Оригинальная статья

УДК 621.313.333.2 © В.А. Каргин[1,2], Е.А. Четвериков✉[3], С.А. Мокрушин[1], Е.А. Назойкин[1], 2026

[1] ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», 125080, г. Москва, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», 111024, г. Москва, Россия
[3] ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, Россия
✉ e-mail: e.chetverikov@rgau-msha.ru

Original Paper

UDC 621.313.333.2 © V.A. Kargin[1,2], E.A. Chetverikov✉[3], S.A. Mokrushin[1], E.A. Nazoikin[1], 2026

[1] Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, 125080, Russian Federation
[2] Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, 111024, Russian Federation
[3] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 123434, Russian Federation
✉ e-mail: e.chetverikov@rgau-msha.ru

Оценка эффективности систем охлаждения линейных электромагнитных двигателей импульсных машин

Assessing the efficiency of cooling systems for linear electromagnetic motors in pulsed machines

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-9-90-93

КАРГИН В.А.
Доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами», ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», 125080, г. Москва, Россия, профессор кафедры «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации» ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», 111024, г. Москва, Россия

ЧЕТВЕРИКОВ Е.А.
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизации и роботизации технологических процессов им. И.Ф. Бородина» ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, Россия, e-mail: e.chetverikov@rgau-msha.ru

МОКРУШИН С.А.
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», 125080, г. Москва, Россия

Рабочие процессы линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) в приводе импульсных машин сопровождаются интенсивным тепловыделением в активных частях, что накладывает жесткие ограничения на продолжительность их непрерывного включения и снижает общие эксплуатационные показатели оборудования. Искусственная интенсификация процесса охлаждения является важным инструментом для преодоления данных ограничений. В данной статье представлен комплексный сравнительный анализ эффективности различных способов охлаждения ЛЭМД. Введена и обоснована система безразмерных показателей для оценки эффективности теплоотвода в машинах с ЛЭМД. В ходе исследования проведено сопоставление систем с естественной конвекцией, развитым оребрением, самовентиляцией, использующей движение якоря, и принудительным обдувом. Основным научным результатом работы является разработка методики и диаграмм для оперативного выбора рационального типа системы охлаждения в зависимости от циклограммы работы и плотности тока в обмотках.

Ключевые слова: *электромагнитный привод, линейный электромагнитный двигатель, система охлаждения, способы интенсификации теплоотдачи, искусственное охлаждение, естественное охлаждение.*

Для цитирования: Оценка эффективности систем охлаждения линейных электромагнитных двигателей импульсных машин / В.А. Каргин, Е.А. Четвериков, С.А. Мокрушин и др. // Уголь. 2026;(9):90-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-9-90-93.

Annotation
The working processes of linear electromagnetic motors (LEMM) in the drive of pulse machines are accompanied by intensive heat generation

НАЗОЙКИН Е.А.
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами»
ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)»,
125080, г. Москва, Россия

in the active parts, which imposes strict limitations on the duration of their continuous operation and reduces the overall performance of the equipment. Artificial intensification of the cooling process is an important tool for overcoming these limitations. This article presents a comprehensive comparative analysis of the effectiveness of various cooling methods for LEMM. A system of dimensionless indicators has been introduced and justified for evaluating the effectiveness of heat dissipation in machines with LEMM. In the course of the study, a comparison was made of systems with natural convection, developed finning, self-ventilation using the movement of the armature, and forced blowing. The main scientific result of the work is the development of a methodology and diagrams for the prompt selection of a rational type of cooling system, depending on the work cycle and the current density in the windings.

Keywords
ELectromagnetic drive, linear electromagnetic motor, cooling system, methods of heat transfer intensification, artificial cooling, natural cooling.
For citation
Kargin V.A., Chetverikov E.A., Mokrushin S.A., Nazoikin E.A. Assessing the efficiency of cooling systems for linear electromagnetic motors in pulsed machines. *Ugol'*. 2026;(9):90-93. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-9-90-93.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития горнодобывающей промышленности и строительной отрасли требуют внедрения высокопроизводительных машин, работающих на принципах импульсного воздействия [1, 2, 3, 4]. В качестве силового привода таких машин все чаще находят применение линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД), отличающиеся прямым преобразованием электрической энергии в механическую энергию удара, простотой конструкции и отсутствием сложных кинематических преобразователей [5, 6, 7, 8].

Однако форсирование режимов работы ЛЭМД, например из-за увеличения частоты и энергии ударов, неизбежно ведет к росту плотности тока в обмотках и, как следствие, к интенсивному нагреву [9, 10]. Перегрев изоляции является основным фактором, ограничивающим ресурс двигателя. В условиях ограниченного пространства и специфики возвратно-поступательного движения традиционные методы охлаждения вращающихся машин не всегда применимы. Таким образом, обоснование и выбор эффективной системы охлаждения ЛЭМД являются актуальной научно-технической задачей. Целью настоящей работы является сравнительная оценка различных методов интенсификации теплоотдачи и выработка критериев их рационального применения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тепловое состояние ЛЭМД определяется балансом между генерируемой тепловой мощностью потерь и способностью системы теплоотвода рассеивать эту энергию в окружающую среду [11]. В общем случае способы охлаждения можно разделить на две большие группы: естественное охлаждение и искусственная интенсификация [5, 7, 8].

Естественное охлаждение ЛЭМД с гладким или оребренным корпусом характеризуется низкими коэффициентами теплоотдачи ($\alpha = 8\text{-}12$ Вт/(м^2×К)) и при увеличении мощности двигателя данного

механизма становится недостаточным. Более эффективными являются методы активного охлаждения, например самовентиляция, когда якорь ЛЭМД прокачивает воздух через внутренние каналы статора, принудительное охлаждение с использованием независимых вентиляторов.

Для сопоставления различных систем, например в [12], предложена методика, базирующаяся на трех группах критериев:

– 1 группа – коэффициенты эффективности способа охлаждения;

– 2 группа – коэффициенты свойств конструкции системы охлаждения;

– 3 группа – коэффициенты экономичности охлаждения.

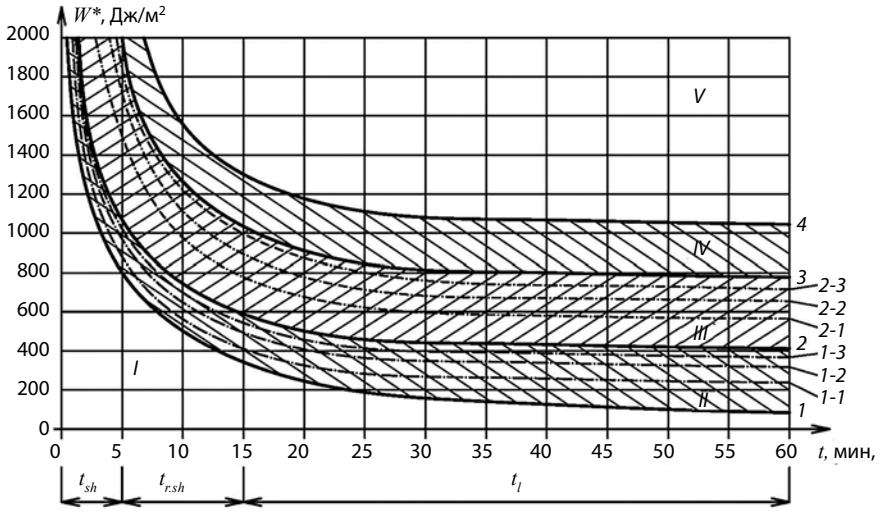

Диаграмма для выбора системы охлаждения электромагнитной машины с ЛЭМД

A flowchart for selecting a cooling system for an electromagnetic machine with a pulsed linear electromagnetic motor

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициенты интенсивности охлаждения $k_{cool.\text{int}}$ и использования охладителя $k_{cool.us}$ (первая группа):

$$k_{cool.\text{int}} = \frac{\alpha P_w}{Q_{\max}\theta},\ k_{cool.us} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, P_w – потери в обмотке ЛЭМД, θ – подогрев охладителя, $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ – минимальный и максимальный расходы охладителя.

Коэффициенты равномерности нагрева $k_{un.w}$, близости теплостока $k_{pr.w}$ и использования поверхности $k_{us.sur}$ (вторая группа):

$$k_{un.w} = \frac{\theta_{av.w}}{\theta_{\max.w}};\ k_{pr.w} = \frac{R_\alpha}{R_\alpha + R_\lambda};\ k_{us.sur} = \frac{S_{cool}}{S_w},$$

где $\theta_{av.w}$ и $\theta_{max.w}$ – средняя и максимальная температуры обмотки; R_λ и R_α – термические сопротивления при передаче теплоты теплопроводностью и конвекцией соответственно; S_{cool} и S_w – площади охлаждаемой поверхности и поверхности активных частей.

Энергетический k_{ener} и массовый k_{weig} коэффициенты экономичности (третья группа):

$$k_{ener} = \frac{P_w}{P_w + P_{cool}};\ k_{weig} = \frac{M_w}{M_w + M_{cool}},$$

где P_{cool} – потери мощности на охлаждение; M_w – масса обмотки ЛЭМД, M_{cool} – масса системы охлаждения.

Совокупность представленных коэффициентов позволяет детально охарактеризовать любой способ охлаждения ЛЭМД и оценить его эффективность при учете конструктивных и режимных параметров линейных электромагнитных двигателей для привода машин.

В заключение оценим эффективность различных способов охлаждения ЛЭМД, используя «обобщенные критерии», предложенные в [7, 12]:

– эффективность способа охлаждения
$K_1 = k_{cool.\text{int}} \cdot k_{cool.us}$;

– качество конструкции системы охлаждения
$K_2 = k_{un.w} \cdot k_{pr.w} \cdot k_{us.sur}$;

– экономичность охлаждения машины
$K_3 = k_{ener} \cdot k_{weig}$.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективным является принудительное охлаждение ЛЭМД, хотя этот способ усложняет и удорожает конструкцию. Увеличение теплоотдающей поверхности ЛЭМД представляется здесь более экономичным, но обеспечивает сравнительно невысокие показатели эффективности системы охлаждения.

Результаты исследования стационарных и нестационарных тепловых процессов в ЛЭМД представлены диаграммой *(см. рисунок)*, позволяющей оперативно осуществлять выбор рационального исполнения системы охлаждения, что упрощает проектирование конструкций ударных и безударных электромагнитных машин.

На выбор рациональной системы охлаждения влияют режим работы ЛЭМД-привода: кратковременный t_{sh}, повторно-кратковременный $t_{r.sh}$, продолжительный t_l; потребление электрической энергии (Дж) и площадь теплоотдающей поверхности ЛЭМД (м²). Кривые 1…4 на диаграмме (*см. рисунок*) делят совокупность значений на подобласти I-V, определяющие предпочтительность системы охлаждения:

– подобласть I – ЛЭМД с естественным охлаждением без увеличения теплоотдающей поверхности;

– подобласть II – ЛЭМД с естественным охлаждением с развитой теплоотдающей поверхностью – разделена кривыми 1-1…1-3, которые соответствуют различным значениям коэффициента оребрения k_F (1-1 при $k_F = 2$, 1-2 при $k_F = 4$, 1-3 при $k_F = 8$);

– подобласть III – ЛЭМД с самовентиляцией – разделена кривыми 2-1…2-3, которые соответствуют различным значениям коэффициента оребрения k_F (2-1 при $k_F = 2$, 2-2 при $k_F = 4$, 2-3 при $k_F = 8$);

– подобласть IV – ЛЭМД с дополнительным вентилятором для охлаждения;

– подобласть V – определяет совокупность конструктивных и режимных параметров ЛЭМД с большими потерями и низким КПД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведено комплексное исследование систем охлаждения линейных электромагнитных двигателей. Для оценки эффективности систем охлаждения на этапе эскизного проектирования использована система обобщенных критериев, которая позволяет выявлять неэффективные варианты и обоснованно выбирать рациональную конфигурацию теплоотвода применительно к импульсным машинам с линейными электромагнитными двигателями. Установлено, что применение рационального охлаждения обеспечивает возможность повышения электромагнитных нагрузок на двигатель на 20-25% при сохранении прежних габаритных размеров. Полученные результаты и использованные методические подходы могут быть рекомендованы проектным организациям, занимающимся разработкой горного и строительного электрооборудования.

Список литературы • References

1. Wenlong Li, Chau K.T. A Linear Magnetic-geared Free-piston Generator for Range-extended Electric Vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles*. 2010;8(1)June.
2. Lachheb A., Khediri J., El Amraoui L. Nonlinear model based on inductance for switched reluctance linear motor. 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET). 2018 DOI: 10.1109/ASET.2018.8379853.
3. Коняев А.Ю., Мошкин В.И., Шестаков Д.Н. Оценка подходов к моделированию рабочих режимов линейных электромагнитных двигателей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2024. № 52. С. 5-24.
   Konyaev A.Yu., Moshkin V.I., Shestakov D.N. Evaluation of approaches to modeling the operating modes of linear electromagnetic motors. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2024;(52): 5-24. (In Russ.).
4. Нейман В.Ю., Нейман Л.А. Имитационная модель электромагнитного сейсмоисточника ударного типа для малоглубинной сейсморазведки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2026. Т. 337. № 1. С. 139-151.
   Neiman V.Yu., Neiman L.A. An imitation model of an electromagnetic shock-type seismic source for shallow-depth seismic exploration. *Izvestiya of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*. 2026;337(1):139-151. (In Russ.).
5. Ugarov G.G., Vyrykhanov D.A., Moshkin V.I., Morozov P.V. Numerical simulation of the efficiency of magnetic energy conversion in linear electromagnetic converters. In: Journal of Physics: Conference Series. International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021. IOP Publishing Ltd, 2021. 012089.
6. Ibrahim T., Wang J., Howe D. Analysis of a single phase, quasi-Halbach magnetised tubular permanent magnet motor with non-ferromagnetic supporting tube. 2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives. DOI: 10.1049/cp:20080624.
7. Дискретные электромагнитные приводы в процессах и технологиях сельхозпроизводства и АПК: монография / К.М. Усанов, В.А. Каргин, А.П. Моисеев и др. Саратов, Изд-во: ООО «Амирит», 2021. 184 с.
8. Neiman L.A., Neiman V.Yu. A dynamic model of a synchronous electromagnetic-impact unit with a free-run striker. *Russian Electrical Engineering*. 2025;96(7):510-515.
9. Усанов К.М., Каргин В.А., Трубенкова И.В. Оценка теплового состояния имульсной электромагнитной машины // Вестник Саратовского Госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2010. № 7. С. 65-67.
10. Усанов К.М., Каргин В.А., Филимонова Т.А. Интенсификация процесса теплопередачи в импульсных электромагнитных машинах // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 9(71). С. 75-78.
    Usanov K.M., Kargin V.A., Filimonova T.A. Intensification of the heat transfer process in pulsed electromagnetic machines. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2010;9(71):75-78. (In Russ.).
11. Бондаренко С.Н., Лимонов Л.Г. Энергосбережение в системах охлаждения крупных электрических машин // Электротехнические и компьютерные системы. 2016. № 23(99). С. 29-32.
    Bondarenko S.N., Limonov L.G. Energy saving in cooling systems of large electric machines. *Electrotechnical and computer systems*. 2016;23(99):29-32. (In Russ.).
12. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 256 с.

Authors Information

Kargin V.A. – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automated Control Systems for Biotechnological Processes, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, 125080, Russian Federation, Professor of the Department of Intelligent Systems in Management and Automation, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, 111024,Russian Federation

Chetverikov E.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 123434, Russian Federation, e-mail: e.chetverikov@rgau-msha.ru

Mokrushin S.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Control Systems for Biotechnological Processes, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, 125080, Russian Federation

Nazoikin E.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Control Systems for Biotechnological Processes, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), Moscow, 125080, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 8.04.2026
Поступила после рецензирования: 17.08.2026
Принята к публикации: 31.08.2026

Paper info

Received April 8, 2026
Reviewed August 17, 2026
Accepted August 31, 2026