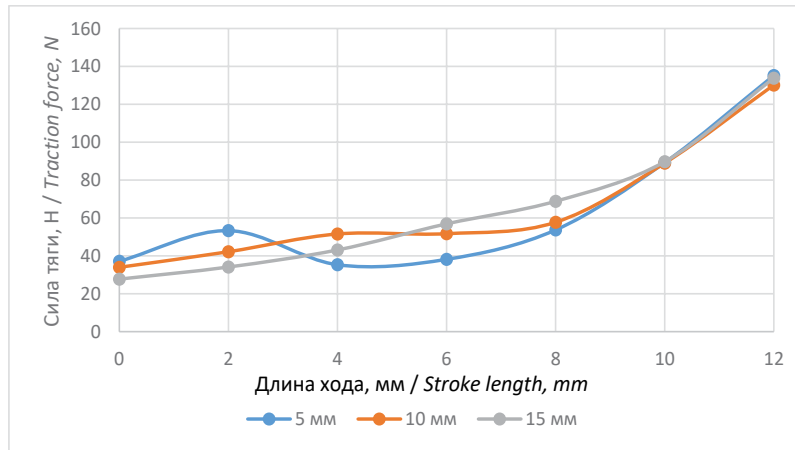


Рис. 8. Сравнение силы тяги якоря при одновременной работе двух катушек намагничивания и различной длине немагнитной вставки
Fig. 8. Comparison of the armature traction force with simultaneous operation of the magnetizing coils for different sizes of the non-magnetic insert

перемещения. Для экспериментального снятия графической зависимости изготовлен лабораторный стенд, состоящий из системы крепления для ЛЭД, датчика динамометра и подвижной платформы (рис. 10). При подаче на намагничивающую катушку напряжения 20 В якорь начинает перемещаться, и показания с датчика усилия автоматически передаются на персональный компьютер для записи в базу данных. Замеры проводятся от начального положения якоря до конечного с шагом 2 мм.

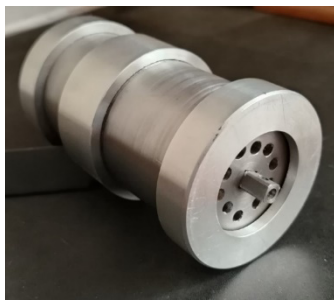


Рис. 9. Опытный образец ЛЭД
Fig. 9. Prototype of the LEM

Результаты измерений динамического процесса перемещения якоря выводятся в цифровом варианте на экран дисплея.

Измерения проводили отдельно: для намагничивающих катушек 1, 2 и при их совместной работе (рис. 11).

Анализируя экспериментальные данные (рис. 11), отметим, что для второй (пусковой) намагничивающей катушки начальная сила тяги равна 10 Н, а максимум усилия 23,6 Н достигается при длине хода 8 мм. Дальнейшее перемещение якоря приводит к снижению усилия до 5 Н. Это говорит о том, что магнитная система второй намагничивающей катушки приходит в магнитное равновесие.

Первая намагничивающая катушка в момент пуска (рис. 11) развивает силу тяги, равную 11 Н. В процессе перемещения якоря и достижения им хода 6 мм сила тяги повышается до 23 Н и достигает своего максимального значения 128 Н в конце движения. Резкий скачок тягового усилия связан с уменьшением воздушного зазора (*l*) (рис. 4), и как следствие – со снижением магнитного сопротивления ЛЭД.

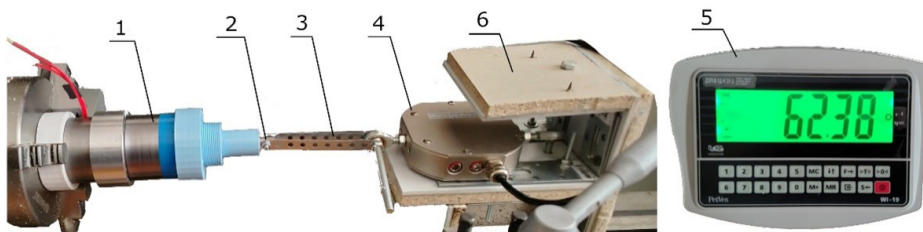


Рис. 10. Стенд для исследования тяговых характеристик ЛЭД:
 1 – ЛЭД; 2 – якорь ЛЭД; 3 – соединительная штанга; 4 – датчик динамометра;
 5 – табло динамометра; 6 – устройство крепления датчика динамометра

Fig. 10. Test bench for investigating the traction characteristics of the LEM:
 1 – LEM; 2 – LEM armature; 3 – connecting rod; 4 – dynamometer sensor;
 5 – dynamometer display; 6 – dynamometer sensor mounting device

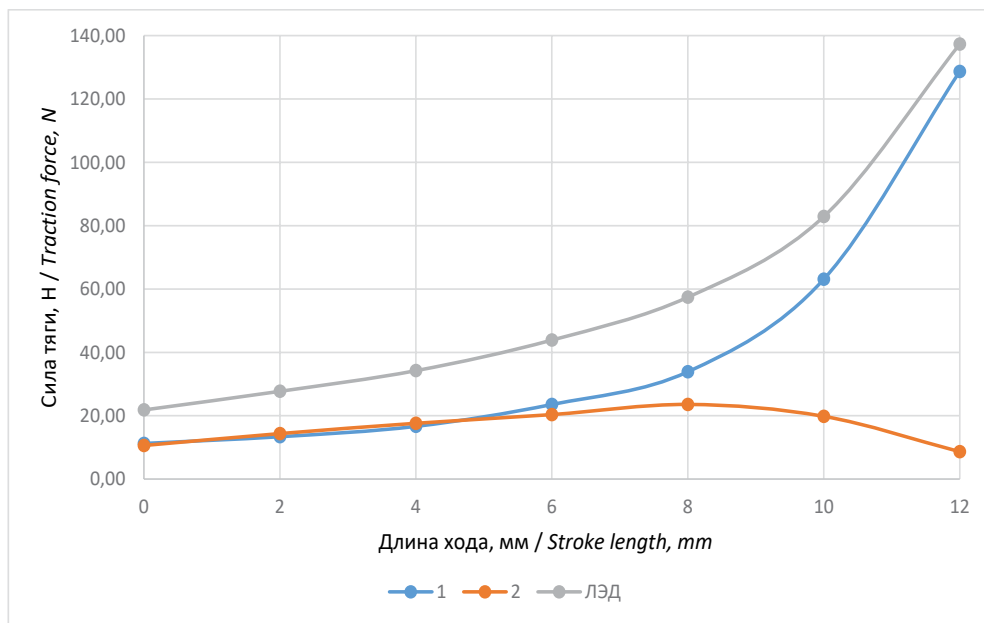


Рис. 11. Экспериментальные значения силы тяги якоря в функции длины хода якоря линейного электродвигателя

Fig. 11. Experimental values of the armature traction force as a function of the LEM armature stroke length

Анализируя графические зависимости при раздельной работе двух намагничивающих катушек ЛЭД, можно сделать вывод о том, что экспериментальные данные силы тяги якоря пусковой катушки в момент пуска меньше расчетных данных на 40% (рис. 12). Это отличие связано с неточностью при изготовлении немагнитной вставки. Для первой намагничивающей катушки отличие теоретических и практических результатов составляет не более 5% (рис. 13).

Полученный расчетным путем график суммарной силы тяги при одновременной работе двух намагничивающих катушек практически совпадает с экспериментальной кривой (рис. 14).

Для устойчивого процесса перерезания веток деревьев необходимо, чтобы усилие, развиваемое

на якоре электродвигателя, было больше сопротивления древесины (рис. 15).

Сопоставляя полученные данные при резании ветки диаметром 6 мм и силы, создаваемой линейным электродвигателем, можно сказать, что при пуске второй катушки создается сила, достаточная для перемещения всех элементов рабочей машины на холостом ходу. Достигая длины хода 8 мм, сила резко снижается (рис. 12) по причине наступления магнитного равновесия, созданного второй катушкой, и при этом увеличивается сила тяги первой катушки. Сила тяги, создаваемая первой катушкой при дальнейшем движении якоря, начинает увеличиваться, достигая значения 23 Н при длине хода 6 мм (рис. 13). Суммарная сила тяги (рис. 15), создаваемая двумя катушками

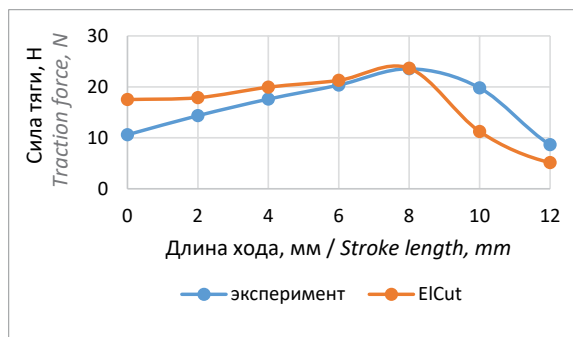


Рис. 12. Сила тяги якоря второй (пусковой) катушки в зависимости от длины хода якоря линейного электродвигателя

Fig. 12. Traction force of the second (starting) coil armature as a function of the LEM armature stroke length

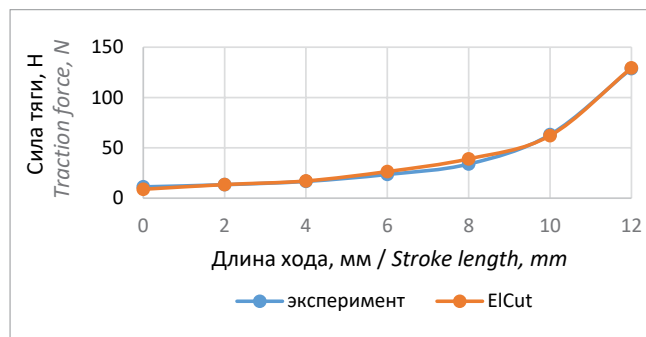


Рис. 13. Сила тяги якоря первой катушки в зависимости от длины хода якоря линейного электродвигателя

Fig. 13. Traction force of the first coil armature as a function of the LEM armature stroke length

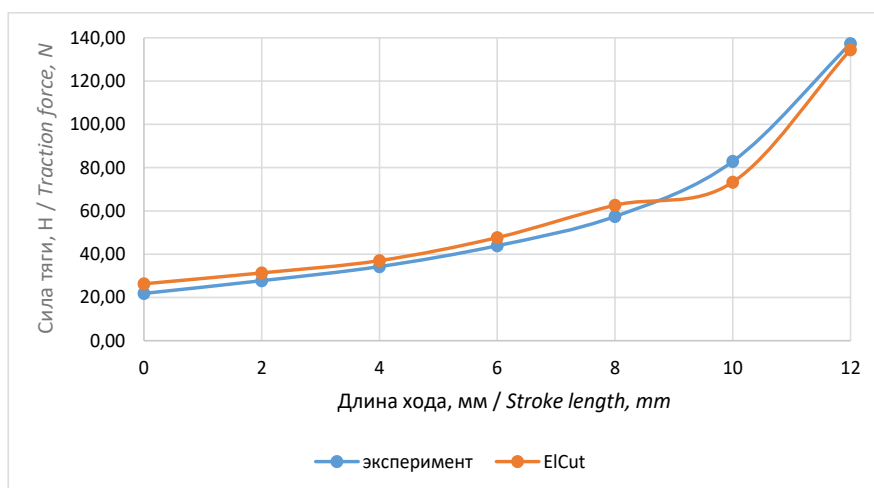


Рис. 14. Суммарная сила тяги якоря линейного электродвигателя в зависимости от длины хода

Fig. 14. Total armature traction force of the linear electric motor as a function of the stroke length

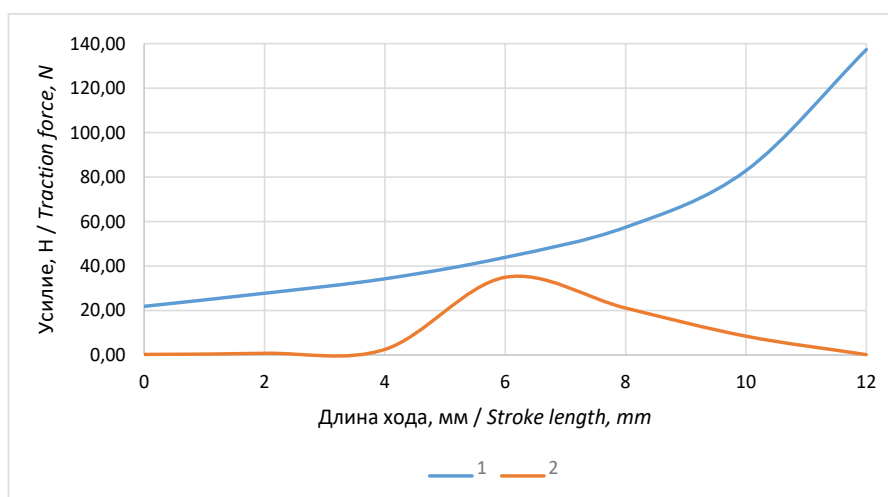


Рис. 15. Зависимость изменения силы от длины хода:

1 – сила тяги якоря ЛЭД; 2 – сила, затрачиваемая рабочей машиной при резании ветки диаметром 6 мм

Fig. 15. Force variation as a function of stroke length:

1 – pulling force of the LEM armature; 2 – force required by the machine when cutting of a 6 mm diameter branch

в момент пуска, равна 21 Н, что достаточно для начала перемещения системы «Якорь (ЛЭД) – рабочая машина (лезвие)» на холостом ходу. При достижении лезвием секатора ветки диаметром 6 мм длина хода якоря равна 4 мм. В этот момент начинается процесс резания с достижением максимума усилий в 35 Н при длине хода якоря 6 мм с последующим его снижением. При дальнейшем перемещении лезвия по древесине происходит снижение силы резания до полного перерезания ветки. В это же время происходит увеличение усилия, создаваемого на якоре ЛЭД, до 137 Н, что необходимо для получения более качественного среза древесины без его замятия.

Выводы

1. Компьютерное моделирование ЛЭД показало, что совместное использование двух

намагничивающих катушек (пусковой и рабочей) позволяет создать достаточное начальное усилие 28 Н с последующим нарастанием силы тяги на якоре до 132 Н.

2. Экспериментальные исследования силы тяги ЛЭД показали, что для конструкции магнитопровода якоря с немагнитной вставкой длиной 15 мм в момент пуска развиваемое усилие равно 21 Н, а в конце рабочего хода оно достигает максимальной величины 137 Н.

3. Экспериментальное резание ветки диаметром 6 мм показало устойчивую работу привода с достижением максимума силы резания 35 Н при длине хода якоря 6 мм и последующее его снижение. При этом сила тяги якоря продолжает нарастать до 137 Н, обеспечивая качественный срез.

Список источников

1. Тавасиев Р.М. Обоснование энергетического средства для крестьянских (фермерских) хозяйств // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 11. С. 42-43. EDN: ICCUGV
2. Кудзаев А.Б., Тавасиев Р.М. Обоснование конструктивно-технологической схемы обрезчика ветвей // Известия Горского государственного аграрного университета. 2009. Т. 46, № 2. С. 82-86. EDN: MVJLDD
3. Тавасиев Р.М., Кудзаев А.Б., Туриев О.И. Математическая модель гидравлической цепи обрезчика ветвей // Аграрная наука. 2008. № 9. С. 13. EDN: JUYNPD
4. Апхудов Т.М., Шекихачев Ю.А. Разработка и исследование садовой пилы с электрическим приводом // АгроЭкоИнфо. 2020. № 1 (39). С. 15. EDN: FPVRHT
5. Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В., Моисеев А.П. Оценка режимов работы электромагнитных ударных машин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 10 (192). С. 137-142. EDN: AJVDGG
6. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. et al. Linear stepping electromagnetic engine for driving conveyors. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference «Information Technologies in Business and Industry»*. 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019;1333(5):052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
7. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A. et al. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018;327(5):052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>
8. Kargin V., Usanov K., Moiseev A. et al. Simulation of energy conversion processes in linear electromagnetic motors with through axial channel. *Strojnický Casopis*. 2023;73(2):71-82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022> EDN: XKXBIF
9. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A. et al. Simulation of the magnetic system of a linear motor for a delimeter. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences. 2021;37:00097. EDN: CVWEPE
10. 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>
11. Hsieha Min-Fu, Tungb Chin-Juei, Yao Wu-Sung et al. Servo design of a vertical axis drive using dual linear motors for high speed electric discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007;47:546-554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.05.011>
12. 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>
13. Линейный электродвигатель: Патент № 2835904 С1 Российская Федерация, МПК H02K 33/02 / Г.В. Никитенко, С.Н. Антонов, И.В. Каланчук; заявл. 02.08.2024; Опубл. 05.03.2025. EDN: JOWISQ

References

1. Tavasiev R.M. Justification of an energy means for farm households. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2007;11:42-43. (In Russ.)
2. Kudzaev A.B., Tavasiev R.M. Rationale for a structural design of a branch cutter. *Proceedings of Gorský State Agrarian University*. 2009;46(2):82-86. (In Russ.)
3. Tavasiev R.M., Kudzaev A.B., Turiev O.I. Mathematical model of hydraulic chain of branch cutter. *Agrarian science*. 2008;9:13. (In Russ.)
4. Aphudov T.M., Shekikhachev Yu.A. Development and research of an electrically driven garden saw. *AgroEcoInfo*. 2020;1(39):15. (In Russ.)
5. Usanov K.M., Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. The analysis of operating modes of electromagnetic impact machines. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;10(192):137-142. (In Russ.)
6. Kargin V.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. et al. Linear stepping electromagnetic engine for driving conveyors. *Journal of Physics: Conference Series: International Conference «Information Technologies in Business and Industry» – 4 – Mechatronics, Robotics and Electrical Drives*. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019;1333(5):052011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1333/5/052011>
7. Usanov K.M., Volgin A.V., Kargin V.A. et al. Electric converters of electromagnetic strike machine with battery power. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018;327(5):052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052031>
8. Kargin V., Usanov K., Moiseev A. et al. Simulation of energy conversion processes in linear electromagnetic motors with through axial channel. *Strojnický Casopis*. 2023;73(2):71-82. <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0022>
9. Antonov S., Nikitenko G., Adoshev A. et al. Simulation of the magnetic system of a linear motor for a delimeter. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources. Kazan: EDP Sciences. 2021;37:00097.
10. 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>
11. Hsieha Min-Fu, Tungb Chin-Juei, Yao Wu-Sung, et al. Servo design of a vertical axis drive using dual linear motors for high speed electric discharge machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2007;47:546-554. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.05.011>
12. 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>
13. Nikitenko G.V., Antonov S.N., Kalanchuk I.V. Linear motor: Patent, No. 2835904 C1 Russian Federation, IPC H02K 33/02.: applied on 02.08.2024; published on 05.03.2025. (In Russ.)

Информация об авторах

- ¹ **Никитенко Геннадий Владимирович**, д-р техн. наук, профессор; nikitenko_gv@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, SPIN-код: 9068-0520, Scopus author ID: 57202640003, Researcher ID: N-1769-2014, AuthorID: 155686
- ² **Антонов Сергей Николаевич**, канд. техн. наук, доцент; antonov_serg@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, SPIN-код: 2575-3686, Scopus author ID: 57021226800, Researcher ID: V-1081-2017
- ³ **Мастепаненко Максим Алексеевич**, канд. техн. наук, доцент, mma_26@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X>, SPIN-код: 1676-2740; Scopus AuthorID: 56768146500, AuthorID: 731041
- ⁴ **Каланчук Игорь Владимирович**, ассистент кафедры электрооборудования и энергообеспечения АПК; igor.kalanchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>, SPIN-код: 5504-6767, AuthorID: 1181858.
- ^{1,2,3,4} Ставропольский государственный аграрный университет; 355035, Российская Федерация, Ставропольский край, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12

Вклад авторов

Г.В. Никитенко – концептуализация;
С.Н. Антонов – методология, подготовка начального варианта статьи, описание результатов;
М.А. Мастепаненко – описание результатов и формирование выводов;
И.В. Каланчук – представление результатов, подготовка графических материалов, проведение экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 06.11.2025, после рецензирования и доработки 23.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

Author Information

- Gennady V. Nikitenko**¹, DSc (Eng), Professor, nikitenko_gv@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0003-2797-0755>, SPIN code: 9068-0520, Scopus Author ID: 57202640003, Researcher ID: N-1769-2014, AuthorID: 155686
- Sergey N. Antonov**², CSc (Eng), Associate Professor, antonov_serg@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8931-269X>, SPIN code: 2575-3686, Scopus Author ID: 57021226800, Researcher ID: V-1081-2017
- Maksim A. Masterpanenko**³, CSc (Eng), Associate Professor, mma_26@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8684-118X>, SPIN code: 1676-2740, Scopus Author ID: 56768146500, AuthorID: 731041
- Igor V. Kalanchuk**⁴, Assistant of the Department of Electrical Equipment and Energy Supply for the Agro-Industrial Sector, igor.kalanchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-8956-0626>, SPIN code: 5504-6767, AuthorID: 1181858.
- ^{1,2,3,4} Stavropol State Agrarian University; 12, Zootekhnichesky Lane, Stavropol, 355035, Russian Federation

Author Contribution

G.V. Nikitenko – conceptualization;
S.N. Antonov – research methodology, writing – original draft; validation;
M.A. Masterpanenko – results and conclusions;
I.V. Kalanchuk – visualization; investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 06.11.2025; Revised 23.03.2026; Accepted 26.03.2026