

УДК 621.313.17

УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНОГО КПД ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.Ю. Нейман*Новосибирский государственный технический университет*

Для случая линейной среды установлена предпочтительность в режимах энергопреобразования, характеризующих процесс ускорения якоря электромагнитного двигателя из условия достижения предельных значений коэффициента полезного действия (КПД). В качестве объекта исследования рассматривается ненасыщенный электромагнитный двигатель, характеризующийся однократным процессом ускорения якоря, в магнитном поле, созданном индуктором. В результате проведенных исследований получены новые соотношения для анализа условий реализации предельных значений КПД, соответствующие режиму энергопреобразования и конфигурации элементарного магнитного цикла. Показано, что теоретически реализация режимов с КПД близких к 100 % возможна только при условии использования специальных средств автоматического управления. Для случая прямого включения, при отсутствии специальных средств контроля и управления, значения КПД не могут превышать его теоретического предела 50 %. Полученные результаты по отдельным режимам энергопреобразования и выводы хорошо согласуются с результатами исследований других авторов, выполненных в разное время.

Ключевые слова: электромагнитный двигатель, коэффициент полезного действия, режим энергопреобразования, элементарные магнитные циклы, коэффициент восстановления магнитной энергии.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-45-59

Введение

Основное применение электромагнитные двигатели (ЭМД) получили в дискретных импульсных системах с фиксированным перемещением исполнительных органов. Типичным примером использования дискретных систем являются электромагнитные приводы коммутационной аппаратуры, ударного электроинструмента, молотов, вибраторов, прессового оборудования, ударных источников сейсмических волн и т. д. [1–4].

Перспективность применения электромагнитного привода в перечисленных устройствах прежде всего определяется их надежностью, простотой конструкции, минимальными затратами при обслуживании [5–8]. Работа электромагнитного привода при больших динамических перегрузках считается нормальным режимом его функционирования [9, 10].

Несмотря на давнее использование электромагнитного привода, по-прежнему остаются востребованными методы по его расчету в различных режимах [11–15]. Также большое внимание уделяется вопросам оптимизации режимов работы как за счет изучения процессов энергопреобразования, так и за счет применения новых рабочих циклов, способствующих повышению его эффективности [16–18].

Главным показателем любой машины или устройства, созданного на основе ЭМД, остается коэффициент полезного действия (КПД). Анализ существующих машин с ЭМД, а также выполненные расчеты машин, функционирующих в динамических режимах показывают, что уровень их КПД не превышает 50 % [19–21].

1. Постановка задачи исследования

Один из распространенных вариантов электромагнитного двигателя, применяемого в качестве привода прессового оборудования, приведен на рис. 1 [22–24]. Энергетические показатели и режимы энергопреобразования такого ЭМД во многом определяются видом переходной кривой динамической характеристики намагничивания в виде зависимости $\psi = f(i)$ [25]. Внешний вид подобной характеристики намагничивания на интервале движения якоря ЭМД представлен на рис. 2.

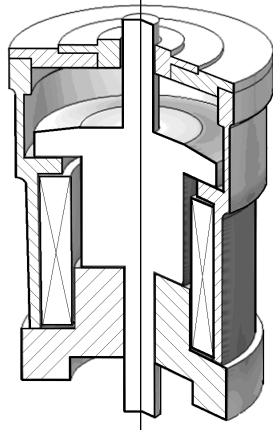


Рис. 1 – Электромагнитный двигатель
Fig. 1 – Electromagnetic motor

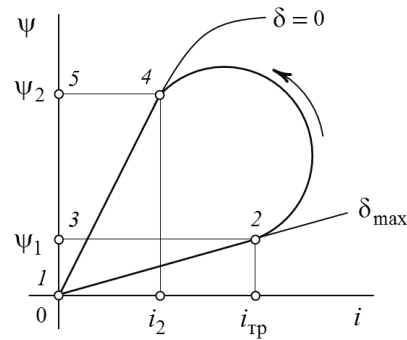


Рис. 2 – Переходная динамическая характеристика намагничивания
Fig. 2 – The transient dynamic characteristic of magnetization

Согласно рис. 2 магнитная энергия, запасенная в системе ЭМД к началу движения якоря,

$$A_1 = \int_0^{\psi_1} i d\psi = S_{1231},$$

где S_{1231} – соответствующая площадь поверхности на рис. 2.

Магнитная энергия, приобретенная системой за время движения якоря,

$$A_2 = \int_{\psi_1}^{\psi_2} i d\psi = S_{24532}.$$

Магнитная энергия, накопленная системой к концу движения якоря,

$$A_3 = \int_0^{\psi_2} i d\psi = S_{1451}.$$

Согласно закону сохранения энергии $A_1 + A_2 = A_3 + A_{\text{мех}}$, механическая работа по перемещению якоря из точки 2 с координатой δ_{max} в точку 4 с координатой $\delta = 0$ определится как

$$A_{\text{мех}} = A_1 + A_2 - A_3 = S_{1241}.$$

Внешний вид переходной характеристики $\psi = f(i)$ (рис. 2) может быть различным и при детальном рассмотрении несложно установить, что формируется он из совокупности промежуточных элементарных магнитных циклов (рис. 3), характеризующих процессы энергопреобразования за время движения якоря ЭМД [26–28].

Основными показателями, способствующими такому разделению, являются знаки приращения потокосцепления [29]. Все процессы, происходящие с увеличением потокосцепления $d\psi > 0$, сопровождаются потреблением энергии из сети. Процессы, происходящие с уменьшением потокосцепления $d\psi < 0$, сопровождаются отдачей энергии обратно в сеть. Уменьшение рабочего воздушного зазора в соответствии с направлением указателя в виде стрелки на рис. 3 свидетельствует о том, что электромагнитные силы совершают положительную работу, связанную с перемещением якоря и преодолением внешней механической силы (двигательный режим).

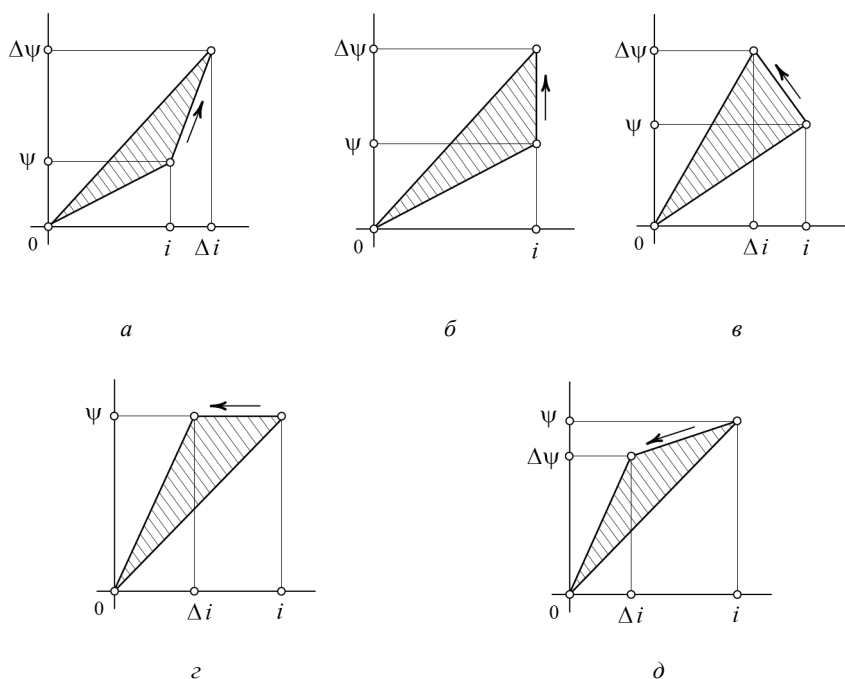


Рис. 3 – Элементарные магнитные циклы для двигательного режима

Fig. 3 – Elementary magnetic cycles for the motor mode

Существующее многообразие процессов энергопреобразования можно разделить на несколько групп (режимов), обладающих общими свойствами и характеризующих процессы движения якоря: 1) при одновременном нарастании тока и потокосцепления (рис. 3, а); 2) при постоянном токе и увеличивающемся потокосцеплении (рис. 3, б); 3) при уменьшающемся токе и увеличивающемся потокосцеплении (рис. 3, в); 4) при уменьшающемся токе и постоянном потокосцеплении (рис. 3, г); 5) при уменьшающемся токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, д).

Каждый из представленных на рис. 3 элементарных магнитных циклов позволяет установить энергию, запасенную в системе на момент начала и окончания

движения якоря, сообщенную системе энергию за время движения и энергию на создание механической работы.

Согласно закону сохранения энергии, энергия пропорциональная заштрихованной области (рис. 3), определяет механическую работу $\Delta A_{\text{мех}}$ по перемещению якоря.

Исследования энергетических показателей на основе анализа элементарных магнитных циклов, позволяющих относительно просто устанавливать зависимости токов и потокосцеплений от координаты положения якоря, хорошо известны [30].

Однако в вопросах достижения предельных значений КПД в процессе совершения полезной механической работы в основном исходят из частных случаев постоянства тока ($i = \text{const}$) или потокосцепления ($\psi = \text{const}$) [31, 32]. Вызвано это только тем, что введение подобного рода ограничений, относительно характера поведения зависимости $\psi = f(i)$ при движении якоря, упрощает процедуру математических выкладок с использованием энергетических соотношений, а также упрощает анализ получаемых результатов.

Для случая линейной среды установим предпочтительность в использовании магнитных циклов и соответствующих циклам режимов энергопреобразования, характеризующих однократный процесс ускорения якоря магнитным полем, исходя из условия реализации предельных КПД электромагнитного двигателя.

2. Условия реализации предельного КПД режима энергопреобразования

Для анализа условий реализации предельного КПД не будем учитывать влияние активных потерь энергии в катушке ($W_Q \approx 0$), так как данные потери не зависят от конфигурации магнитного цикла и определяют только тепловое состояние всей системы. Полезной работой условимся считать механическую работу, которую совершают электромагнитные силы при перемещении якоря из начального ($\delta = \delta_{\text{max}}$) в конечное ($\delta = 0$) положение.

Коэффициент полезного действия будем определять как отношение полезной механической работы $\Delta A_{\text{мех}}$ к сумме начальной энергии магнитного поля ΔW_1 и энергии, сообщенной системе за время движения ΔW_3 . Предполагая $W_Q \approx 0$, находим КПД электромагнитного двигателя без активных потерь:

$$\eta = \frac{\Delta A_{\text{мех}}}{\Delta W_1 + \Delta W_3}. \quad (1)$$

Работу электромагнитных сил на бесконечно малом интервале перемещения якоря определяем из баланса энергии как сумму начальной энергии ΔW_1 и энергии ΔW_3 за вычетом конечной энергии магнитного поля ΔW_2 :

$$\Delta A_{\text{мех}} = \Delta W_1 + \Delta W_3 - \Delta W_2.$$

Для анализа фактического перераспределения энергии, потребляемой или отдаваемой источнику питания на интервале движения, целесообразно воспользоваться коэффициентом восстановления магнитной энергии, отражающим степень изменения энергии магнитного поля по отношению к энергии, затраченной для совершения механической работы [33]:

$$k_B = \frac{\Delta W_M}{\Delta A_{\text{мех}}} = \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех}}}. \quad (2)$$

Условия протекания процессов энергопреобразования на границах раздела их режимов в зависимости от величины и знака коэффициента восстановления (2) рассмотрены в таблице.

Условия протекания процессов энергопреобразования
Conditions of energy conversion processes

Номер условия	Коэффициент восстановления	Условия протекания процессов
1	$0 < k_B < 1$	Электрическая энергия источника расходуется на совершение механической работы и на увеличение энергии магнитного поля. Причем затраты энергии на совершение механической работы превышают затраты энергии на увеличение энергии магнитного поля
2	$k_B = 1$	Электрическая энергия источника в равных долях расходуется на совершение механической работы и увеличение энергии магнитного поля
3	$k_B > 1$	Затраты электрической энергии источника на увеличение энергии магнитного поля превышают затраты энергии на совершение механической работы
4	$k_B = 0$	Электрическая энергия, поступающая от источника, расходуется только на совершение механической работы
5	$-1 < k_B < 0$	Механическая работа частично совершается за счет электрической энергии источника и частично за счет энергии магнитного поля
6	$k_B = -1$	Электрическая энергия от источника не поступает. Механическая работа совершается только за счет энергии магнитного поля
7	$k_B < -1$	Энергия магнитного поля используется для совершения механической работы и частично передается источнику в виде электрической энергии

Основные режимы энергопреобразования и сопутствующие данным режимам элементарные магнитные циклы, определяющие общий вид переходной кривой намагничивания, представлены на рис. 3.

Полагаем, что на начало движения якоря система характеризуется значениями начального тока $i = i_n$ и начального потокосцепления $\psi = \psi_n$, а в конце движения – значениями конечного тока $i_k = i + \Delta i$ и конечного потокосцепления $\psi_k = \psi + \Delta \psi$. Условия позволяют начальные и конечные значения токов и потокосцеплений выразить через их приращения в виде $\Delta i = i_k - i_n$, $\Delta \psi = \psi_k - \psi_n$.

Выражая входящие в (1) составляющие от энергий через начальные и конечные значения токов и потокосцеплений, получим соотношения для анализа условий реализации предельных КПД, удовлетворяющие режиму энергопреобразования и конфигурации элементарного магнитного цикла (рис. 3).

Рассмотрим основные режимы энергопреобразования (работы электромагнитных сил) в соответствии с элементарными циклами намагничивания на рис. 3.

Режим энергопреобразования при увеличивающемся токе и потокосцеплении (рис. 3, а). Коэффициент полезного действия режима без активных потерь

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \frac{\Delta A_{\text{мех1}}}{\Delta W_1 + \Delta W_3} = \frac{\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi + i\Delta\psi + \frac{1}{2}\Delta i\Delta\psi} = \\ &= \frac{i_{\text{н}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{к}}\psi_{\text{н}}}{i_{\text{н}}\psi_{\text{к}} + i_{\text{к}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{к}}\psi_{\text{н}}} = \frac{\frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}{1 + \frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}.\end{aligned}\quad (3)$$

Предельным случаем (3) является условие $i_{\text{к}} \rightarrow i_{\text{н}}$ и $\psi_{\text{н}} \rightarrow 0$, при которых КПД будет максимальным и соответствовать $\eta_1 = 0,5$.

При этом коэффициент восстановления магнитной энергии

$$\begin{aligned}k_{\text{в1}} &= \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех1}}} = \frac{\frac{1}{2}(\psi + \Delta\psi)(i + \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i} = \\ &= \frac{i_{\text{к}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{н}}\psi_{\text{н}}}{i_{\text{н}}\psi_{\text{к}} - i_{\text{к}}\psi_{\text{н}}} = \frac{1 - \frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}{\frac{i_{\text{н}}}{i_{\text{к}}} - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}},\end{aligned}\quad (4)$$

и в предельном случае $k_{\text{в1}} = 1,0$. Таким образом, при поддержании режима в предельном случае перераспределение потребляемой от источника энергии таково, что только половина потребляемой энергии может быть преобразована в механическую работу, другая половина энергии идет на увеличение энергии магнитного поля системы.

Фактическое значение КПД данного режима, даже без учета активных потерь энергии на нагрев, менее 50%. Так, если принять для режима $\psi_{\text{н}}/\psi_{\text{к}} = 0,6$ и $i_{\text{н}}/i_{\text{к}} = 0,8$, то согласно (3) КПД составит $\eta_1 = 0,17$, а коэффициент восстановления в соответствии с (4) увеличится до $k_{\text{в1}} = 2,6$.

Столь существенное снижение КПД режима по сравнению с предельным случаем вызвано тем (см. таблицу), что затраты электрической энергии на увеличение энергии магнитного поля за время движения составляют 72,2% и значительно превышают затраты этой энергии для совершения механической работы (27,8%).

Режим энергопреобразования при условии постоянства тока ($i = \text{const}$) и увеличивающемся потокоцеплении (рис. 3, б). Коэффициент полезного действия режима

$$\eta_2 = \frac{\Delta A_{\text{мех2}}}{\Delta W_1 + \Delta W_3} = \frac{\frac{1}{2}i\Delta\psi}{\frac{1}{2}i\psi + i\Delta\psi} = \frac{\psi_{\text{к}} - \psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{н}} + 2(\psi_{\text{к}} - \psi_{\text{н}})} = \frac{1 - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}{2 - \frac{\psi_{\text{н}}}{\psi_{\text{к}}}}.\quad (5)$$

Предельным случаем режима (5) является условие $\psi_{\text{н}} \rightarrow 0$, при котором КПД будет максимальным ($\eta_2 = 0,5$).

Коэффициент восстановления магнитной энергии для режима

$$k_{в2} = \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{мех2}} = \frac{\frac{1}{2}i(\psi + \Delta\psi) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}i\Delta\psi} = 1. \quad (6)$$

Увеличение энергии магнитного поля или энергии, расходуемой на совершение механической работы в данном режиме, всегда равно половине потребляемой от источника энергии (см. таблицу). Это означает, что механическая работа в точности равна увеличению энергии магнитного поля и не зависит от начального и конечного значения потокосцепления.

Если принять для режима за время движения якоря $\psi_n/\psi_k = 0,6$, то согласно (5) КПД без учета активной составляющей потерь энергии на нагрев составит $\eta_2 = 0,29$. С увеличением разницы между начальным и конечным значением потокосцепления КПД возрастает (при $\psi_n/\psi_k = 0,4$ получим $\eta_2 = 0,38$).

Результаты анализа по данному режиму полностью согласуются с результатами других авторов [31, 32].

Следующий режим энергопреобразования характеризуется уменьшающимся током и увеличивающимся потокосцеплением (рис. 3, в). Коэффициент полезного действия режима

$$\begin{aligned} \eta_3 &= \frac{\Delta A_{мех3}}{\Delta W_1 + \Delta W_3} = \frac{\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi + \Delta\psi(i - \Delta i) + \frac{1}{2}\Delta i\Delta\psi} = \\ &= \frac{i_n\psi_k - i_k\psi_n}{i_n\psi_k + i_k\psi_k - i_k\psi_n} = \frac{1 - \frac{i_k}{i_n} \frac{\psi_n}{\psi_k}}{1 + \frac{i_k}{i_n} - \frac{i_k}{i_n} \frac{\psi_n}{\psi_k}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что границами раздела режима энергопреобразования являются режимы для $i = \text{const}$ и $\psi = \text{const}$, в качестве предельного случая режима (7) следует рассмотреть два условия. Для первого условия $\psi_n \rightarrow 0$ и $i_k \rightarrow i_n$ предельный КПД режима составит $\eta_3 = 0,5$. Для второго условия $\psi_k \rightarrow \psi_n$ и $i_k \rightarrow 0$ КПД режима будет максимальным и составит $\eta_3 = 1,0$. Следовательно, КПД режима энергопреобразования следует рассматривать в пределах $0,5 \leq \eta_3 \leq 1,0$.

Коэффициент восстановления магнитной энергии

$$\begin{aligned} k_{в3} &= \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{мех3}} = \frac{\frac{1}{2}(\psi + \Delta\psi)(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i} = \\ &= \frac{i_k\psi_k - i_n\psi_n}{i_n\psi_k + i_k\psi_n - 2i_n\psi_k} = \frac{\frac{i_k}{i_n} - \frac{\psi_n}{\psi_k}}{1 + \frac{i_k}{i_n} \frac{\psi_n}{\psi_k} - 2 \frac{\psi_n}{\psi_k}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Рассматривая (8) как предельный случай, при котором КПД будет максимальным, получим $k_{в3} = -1,0$. Фактически это означает (см. таблицу), что механиче-

ская работа должна совершаться только за счет уменьшения запасенной ранее энергии магнитного поля, в то время как электрическая энергия от источника в систему не поступает.

Одной из особенностей рассматриваемого режима является возможность совершения механической работы без приращения энергии магнитного поля ($dW_M = 0$). В этом режиме вся энергия, поступающая от источника, расходуется на совершение механической работы, при этом $k_{в3} = 0$ (см. таблицу).

Приравнявая (8) нулю получим условие, при котором приращение энергии магнитного поля при движении якоря отсутствует:

$$\frac{\Psi_H}{\Psi_K} = \frac{i_K}{i_H}. \quad (9)$$

При данном условии (9) КПД режима энергопреобразования может быть получен с использованием одного из упрощенных выражений:

$$\eta_3 = \frac{1 - \left(\frac{\Psi_H}{\Psi_K}\right)^2}{1 + \frac{\Psi_H}{\Psi_K} - \left(\frac{\Psi_H}{\Psi_K}\right)^2} = \frac{1 - \left(\frac{i_K}{i_H}\right)^2}{1 + \frac{i_K}{i_H} - \left(\frac{i_K}{i_H}\right)^2}. \quad (10)$$

В этом случае достаточно установить только кратность изменения потокоцепления или тока либо обладать их начальными и конечными значениями.

Например, при $\Psi_H/\Psi_K = 0,5$, согласно (10), получим КПД режима $\eta_3 = 0,6$.

Рассматривая самый общий случай режима энергопреобразования для $\Psi_H/\Psi_K = 0,4$, $i_K/i_H = 0,6$, КПД в соответствии с (7) без учета активных потерь составит $\eta_3 = 0,56$, а коэффициент восстановления магнитной энергии по (8) будет равен $k_{в3} = 0,45$. Условия протекания процесса таковы, что затраты электрической энергии источника для совершения механической работы в 2,2 раза (68,7 %) превышают затраты этой энергии, запасаемой в магнитном поле системы (31,3 %) за время движения якоря.

Режим энергопреобразования при постоянстве потокоцепления $\psi = \text{const}$ и уменьшающемся токе (рис. 3, з). Полагая, что электрическая энергия источника за время движения якоря в систему не поступает ($\Delta W_3 = 0$), выражение (1) для коэффициента полезного действия режима значительно упрощается:

$$\eta_4 = \frac{\Delta A_{\text{мех4}}}{\Delta W_1} = \frac{\frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi} = \frac{i_H - i_K}{i_H} = 1 - \frac{i_K}{i_H}. \quad (11)$$

В конкретном случае (11) КПД режима энергопреобразования определяется только начальным и конечным значением тока. Предельным случаем режима следует рассматривать условие $i_K \rightarrow 0$, при котором КПД может быть близок к единице ($\eta_4 = 1,0$).

Коэффициент восстановления магнитной энергии режима

$$k_{в4} = \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех4}}} = \frac{\frac{1}{2}\psi(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{\frac{1}{2}\psi\Delta i} = -1,0. \quad (12)$$

Условие протекания процесса энергопреобразования таково (см. таблицу), что механическая работа системы совершается только за счет энергии магнитного поля системы, запасенной до начала движения. Причем электрическая энергия от источника в систему не поступает.

Например, при различии токов за время движения $i_k/i_n = 0,6$ КПД режима составит $\eta_4 = 0,4$. При большем различии токов за время движения $i_k/i_n = 0,4$ КПД возрастает до $\eta_4 = 0,6$. Результаты анализа по данному режиму также хорошо согласуются с исследованиями авторов известных работ [31, 32].

Режим энергопреобразования при уменьшающемся токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, д). Коэффициент полезного действия режима с учетом изменения знака потокосцепления

$$\begin{aligned} \eta_5 &= \frac{\Delta A_{\text{мех}}}{\Delta W_1 - \Delta W_3} = \frac{-\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i}{\frac{1}{2}i\psi - \Delta\psi(i - \Delta i) - \frac{1}{2}\Delta i\Delta\psi} = \\ &= \frac{i_n\psi_k - i_k\psi_n}{i_k\psi_k - i_k\psi_n - i_n\psi_k} = \frac{\frac{\psi_k}{\psi_n} - \frac{i_k}{i_n}}{\frac{i_k}{i_n} \frac{\psi_k}{\psi_n} - \frac{i_k}{i_n} + \frac{\psi_k}{\psi_n}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Предельным случаем режима (13) следует рассматривать условие $\psi_k \rightarrow \psi_n$ и $i_k \rightarrow 0$, при которых КПД будет максимальным и соответствовать $\eta_5 = 1,0$.

Коэффициент восстановления магнитной энергии режима

$$\begin{aligned} k_{B5} &= \frac{\Delta W_2 - \Delta W_1}{\Delta A_{\text{мех}5}} = \frac{\frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi}{-\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i} = \\ &= \frac{i_k\psi_k - i_n\psi_n}{i_n\psi_k - i_k\psi_n} = \frac{\frac{i_k}{i_n} \frac{\psi_k}{\psi_n} - 1}{\frac{\psi_k}{\psi_n} - \frac{i_k}{i_n}}, \end{aligned} \quad (14)$$

и в предельном случае имеем $k_{B5} = -1$.

В предельном случае механическая работа совершается только за счет энергии, запасенной в магнитном поле. При этом электрическая энергия не потребляется и не передается обратно источнику.

Для самого общего случая режим энергопреобразования может характеризоваться относительно высоким КПД. Особенность режима заключается в том, что энергия электромагнитного поля системы используется для совершения полезной механической работы и одновременного возврата энергии источнику в виде электрической энергии ($k_{B5} < -1$, см. таблицу).

Так, если принять для режима за время движения якоря $\psi_n/\psi_k = 0,8$ и $i_k/i_n = 0,4$, то в соответствии с (13) КПД составит $\eta_5 = 0,56$, а коэффициент восстановления магнитной энергии согласно (14) $k_{B5} = -1,7$. Анализ режима показы-

вает, что за время движения якоря энергия магнитного поля системы по отношению к начальной уменьшилась на 68 %, из которой 40 % энергии затрачено на совершение механической работы и 28 % энергии переданы источнику.

Заключение

Основным выводом по работе следует указать предпочтительность в использовании отдельных режимов энергопреобразования, поддерживающих предельные значения КПД электромагнитного двигателя на дискретном интервале движения якоря.

Значения КПД без учета тепловых потерь для некоторых режимов энергопреобразования теоретически может составлять до 100 %, однако реализация подобных режимов возможна только при наличии специальных средств автоматического управления.

Для случая прямого включения ЭМД, т. е. при отсутствии средств контроля и управления, теоретическое значение КПД режимов энергопреобразования не может превышать 50 %-го порога при однократном процессе ускорения якоря в магнитном поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П.** Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
2. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.
3. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
4. **Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
5. **Угаров Г.Г., Мошкин В.И.** Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
6. **Певчев В.П., Ивашин В.В.** Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во Тольят. гос. ун-та, 2012. – 142 с.
7. **Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю.** Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.
8. **Усанов К.М., Каргин В.А.** Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.
9. **Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.** Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
10. **Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р.** Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
11. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
12. **Нейман Л.А., Петрова А.А., Нейман В.Ю.** К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 62–64.

13. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов / под общ. ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
14. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (97). – С. 214–218.
15. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 21–24.
16. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
17. **Нейман В.Ю., Петрова А.А.** Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
18. **Усанов К.М., Каргин В.А., Волгин А.В.** Оценка эффективности энергопреобразований в электромагнитной ударной машине с упругим возвратным элементом // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2008. – № 1. – С. 86–87.
19. **Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О.** Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 119 с.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
21. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с инерционным реверсом бойка // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–79.
22. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
23. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
24. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.
25. **Нейман В.Ю.** Энергопреобразование ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 135–148.
26. **Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
27. **Родштейн Л.А.** Электрические аппараты: учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
28. **Малинин В.И., Ряшенцев А.Н., Толстик А.И.** Оценка динамического КПД электромагнита с ненасыщенной магнитной системой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1989. – № 9. – С. 86–90.
29. **Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н.** Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
30. **Мошкин В.И., Угаров Г.Г.** Исследование комбинированных магнитных циклов электромеханических преобразователей электромагнитного типа // Импульсный электромагнитный привод / под общ. ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1988. – С. 38–44.
31. **Ивашин В.В.** Об оптимальном режиме работы электромагнитов с точки зрения увеличения их удельной импульсной мощности // Силовые полупроводниковые и импульс-

- ные электромеханические преобразовательные устройства / под общ. ред. В.В. Ивашина. – Куйбышев: Изд-во КАИ, 1976. – С. 24–28.
32. **Бондалетов В.Н.** Определение электромагнитных сил, их работы и электромеханического к.п.д. в контурах с токами // *Электричество*. – 1966. – № 1. – С. 57–60.
 33. **Угаров Г.Г.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели с повышенными силовыми и энергетическими показателями: автореф. дис. ...д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1992. – 46 с.

CONDITIONS OF ACHIEVING ELECTROMAGNETIC MOTOR MAXIMAL EFFICIENCY

Neyman V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Energy conversion modes of the electromagnetic motor when the armature is accelerated are established to be preferable with respect to maximal efficiency. A non-saturated electromagnetic motor where the armature is once accelerated in the magnetic field generated by the inductor is considered to be a research subject. New relations are obtained for the analysis of the conditions when the maximal efficiency is achieved with respect to the energy conversion mode and the elementary magnetic cycle configuration. It is shown that the efficiency of about 100 % can be theoretically achieved only if special automatic control means are used. The efficiency cannot be more than a theoretical limit of 50 % if there is no automatic control. The obtained results and conclusions for separate energy conversion modes are well agreed with the results obtained by other authors in the past.

Keywords: electromagnetic motor, efficiency, energy conversion mode, elementary magnetic cycles, recovery coefficient of magnetic energy.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-45-59

REFERENCES

1. Ivashin V.V., Kudinov A.K., Pevchev V.P. Elektromagnitnye privoda dlya impul'snykh i vibroimpul'snykh tekhnologii [Electromagnetic drive for pulse technology and vibroimpulsnyh]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
2. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Nizkochastotnye udarnye elektromagnitnye mashiny i tekhnologii [Low-frequency impact electromagnetic machines and technologies]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 256–259.
3. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovanie dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsionnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109–110.
4. Simonov B.F., Neyman V.Yu., Shabanov A.S. Impul'snyi lineinyi elektromagnitnyi privod dlya skvazhinnogo vibroistochnika [Pulsed linear electromagnetic drive for downhole vibration source]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 2017, no. 1, pp. 118–126.
5. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impul'snykh sistem [Prospects of electromagnetic pulse of power systems]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Kurgan State University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 29, pp. 88–90.
6. Pevchev V.P., Ivashin V.V. Proektirovanie moshchnykh korotkokhodovykh impul'snykh elektromagnitnykh dvigatelei [Designing powerful pulsed electromagnetic short-stroke engine]. *Tol'yatti, Togliatti State University Publ.*, 2012. 142 p.
7. Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. Strukturnyi analiz sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Structural analysis of synchronous electromagnetic shock machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy [Automated electromechanical systems]*. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.

8. Usanov K.M., Kargin V.A. Silovaya elektromagnitnaya impul'snaya sistema dlya pogruzheniya sterzhnevyykh elementov v grunt [Power electromagnetic pulse system for inserting rod elements into soil]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova – The Bulletin of Saratov state agrarian university in honor of N.I. Vavilov*, 2005, no. 3, pp. 59–61.
9. Ryashentsev N.P., Ryashentsev V.N. *Elektromagnitnyi privod lineinykh mashin* [The electromagnetic linear actuator machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 153 p.
10. Sattarov R.R., Ismagilov F.R. Periodicheskie rezhimy v elektromagnitnykh vibratsionnykh preobrazovatelyakh [Periodic modes in the electromagnetic vibration converters]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2010, vol. 14, no. 1 (36), pp. 50–55.
11. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovaniye protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovoде [Modelling of processes in the electromagnetic vibration transducer with energy losses in the yoke]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki – Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 73–78.
12. Neyman L.A., Petrova A.A., Neyman V.Yu. K otsenke vybora tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [On the electromagnet type selection by a design factor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2012, no. 6, pp. 62–64.
13. Neyman V.Yu. Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyaniye sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [Influence of major proportions electromagnets sizes on the value of constructive factor and indicator of profitability]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.
14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primeneniye metoda provodimostey dlya ucheta sily odnostoronnogo magnitnogo prityazheniya asimmetrichnogo elektromagnita [Application conductivities method to account for the strength of a unilateral asymmetric magnetic attraction of the electromagnet]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, no. 2 (97), pp. 214–218.
15. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Raschet pokazatelya ekonomichnosti silovogo elektromagnita postoyannogo toka s pomoshch'yu modelirovaniya magnitnogo polya [The calculation of the efficiency indicator of a DC power electromagnet using magnetic field simulation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transportation: science, technology, management*, 2008, no. 6, pp. 21–24.
16. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochiy tsikl dvukhkatushechnoy sinkhronnoy elektromagnitnoy mashiny so svobodnym vybegom boika [Operation cycle of double winding synchronous electromagnetic machine with head free running out]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
17. Neyman V.Yu. Petrova A.A. Sravneniye sposobov forsirovki impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigateley [Comparison of forcing methods of pulsed linear electromagnetic motors]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50.
18. Usanov K.M., Kargin V.A., Volgin A.V. Otsenka effektivnosti energopreobrazovaniya v elektromagnitnoy udarnoy mashine s uprugim vozvratnym elementom [Evaluating the effectiveness of energy conversion in the electromagnetic shock machine with a resilient return element]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2008, no. 1, pp. 86–87.
19. Manzhosov V.K., Lukutina N.O., Nevenchannaya T.O. *Dinamika i sintez elektromagnitnykh generatorov silovykh impul'sov* [The dynamics and synthesis of electromagnetic power pulse generators]. Frunze, Ilim Publ., 1985. 119 p.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatelnogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik MEI – MPEI Vestnik*, 2016, no. 6, pp. 64–71.

21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya s inertsionnym reversom boika [A dynamic model of a two-inductor synchronous impact electromagnetic machine with an inertial head reverse]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of science*, 2016, no. 4 (33), pp. 61–79.
22. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic press]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
23. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Ways to improve the energy performance of single-winding pulsed devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transportation: science, technology, management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
24. Aksyutin V.A., Neyman L.A., Neyman V.Yu., Skotnikov A.A. Pressovoe oborudovanie s lineinym elektromagnitnym privodom dlya mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov udarnoi sborki i shtampovki melkikh izdelii [Press equipment with a linear electromagnetic drive for the mechanization of technological processes of shock assembly and stamping of small products]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2015, no. 2, pp. 220–224.
25. Neyman V.Yu. Energopreobrazovanie nenasyshchennogo elektromagnitnogo dvigatelya pri otryve yakorya vneshnimi silami [Energy conversion in a non-saturated electromagnetic motor with the armature detached by external forces]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3 (76), pp. 135–148.
26. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.
27. Rodshtein L.A. *Elektricheskie apparaty* [Electrical apparatus]. 3rd ed. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 304 p.
28. Malinin V.I., Ryashentsev A.N., Tolstik A.I. Otsenka dinamicheskogo KPD elektromagnita s nenasyshchennoi magnitnoi sistemoi [Evaluation of the dynamic efficiency of an electromagnet with an unsaturated magnetic system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 1989, no. 9, pp. 86–90. (In Russian).
29. Ryashentsev N.P., Miroshnichenko A.N. *Vvedenie v teoriyu energopreobrazovaniya elektromagnitnykh mashin* [Introduction to the theory of energy conversion of electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 160 p.
30. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Issledovanie kombinirovannykh magnitnykh tsiklov elektromekhanicheskikh preobrazovatelei elektromagnitnogo tipa [Research of combined magnetic cycles of electromechanical converters of electromagnetic type]. *Impul'snyi elektromagnitnyi privod* [Pulsed electromagnetic drive]. Novosibirsk, IGD SO AN SSSR Publ., 1988, pp. 38–44.
31. Ivashin V.V. Ob optimal'nom rezhime raboty elektromagnitov s tochki zreniya uvelicheniya ikh udel'noi impul'snoi moshchnosti [On the optimal mode of operation of electromagnets in terms of increasing their specific pulse power]. *Silovye poluprovodnikovye i impul'snye elektromekhanicheskie preobrazovatel'nye ustroystva* [Power semiconductor and pulsed electromechanical converting devices]. Kuibyshev, 1976, pp. 24–28.
32. Bondaletov V.N. Opredeleniye elektromagnitnykh sil, ikh raboty i elektromekhanicheskogo k.p.d. v konturakh s tokami [Determination of electromagnetic forces, their work and electromechanical efficiency in circuits with currents]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 1966, no. 1, pp. 57–60.
33. Ugarov G.G. *Impul'snye lineinye elektromagnitnye dvigateli s povyshennymi silovymi i energeticheskimi pokazatelyami*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Pulsed linear electromagnetic motors with increased power and energy indicators. Author's abstract of Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 1992. 46 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Нейман Владимир Юрьевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор и соавтор более 200 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

Neyman Vladimir Yurievich (b. 1960), D.Sc. (Eng.), professor, head of the Department of Electrical Engineering Fundamentals, Novosibirsk State Technical University. His research interests include power electromagnetic pulse systems. He is the author and co-author of over 200 scientific and educational manuals. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru).

*Статья поступила 10 декабря 2019 г.
Received December 10, 2019*

To Reference:

Neyman V.Yu. Usloviya realizatsii predel'nogo KPD elektromagnitnogo dvigatelya [Conditions of achieving electromagnetic motor maximal efficiency]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1-2 (46-47), pp. 45–59. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-45-59.