

УДК 621.3.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ВКЛЮЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО ПИТАНИИ ОТ КОНДЕНСАТОРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Д. А. Вырыханов

Современное развитие электроприводных технологий требует максимального использования особенностей динамических процессов преобразования электрической, магнитной и механической видов энергии в электрических машинах. При этом магнитное поле выступает в качестве среды энергообмена, обеспечивающей преобразование электрической энергии в механическую форму. Исходя из данных представлений, предложен критерий оценки эффективности использования магнитного поля как среды энергообмена в электромеханических преобразователях энергии. Расчет данного критерия эффективности проиллюстрирован на примере питания линейного электромагнитного двигателя от конденсаторного накопителя энергии. Показаны наличие максимума эффективности использования магнитного поля как среды энергообмена при определенных соотношениях между мгновениями времени заряда конденсатора от питающей сети и его подключения к обмотке возбуждения магнитного поля линейного электромагнитного двигателя.

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, магнитное поле, среда энергообмена, критерий эффективности, линейный электрический двигатель, конденсатор.

Линейные электрические двигатели (ЛЭД) находят широкое применение в качестве привода насосов, станков с импульсным воздействием на объект труда (штамповка, рубка, вальцовка и т. д.), в системах позиционирования и иных областях. В соответствии с повышением энергетических, динамических характеристик ЛЭД происходит замещение ими гидравлических и пневматических систем привода, в том числе в ответственных приложениях, например, летательных аппаратах. Стратегия развития промышленности по снижению вредных выбросов углекислого газа, сопровождающих работу двигателей внутреннего сгорания, определяет высокую актуальность задачи дальнейшего совершенствования ЛЭД за счет повышения их энергетических показателей. Одним из направлений данной работы является формирование питания ЛЭД дозированным количеством энергии от предварительно заряженных конденсаторных накопителей энергии. Данный режим позволяет снизить величины тепловых потерь энергии, остаточной магнитной энергии к концу цикла срабатывания ЛЭД. При этом в настоящее время отсутствуют работы, посвященные анализу переходных процессов электромеханического преобразования энергии в ЛЭД, на основе рассмотрения фундаментальных представлений о магнитном поле как среде энергообмена между конденсаторным накопителем и механической подсистемой движущегося якоря электродвигателя. В данной работе предложен критерий, определяющий эффективность использования магнитного поля в электромеханических преобразователях. На основании расчета критерия эффективности в отношении ЛЭД выявлены особенности влияния конструктивных и режимных параметров машины на предложенный критерий эффективности.

Принцип работы электромеханических преобразователей энергии основан на использовании магнитного поля для формирования электромагнитного усилия, действующего на подвижный элемент преобразователя. Магнитное поле, как один из видов материи, следует рассматривать в виде среды энергообмена, в которой происходит преобразование энергии из формы энергии электрического поля в энергию механического движения подвижного элемента преобразователя [1, 2]. Наиболее общим примером использования магнитного поля являются реактивные машины, в которых пондеромоторное усилие, приводящее в движение подвижный элемент, определяется пропорциональностью между изменением величины магнитной энергии преобразователя при движении. При этом особенности ввода энергии в магнитную подсистему преобразователя, а также ее вывод в механический накопитель (ротор или якорь преобразователя) оказывают существенное влияние на мощностные и динамические характеристики электродвигателя, определяют коэффициент полезного действия машины.

Энергия W , проходящая через границу среды энергообмена за время преобразования, определится в виде:

$$W = \int_{t_1}^{t_3} \left(F_1 \int_{t_{11}}^{t_{12}} \frac{F_1}{M_1} dt \right) dt = \int_{t_1}^{t_3} \left(F_2 \int_{t_{21}}^{t_{22}} \frac{F_2}{M_2} dt \right) dt = \text{const}, \quad (1)$$

где F_1, M_1 – усилие и коэффициент инерции, соответственно, среды энергообмена, из которой происходит передача потока энергии; F_2, M_2 – усилие и коэффициент инерции, соответственно, среды энергообмена, в которую происходит передача потока энергии; t_1, t_3 – моменты времени начала и завершения процесса передачи энергии через среду

энергообмена; t_{11}, t_{12} – моменты времени начала и завершения выделения энергии в «первичной» среде энергообмена, то есть той, из которой происходит передача мощности; t_{21}, t_{22} – моменты времени начала и завершения накопления энергии во «вторичной» среде энергообмена, то есть той, в которую происходит передача мощности.

Уравнение (1) в общем виде описывает расчет величин энергии, наблюдаемой во взаимодействующих средах энергообмена. Знаки равенства в (1) выражают закон сохранения энергии. В зависимости от соотношения между моментами времени $t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}$ могут наблюдаться различные режимы энергообмена: без накопления энергии (при $t_{11} = t_{21}, t_{21} = t_{22}$); с предварительным накоплением энергии (при $t_{21} - t_{11} < t_{22} - t_{21}$) [3].

В электрических машинах и аппаратах средой энергообмена является магнитное поле. Для ЛЭД, питаемых от емкостного накопителя, выражение (1) можно записать в виде:

$$W_{out} = \int_{t_1}^{t_3} \left(i_{out} \int_{t_{11}}^{t_{12}} \frac{i_{out}}{C} dt \right) dt = \int_{t_1}^{t_3} \left(\frac{d\psi_{out}}{dt} \int_{t_{21}}^{t_{22}} \frac{1}{L} \frac{d\psi_{out}}{dt} dt \right) dt = \int_{t_1}^{t_3} \left(F_{\Sigma} \int_{t_{21}}^{t_{22}} \frac{F_{\Sigma}}{m} dt \right) dt + \int_{x_n}^{x_k} F_{\Sigma} dx = const, \quad (2)$$

где W_{out} – величина энергии преобразованной в механическую форму (величина «полезной» энергии); i_{out} – электрический ток, протекающий в обмотке возбуждения магнитного поля двигателя; C – емкость конденсатора; ψ_{out} – потокосцепление обмотки возбуждения магнитного поля электродвигателя; L – собственная индуктивность обмотки электродвигателя; m – масса подвижных частей электродвигателя; x – пространственная координата, вдоль которой движется якорь электрической машины с начального местоположения x_n до конечного x_k ; F_{Σ} – суммарное механическое усилие, действующее на подвижный якорь электродвигателя, равное геометрической сумме электромагнитного усилия $F_{эл.м}$ и сил сопротивления $F_{сопр.}$ движению:

$$F_{\Sigma} = F_{эл.м} - F_{сопр.}. \quad (3)$$

Учитывая, что помимо «полезной» энергии в процессе энергопреобразования будут наблюдаться потери энергии, а также остаточная энергия в магнитной форме и «полезная» выполненная механическая энергия (потерями энергии на гистерезис и

вихревые токи пренебрегаем), выражение (2) следует дополнить:

$$W_{in} = \int_{t_1}^{t_3} \left((i_{out} + i_b) \int_{t_{11}}^{t_{12}} \frac{(i_{out} + i_b)}{C} dt \right) dt + R \int_{t_1}^{t_3} (i_{out} + i_b)^2 dt = \int_{t_1}^{t_3} \left(\left(\frac{d\psi_{out}}{dt} + \frac{d\psi_b}{dt} \right) \int_{t_{21}}^{t_{22}} \frac{1}{L} \left(\frac{d\psi_{out}}{dt} + \frac{d\psi_b}{dt} \right) dt \right) dt = \int_{t_1}^{t_3} \left(F_{\Sigma} \int_{t_{21}}^{t_{22}} \frac{F_{\Sigma}}{m} dt \right) dt + \int_{x_n}^{x_k} F_{\Sigma} dx = const, \quad (4)$$

где i_b – составляющая электрического тока разряда конденсатора, формирующая остаточную энергию в магнитном поле реактивного двигателя на конец процесса энергопреобразования:

$$W_{mag.b} = \frac{L i_b^2}{2}; \quad (5)$$

$\frac{d\psi_b}{dt}$ – составляющая производной потокосцепления, соответствующая на момент завершения процесса энергопреобразования остаточной величине магнитной энергии.

Эффективность среды энергообмена следует оценивать на основании следующего выражения коэффициента полезного действия среды энергообмена:

$$\eta_s = \left(1 - \frac{W_{mag.b}}{W_{in} - W_{out}} \right) \left(1 - \frac{W_Q}{W_{in} - W_{out}} \right) \frac{W_{out}}{W_{in}}, \quad (6)$$

где W_Q – величина энергии потерь, наблюдаемая при преобразовании энергии через среду энергообмена. При принятых допущениях потери энергии наблюдаются в активном сопротивлении обмоток возбуждения электродвигателем:

$$W_Q = R \int_{t_1}^{t_3} (i_{out} + i_b)^2 dt. \quad (7)$$

Коэффициент η_s равен единице при отсутствии потерь энергии и отсутствии остаточной магнитной энергии, накопленной в среде энергообмена (магнитной энергии), к завершению процесса энергопреобразования. Коэффициент η_s равен нулю при равенстве нулю выходной энергии ($W_{out} = 0$).

Проведем анализ коэффициента полезного действия (6) магнитного поля как среды энергообмена в работе линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД) на основании его математической модели, обоснование и апробация которой представлены в [4, 5], в зависимости от соотношения мгновений времени начала заряда и разряда питающего ЛЭМД конденсатора. Смоделированная электрическая схема представлена на рис. 1. Заряд конденсатора начинается в момент времени $t_1 = t_{11} = 0$ замыкания ключа K_1 и длится до момента размыкания данного ключа t_{12} . Передача энергии в ЛЭМД производится с момента времени t_{21} замыкания ключа K_2 и длится до момента времени его размыкания $t_3 = t_{22}$. При этом процесс расчетов был сформирован таким образом, чтобы ток заряжающий конденсатор C не протекал через обмотку ЛЭМД, тем самым обеспечивалось условие последовательности передачи энергии сначала из источника электродвижущей силы (ЭДС) в конденсатор, а затем из конденсатора в ЛЭМД. Это позволило провести анализ коэффициента полезного действия магнитного поля в общем виде без учета особенности схемы питания ЛЭМД. Последовательность расчетов начиналась с определения напряжения ЭДС достаточного для срабатывания ЛЭМД (преодоления противодействующего усилия) и времени срабатывания, которое принималось за максимальное время t_{12}^{\max} . После этого проводились расчеты η_s согласно (6) для времен $t_{21} \in (0, t_{12}^{\max})$, $t_3 \in (t_{21}, k t_{12}^{\max})$, где коэффициент k принимался равным двум, что

обеспечивало достаточное время расчетов для срабатывания ЛЭМД.

Результаты расчетов η_s , представленные на рис. 2, показывают присутствие оптимального соотношения между промежутками времени t_{21} и t_3 , которое обеспечивает максимальную эффективность преобразования согласно критерию η_s (6). На рис. 2 данное соотношение наблюдается в правой области рассчитанной поверхности η_s . Учитывая, что в рассматриваемом режиме конденсатор заряжается с момента времени от 0 до 0,04 с, режим максимального значения η_s объясняется некоторой степенью восполнения энергии, передаваемой из конденсатора в ЛЭМД во время его срабатывания.

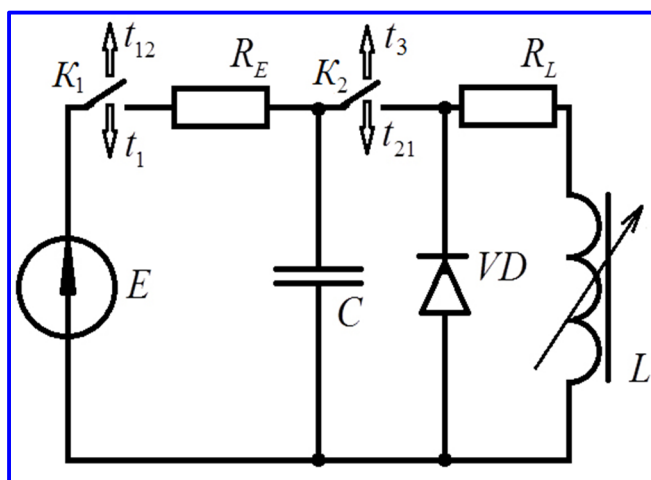


Рис. 1. Принципиальная схема режима питания линейного электромагнитного двигателя

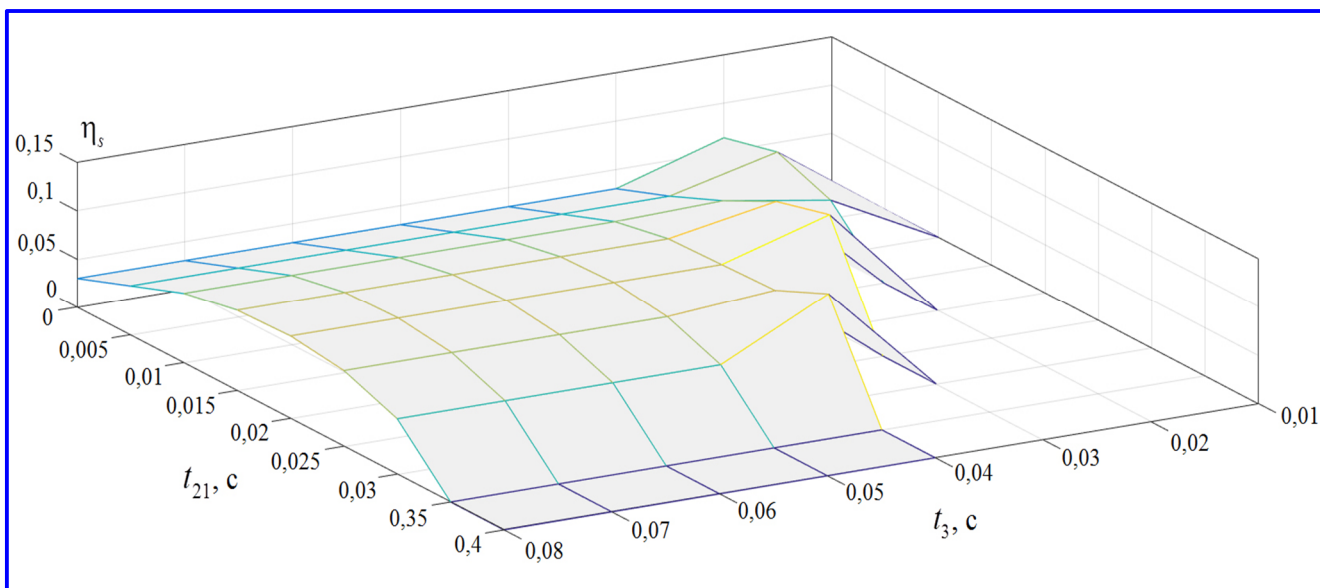


Рис. 2. Зависимость η_s от соотношения времени передачи энергии в линейный электромагнитный двигатель

Локальный максимум коэффициента η_s наблюдается на рис. 2 при неизменной величине $t_{21} = 0,015$ с вне зависимости от времени выключения питания ЛЭМД от конденсатора t_3 , то есть времени размыкания ключа K_2 . Определение времени подачи питания на ЛЭМД при его питании от конденсаторного накопителя позволит сформировать наиболее эффективный режим электромеханического преобразования, а также повысить частоту срабатывания ЛЭМД за счет использования времени обратного хода якоря ЛЭМД для зарядки конденсатора.

Выводы:

1. Обосновано применение коэффициента η_s (6) для поиска оптимальных мгновений коммутации емкостной схемы питания ЛЭМД.

2. Определены особенности формирования режима электромеханического преобразования энергии, характеризующегося максимальным значением η_s (6). Учет данных особенностей при проектировании конструкции и формировании режима работы ЛЭМД позволит получить максимальные мощностные показатели и коэффициент полезного действия работы машины.

Литература

1. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 312 с.
2. Абрамкин Ю. В. Теория и расчет пондеромоторных и электродвижущих сил и преобразования энергии в электромагнитном поле. – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 208 с.
3. Ugarov G. G. Numerical simulation of the efficiency of magnetic energy conversion in linear electromagnetic converters / G. G. Ugarov, D. A. Vyrykhanov, V. I. Moshkin, P. V. Morozov // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2032 : International Conference on IT in Business and Industry (ITBI 2021) (Novosibirsk, Russia, 12–14 May 2021) / Novosibirsk State Technical University. – IOP Publishing, 2021. – 6 p. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012089>.
4. Вырыханов Д. А. Анализ взаимосвязей электрических контуров в обобщенном электромеханическом преобразователе энергии / Д. А. Вырыханов, Г. Г. Угаров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2015. – № 3. – С. 33 – 37.
5. Вырыханов Д. А. Оптимизация режима конденсаторного питания линейного электромагнитного двигателя в приводе ударных машин / Д. А. Вырыханов, А. А. Егоров, Г. Г. Угаров, К. М. Усанов // Вестник СГТУ, 2006. – № 3. – С. 78 – 83.

Поступила в редакцию 06.06.2022

Денис Александрович Вырыханов, кандидат технических наук, инженер, доцент кафедры электроэнергетики и электротехника.

T.: +7 (8452) 99-88-72, e-mail: DenverElrond2@yandex.ru.

(АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики».

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»).

DETERMINATION OF OPTIMAL SWITCH-ON TIME OF A LINEAR ELECTRIC MOTOR WHEN IT IS POWERED FROM A CAPACITOR-TYPE ENERGY STORAGE DEVICE

D. A. Vyrykhanov

The current progress of technologies requires maximum use of features of dynamic processes of electrical, magnetic, and mechanical energy conversion by electrical machines. The magnetic field serves as an energy exchange medium ensuring conversion of electrical energy to the mechanical form. Based on these ideas, a criterion for assessing the efficiency of use of the magnetic field as a medium of energy exchange in electromechanical energy converters has been suggested. Calculation of this efficiency criterion is illustrated by the example of powering a linear electromagnetic motor from a capacitor-type energy storage device. The maximum efficiency of using the magnetic field as a medium of energy exchange at specific relationships between the moments of time of capacitor charge from the mains and its connection to the magnetic field excitation winding of the linear electromagnetic motor has been demonstrated.

Key words: *electromechanical energy conversion, energy conversion, magnetic field, energy exchange medium, efficiency criterion, linear electric motor, capacitor.*

References

1. White D. Electromechanical energy conversion / D. White, H. Woodson. – M.: Energia, 1964. – 312 p.
2. Abramkin Yu. V. Theory and calculation of ponderomotive and electromotive forces and energy conversion in the electromagnetic field. – M.: MEI Publishing House, 1997. – 208 p.

3. Ugarov G. G. Numerical simulation of the efficiency of magnetic energy conversion in linear electromagnetic converters / G. G. Ugarov, D. A. Vyrykhanov, V. I. Moshkin, P. V. Morozov // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2032 : International Conference on IT in Business and Industry (ITBI 2021) (Novosibirsk, Russia, 12 – 14 May 2021) / Novosibirsk State Technical University. – IOP Publishing, 2021. – 6 p. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012089>.
4. Vyrykhanov D. A. Analysis of interrelations of electrical loops in a generalized electromechanical energy converter / D. A. Vyrykhanov, G. G. Ugarov // Scientific and Technical Journal ‘Russian Electromechanics, 2015. – No. 3. – P. 33 – 37.
5. Vyrykhanov D. A. Optimization of the mode of capacitor power supply of a linear electromagnetic motor in the drives of impact machines / D. A. Vyrykhanov, A. A. Yegorov, G. G. Ugarov, K. M. Usanov // Bulletin of SSTU, 2006. – No. 3. – P. 78 – 83.

Denis Aleksandrovich Vyrykhanov, *Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Engineer, Associate Professor of Power Engineering and Electrical Engineering Department.*
Tel.: +7 (8452) 99-88-72, e-mail: DenverElrond2@yandex.ru.
(JSC «Design Bureau of Industrial Automation»;
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov).