

Научная статья  
 УДК 621.313.333.821  
 doi:10.35694/YARCX.2023.64.4.014

## ТЯГОВЫЙ МОДУЛЬ С ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО МОНОРЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА ТЕПЛИЧНЫХ ХОЗЯЙСТВ

**Алексей Павлович Епифанов<sup>1</sup>, Дмитрий Богданович Криль<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>emeo.kaf@yandex.ru

<sup>2</sup>bruder\_dan@mail.ru

**Реферат.** Производство продуктов питания в тепличных хозяйствах, расположенных в северных широтах Российской Федерации, сталкивается с большими финансовыми затратами на единицу произведённой продукции. В основном это обусловлено высокой долей ручного труда, использованием примитивного или дорогостоящего оборудования для транспортировки различных грузов внутри теплицы. Чтобы снизить затраты, связанные с транспортировкой, как энергетические, так и эксплуатационные, в статье представлена возможность модернизации внутреннего транспорта тепличных хозяйств для центрального прохода посредством внедрения монорельсовой транспортной системы с электроприводом на базе линейного асинхронного двигателя. Предлагаемый тяговый модуль подвесного типа обладает простой конструкцией (в том числе и кинематической схемой), не требует особых условий при эксплуатации и больших экономических затрат на неё, надёжен ввиду простоты исполнения. Исследования на базе полномасштабного лабораторного макета такой транспортной системы подтвердили её функционирование при низких скоростях движения, а проведённые расчётно-теоретические исследования показывают возможность оптимизации энергетических показателей ЛАД, что позволит снизить потребление электроэнергии при прочих равных условиях.

*Ключевые слова:* линейный асинхронный двигатель, внутренний транспорт, монорельсовая транспортная система, теплицы

## TRACTION MODULE WITH LINEAR INDUCTION ELECTRIC DRIVE FOR INTERNAL MONORAIL TRANSPORT OF GREENHOUSE FACILITIES

**Aleksey P. Epifanov<sup>1</sup>, Dmitriy B. Kril<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>Saint-Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup>emeo.kaf@yandex.ru

<sup>2</sup>bruder\_dan@mail.ru

**Abstract.** Food production in greenhouse facilities located in the northern latitudes of the Russian Federation faces large financial costs per unit of production. This is mainly due to the high share of manual labor and the use of primitive or expensive equipment for transporting various goods inside the greenhouse. To reduce the costs associated with transportation, both energy and operating, the article presents the possibility of modernizing the internal transport of greenhouse facilities for the central passage by introducing a monorail transport system with an electric drive based on a linear induction motor. The proposed suspension-type traction module has a simple design (including a kinematic scheme), does not require special operation conditions and large economic costs for it, and is reliable due to the simplicity of its design. Studies based on a full-scale laboratory model of such a transport system have confirmed its functioning at low speeds, and the theoretical computation studies carried out show the possibility of optimizing the energy indicators of LIM, which will reduce electricity consumption, all other things being equal.

*Keywords:* linear induction motor, internal transport, monorail transport system, greenhouses

Тяговый модуль с линейным асинхронным электроприводом для внутреннего монорельсового транспорта тепличных хозяйств

**Введение.** Основная задача сельского хозяйства заключается в производстве необходимого количества экологически чистых и экономически доступных продуктов для жителей страны и обеспечение продовольственной безопасности. В Российской Федерации имеются все условия и ресурсы для выполнения этой задачи.

В тепличных хозяйствах занимаются выращиванием всесезонной овощной продукции и рассады [1]. В России, подавляющая часть территории которой расположена в северных широтах, начальная стоимость тепличной продукции будет выше по сравнению с аналогичной из южных районов или стран. Поэтому для повышения рентабельности производства необходимо грамотно спроектировать теплицу, подобрать необходимое оборудование и организовать трудовой процесс, который позволит снизить трудоёмкость и энергоёмкость производства продукции, а также минимизирует капитальные и эксплуатационные затраты.

Подавляющая часть труда в тепличном хозяйстве складывается из 2-х основных составляющих:

- работа с растениями, посадочным материалом, сбор урожая;
- транспортировка различных грузов.

По сей день в обеих составляющих велика доля ручного труда. Поскольку повысить эффективность первой составляющей довольно сложно, т.к. любая работа с растениями предполагает выполнение многих операций, достаточно сложных для автоматизации или роботизации, то необходимо снизить энергоёмкость второй составляющей – трудовые затраты на транспортировку.

Основная работа в теплице проходит в междурядьях и центральном проходе (рис. 1). В на-

стоящее время для работы в междурядьях основными транспортными средствами в большинстве хозяйств являются: 1) ручные тележки (рис. 1а); 2) самоходные тележки (рис. 1в); 3) самоходные тележки с гидравлическим подъёмником (рис. 1г). Для работы в центральном проходе применяют: 1) ручные тележки (рис. 1б); 2) мини-тракторы (рис. 2а); 3) аккумуляторные электрокары (рис. 2б).

Ранее в работах [2; 3] были подробно рассмотрены преимущества и недостатки данных транспортных систем, предложена и обоснована возможность модернизации внутреннего транспорта тепличных хозяйств на монорельсовые системы с линейным асинхронным электроприводом. В данной статье будет предложен проект тягового модуля для монорельсовой системы внутреннего тепличного транспорта для центрального прохода.

**Методика.** Сначала необходимо определить расположение путевого монорельса (двухавра). Возможны два варианта: 1) напольное расположение; 2) подвесное расположение. Второй вариант более предпочтителен по следующим причинам: а) центральный проход остаётся свободным; б) токоведущие шины также будут расположены сверху – безопасность персонала; в) возможность выполнить транспортный модуль более компактным; г) меньшее влияние загрязняющих воздействий на путевую структуру. При этом следует учитывать, что двухавр будет являться несущей балкой, а, следовательно, нужно провести механический расчёт на изгиб и грамотно выбрать № двухавра.

Сам линейный асинхронный двигатель (ЛАД) может иметь различное исполнение (рис. 3). Двухсторонний индуктор имеет преимущество по тягово-энергетическим показателям в сравнении



Фото из интернета.

а) ручная тележка для работы в междурядьях; б) ручная тележка для работы в центральном проходе; в) самоходная тележка; г) самоходная тележка с гидроподъёмником.

Рисунок 1 – Внутренний транспорт теплиц для работы в междурядьях



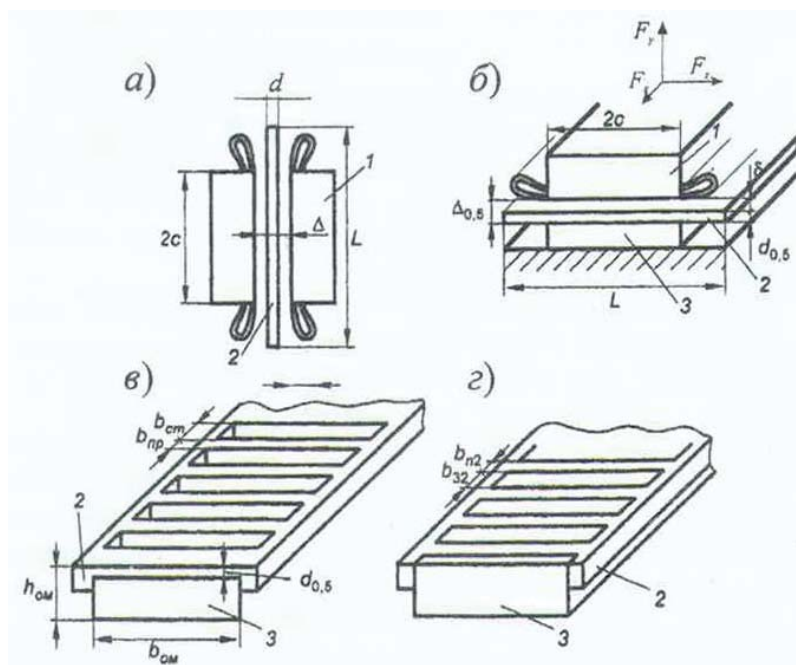
Фото из интернета.  
а) минитрактор; б) аккумуляторный электрокар.

Рисунок 2 – Внутренний транспорт теплиц для работы в центральном проходе

с односторонним, однако последний более эргономично и компактно встраивается в путевую структуру. В нашем случае в роли подвижной части – «бегуна» – рационально использовать индуктор, а в роли статора – вторичный элемент (ВЭ). ВЭ представляет собой реактивную шину (РШ), выполненную из меди или алюминия, сплошную либо шлицованную (рис. 4). РШ необходимо прикрепить к нижней полке двутавра, а под ним расположить индуктор, зафиксированный на передвижной каретке, которая может перемещаться вдоль монорельса. Количество кареток определяется массой

перевозимого груза и габаритами грузовой ёмкости. Нижняя полка двутавра будет являться массивным обратным магнитопроводом, по которому замыкается магнитный поток индуктора. Такое конструктивное исполнение ЛАД позволяет разгрузить поддерживающие ролики, на которые опирается каретка, поскольку при протекании тока в обмотке индуктора между ним и нижней полкой возникнет сила электромагнитного притяжения.

Обмотка индуктора трёхфазная, питание к ней подводится от преобразователя частоты (ПЧ) (скорости перемещения  $v \leq 3$  м/с). ПЧ распо-

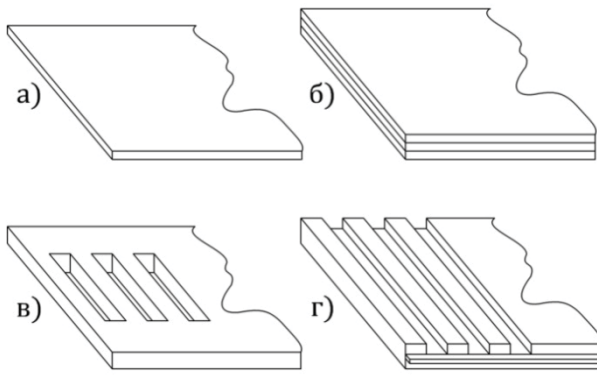


а) с двухсторонним индуктором; б) с односторонним индуктором и массивным обратным магнитопроводом; в) шлицованная реактивная шина; г) плоская «беличья клетка».

Рисунок 3 – Варианты исполнения линейных асинхронных двигателей

**Тяговый модуль с линейным асинхронным электроприводом для внутреннего монорельсового транспорта тепличных хозяйств**





а) изотропная проводящая шина; б) составной вторичный элемент из двух изотропных проводящих пластин и ферромагнитной полосы между ними; в) шлицованная шина; г) шлицованная шина, уложенная в пазы обратного магнитопровода.

Рисунок 4 – Способы исполнения вторичного элемента (вторичной структуры)

гается рядом с индуктором на каретке по условиям электромагнитной совместимости [4]. Наличие ПЧ позволяет не только получить низкие скорости перемещения при лучших тягово-энергетических показателях, по сравнению с иными способами решения этой задачи [5; 6], но и даёт возможность управления режимами пуска, торможения, установившегося движения, автоматизации, позиционирования.

К передвижной каретке (кареткам) крепится ёмкость (бункер), в которой будут перевозиться необходимые грузы. Совокупность ёмкости и кареток с линейным асинхронным электроприводом (ЛАЭП) представляет собой транспортный модуль.

В лаборатории кафедры ЭМЭП ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» была разработана и реализована лабораторная модель полномасштабного моно-рельсового транспортного модуля, питающегося от ПЧ (рис. 5). Экспериментальные исследования данной модели подтвердили работоспособность системы при низких скоростях движения и частотах, а также возможность управления режимами работы, регулирования скорости, ускорения (замедления) и тягового усилия усилением (ослаблением) магнитного потока по скалярному закону  $\frac{U_1}{f_1} = const$  [7].

Для определения конструктивных параметров одностороннего ЛАД с массивным обратным магнитопроводом необходимо рассчитать его интегральные характеристики. Как показано в [8], из существующих на сегодняшний день методик расчёта самой точной и объективной является трёхмерная методика, базирующаяся на анализе электромагнитного поля в воздушном зазоре и вторичной структуре (ВЭ). Также она является универсальной для исследования ЛАД различных модификаций и конструктивных исполнений. Расчётный макет данной методики представлен на рис. 6.

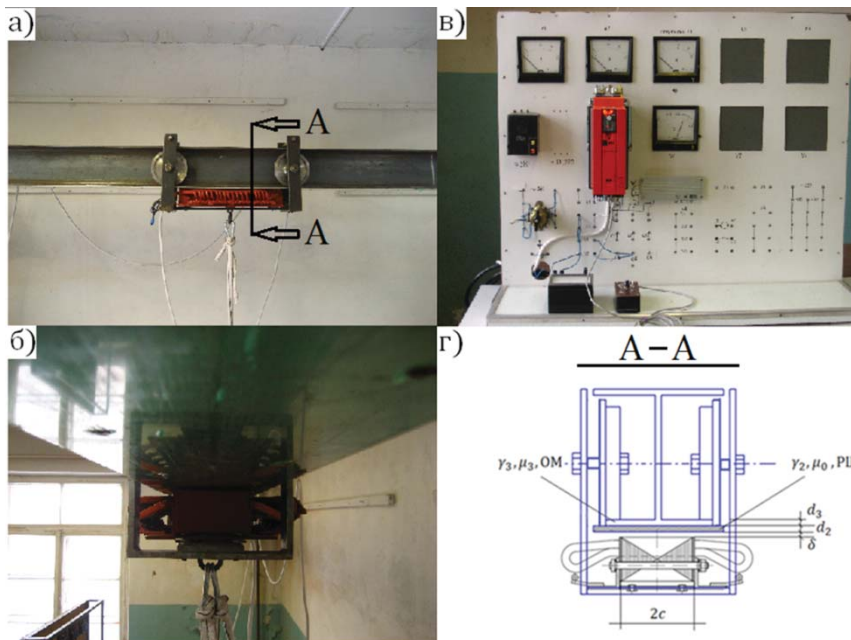
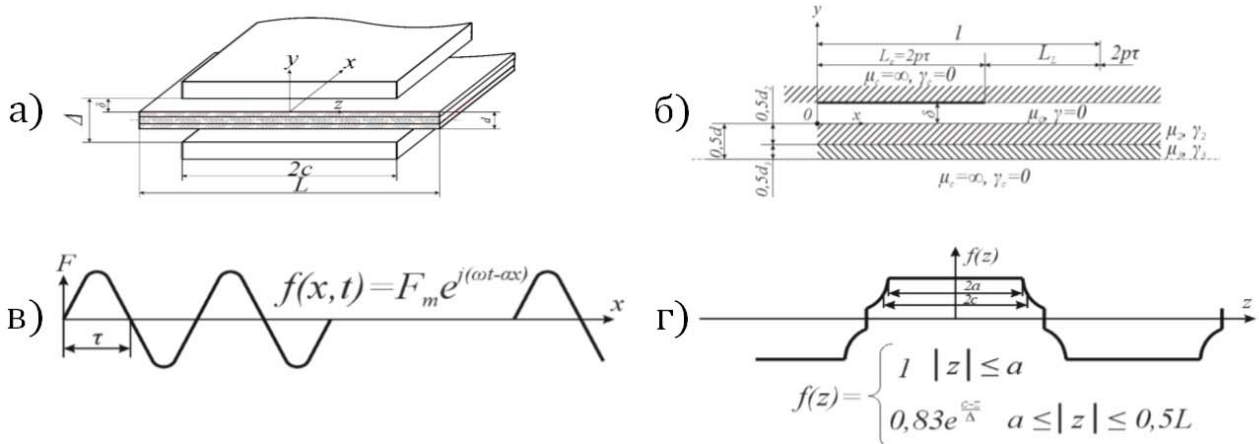


Фото авторов.

а) фронтальный вид установки; б) преобразователь частоты и измерительная аппаратура; в) профильный вид установки; г) профильный разрез по А-А.

Рисунок 5 – Внешний вид полномасштабной лабораторной модели ЛАД



а) геометрические размеры исследуемого ЛАД; б) основные допущения и главные размеры; в) закон изменения намагничивающих сил; г) учёт боковых магнитных полей рассеяния.

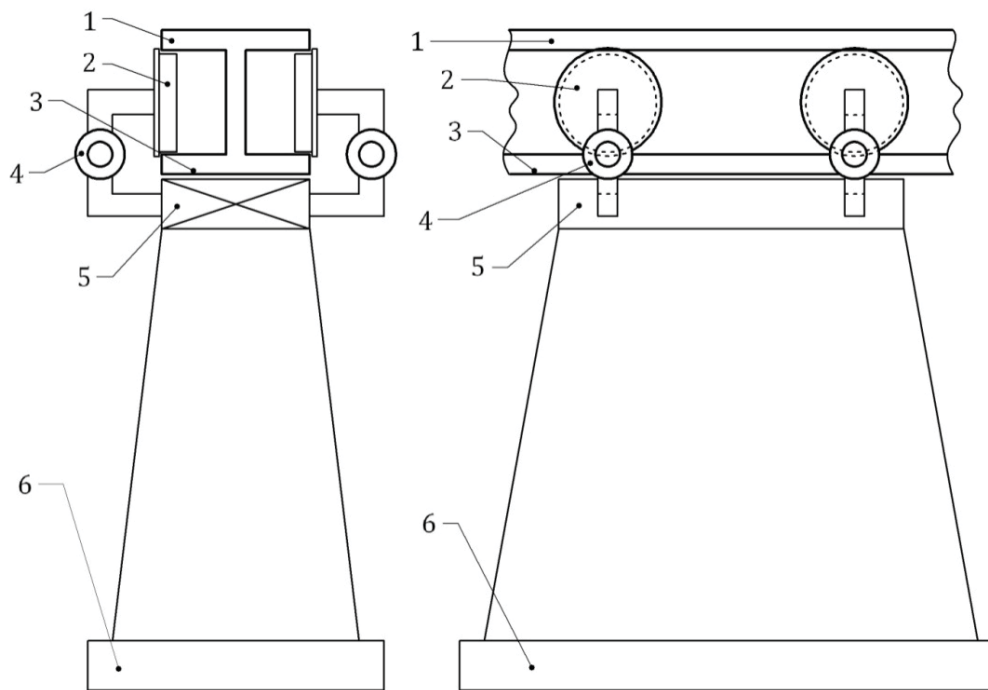
Рисунок 6 – Расчётный макет трёхмерной методики для определения интегральных характеристик ЛАД

В ней решение дифференциальных уравнений для электромагнитного поля (уравнений Д. К. Максвелла), составленных для векторного магнитного потенциала  $A$ , а также выражения локальных (магнитная индукция и намагничивающие силы) и интегральных (тяговое усилие, магнитный поток) характеристик получены в аналитической форме:

$$\text{rot } \vec{A} = \vec{B}; \vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}; \text{div } \vec{A} = 0. \quad (1)$$

$$F(x, y, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} C_{n,v} \cdot \exp j \left( \frac{\pi n z}{L} + \frac{2 \pi v x}{l} \right) = \frac{8 \sqrt{2} \cdot A \cdot k_{обм1}}{\pi l \alpha^2} \sum_n \sum_v Y_n \cdot \cos \frac{\pi n z}{l} \cdot \frac{1}{v} \cdot k_v \cdot \exp j \left( \omega t + \frac{2 \pi v x}{l} \right). \quad (2)$$

$$B_{\delta y} = \text{rot}_y \vec{A}_{\delta} = \frac{\partial \vec{A}_{\delta x}}{\partial z} - \frac{\partial \vec{A}_{\delta z}}{\partial x} = -j \frac{1}{2\pi} \sum_n \sum_v C_1 \cdot y_n \cdot \cos \left( \frac{\pi n z}{L} \right).$$



1 – двутавровая балка (монорельс); 2 – поддерживающие ролики; 3 – реактивная шина; 4 – регулировочный механизм для установки размера воздушного зазора; 5 – индуктор; 6 – грузовая платформа (ёмкость, бункер).

Рисунок 7 – Чертёж тягового модуля для монорельсового транспорта центрального прохода в теплицах

**Тяговый модуль с линейным асинхронным электроприводом для внутреннего монорельсового транспорта тепличных хозяйств**

$$\cdot \lambda(ch\lambda y + C_2 \cdot sh\lambda y) \cdot \exp j \left( \omega t + \frac{2\pi vx}{l} \right). \quad (3)$$

$$S_{ЭМ} = J \frac{\omega_1 \cdot C_0^2 \cdot l^3}{16\pi^2 \mu_0} \sum_n \sum_v Y_n^2 |K_v| \frac{ch\xi_1 \delta + b_1 sh\xi_1 \delta}{sh\xi_1 \delta + b_1 ch\xi_1 \delta}. \quad (4)$$

$$P_{ЭМ} = Re S_{ЭМ}. \quad (5)$$

$$\eta_{ЭМ} = \frac{P_2}{P_{ЭМ}} = \frac{F_x \cdot V}{P_{ЭМ}}. \quad (6)$$

$$\cos \varphi_{ЭМ} = \frac{P_{ЭМ}}{S_{ЭМ}}. \quad (7)$$

Все обозначения на расчётном макете соответствуют реальным конструктивным параметрам и физическим свойствам материалов. Для данной расчётной модели имеется программа для ЭВМ,

которая реализует все расчётные возможности этой методики.

Внешний вид предлагаемого тягового модуля представлен на рисунке 7.

**Вывод.** Предложен проект тягового модуля для монорельсовой системы внутреннего транспорта тепличных хозяйств с линейным асинхронным электроприводом, который при грамотном проектировании и рациональном определении и выборе конструктивных параметров, не уступает классическим системам внутреннего транспорта по энергетическим показателям, а по эксплуатационным и ремонтным расходам превосходит последние.

#### Список источников

1. Теплицы и оранжереи. URL: <http://flowerlib.ru/books/item/f00/s00/z0000000/st025.shtml> (дата обращения: 30.09.2023).
2. Епифанов А. П., Криль Д. Б. Анализ внутренних транспортных систем животноводческих комплексов и тепличных хозяйств и возможность их модернизации // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 1 (30). С. 33–43. ISSN 2410-5031.
3. Епифанов А. П., Малайчук Л. М., Самсонов Ю. А. Монорельсовый внутренний транспорт животноводческих комплексов и тепличных хозяйств с линейным асинхронным электроприводом // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2010. № 18. С. 235–242. ISSN 2078-1318.
4. Практика приводной техники – Электромагнитная совместимость (ЭМС) в приводной технике. SEW EURODRIVE. СПб., 2002. 96 с.
5. Аипов Р. С. Линейные электрические машины и приводы на их основе. Уфа : Изд-во БГАУ, 2003. 200 с. ISBN 5-7456-0061-6.
6. Туктаров М. Ф. Электропривод решетного стана зерноочистительной машины на базе плоского линейного асинхронного электродвигателя : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве / БГАУ. Уфа, 2013. 151 с.
7. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 2. М.-Л. : «Энергия», 1965. 704 с.
8. Епифанов А. П. Научные основы создания тяговых линейных асинхронных двигателей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты / СПбГТУ. СПб, 1992. 272 с.

#### References

1. Teplicy i oranzherei. URL: <http://flowerlib.ru/books/item/f00/s00/z0000000/st025.shtml> (data obrashcheniya: 30.09.2023).
2. Epifanov A. P., Kril' D. B. Analiz vnutrennih transportnyh sistem zhivotnovodcheskih kompleksov i teplichnyh hozyajstv i vozmozhnost' ih modernizacii // Agrotekhnika i energoobespechenie. 2021. № 1 (30). S. 33–43. ISSN 2410-5031.
3. Epifanov A. P., Malajchuk L. M., Samsonov Yu. A. Monorel'sovyy vnutrennij transport zhivotnovodcheskih kompleksov i teplichnyh hozyajstv s linejnym asinhronnym elektroprivodom // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2010. № 18. S. 235–242. ISSN 2078-1318.
4. Praktika privodnoj tekhniki – Elektromagnitnaya sovmestimost' (EMS) v privodnoj tekhnike. SEW EURODRIVE. SPb., 2002. 96 s.
5. Aipov R. S. Linejnye elektricheskie mashiny i privody na ih osnove. Ufa : Izd-vo BGAU, 2003. 200 s. ISBN 5-7456-0061-6.
6. Tuktarov M. F. Elektroprivod reshetnogo stana zernoochistitel'noj mashiny na baze ploskogo linejnogo asinhronnogo elektrodvigatelya : dis. ...kand. tekhn. nauk : 05.20.02 – Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v sel'skom hozyajstve / BGAU. Ufa, 2013. 151 s.
7. Kostenko M. P., Piotrovskij L. M. Elektricheskie mashiny. CH. 2. M.-L. : «Energija», 1965. 704 s.
8. Epifanov A. P. Nauchnye osnovy sozdaniya tyagovyh linejnyh asinhronnyh dvigatelej : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.09.01 – Elektromekhanika i elektricheskie apparaty / SPbGTU. SPb, 1992. 272 s.

*Сведения об авторах*

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

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

*Information about the authors*

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

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

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

