

УДК 621.313.17

DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-135-148

Энергопреобразование ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами*

В.Ю. НЕЙМАН

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

nv.nstu@ngs.ru

Для оценки эффективности преобразования энергии механических колебаний в системах с автономным энергоснабжением рассматривается возможность применения линейных генераторов, созданных на основе электромагнитных двигателей возвратно-поступательного действия. В качестве объекта для исследований выступает однокатушечный электромагнитный двигатель постоянного тока, функционирующий в генераторном режиме. В работе рассмотрены вопросы энергопреобразования ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами. В основу анализа при получении энергетических соотношений положен закон сохранения энергии с возможностью получения формул для энергии и сил, присутствующих в статическом режиме. Получены расчетные соотношения, характеризующие процесс движения якоря под действием внешней механической силы, сопровождаемый генераторным эффектом и частичной передачей энергии источнику. Для случая линейной среды установлена предпочтительность в использовании элементарных магнитных циклов, характеризующих режимы энергопреобразования и передачу энергии при движении якоря под действием вынуждающей внешней силы. Полученные результаты необходимо учитывать при проектировании линейных генераторов с электромагнитным возбуждением для повышения эффективности их использования в системах с автономным энергоснабжением.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, линейный генератор, электромагнитный двигатель, закон сохранения энергии, энергопреобразование, элементарный магнитный цикл

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах автономного энергоснабжения для преобразования энергии механических колебаний применяются линейные электрические генераторы малой и средней мощности [1–5].

Перспективность их использования определяется высокой эффективностью, надежностью, простотой конструкции и минимальными затратами на обслуживание. Из всего многообразия различных видов линейных генерато-

* *Статья получена 27 марта 2019 г.*

ров особенно выделяются магнитоэлектрические генераторы линейного или возвратно-поступательного действия, использующие для возбуждения магнитного поля в индукторе постоянные магниты на основе редкоземельных материалов [6–12]. Использование в конструкции постоянных магнитов в некоторой степени позволяет улучшить массогабаритные показатели генератора [13].

Если массогабаритные показатели рассматривать как второстепенные, то определенный практический интерес могут представлять линейные генераторы с электромагнитным возбуждением, отличающиеся еще более простой конструкцией, меньшей стоимостью при производстве и возможностью регулирования в широких пределах потока возбуждения [14]. Однако ввиду повышенных массогабаритных показателей и малой их изученности широкого практического применения они не получили.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ существующих технических решений показал, что в самом простейшем варианте исполнения в роли такого генератора может выступать электромагнитный двигатель (ЭМД) или обычный электромагнит (ЭМ) постоянного тока, в которых отрыв якоря (сердечника) внешними силами сопровождается генераторным эффектом. При этом часть энергии внешнего источника силы переходит в магнитную энергию преобразователя и его цепи питания [15].

Машины и механизмы, созданные на базе ЭМД и ЭМ, с успехом применяются сегодня в различных отраслях промышленности [16–20]. Также совершенствуются методы по их расчету и проектированию [21–29].

Пример подобного ЭМД, используемого в общей структуре линейного генератора с электромагнитным возбуждением, и обозначения основных элементов его конструкции приведены на рис. 1.

При отрыве якоря работа, совершаемая внешними силами, преобладает над электромагнитной силой и сопровождается увеличением воздушного рабочего зазора.

По аналогии с двигательным режимом генераторный режим также характеризуется переходной динамической характеристикой намагничивания, которая формируется из совокупности промежуточных элементарных магнитных циклов в координатах «потокосцепление – ток» $\psi = f(i)$ (рис. 2) [30, 31].

Основными показателями, способствующими такому разделению, являются знаки приращения потокосцепления [32]. Можно заключить, что процессы, происходящие с уменьшением потокосцепления ($d\psi < 0$), сопровождаются передачей энергии в сеть. Напротив, процессы, происходящие с увеличением потокосцепления ($d\psi > 0$), сопровождаются потреблением энергии из сети.

Увеличение рабочего воздушного зазора в соответствии с направлением указателя в виде стрелки на рис. 2 свидетельствует о том, что электромагнитные силы совершают отрицательную работу, связанную с перемещением якоря и преодолением электромагнитной силы. Это означает, что совершает-

ся работа внешних сил по преодолению электромагнитного тягового усилия (генераторный режим).

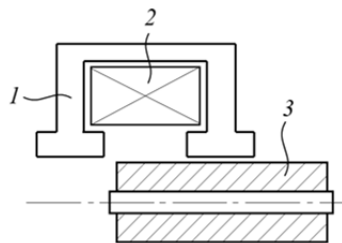


Рис. 1. Линейный генератор на примере ЭМД:

1 – магнитопровод; 2 – катушка возбуждения; 3 – якорь

Fig. 1. A linear generator on the example of EMM:

1 is a magnetic conductor; 2 is an excitation coil; 3 is the armature

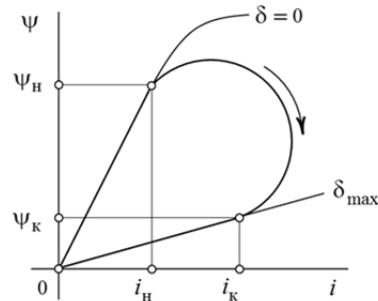


Рис. 2. Переходная динамическая характеристика намагничивания:

Ψ_H, i_H – начальные значения потокосцепления и тока; Ψ_K, i_K – конечные значения потокосцепления и тока

Fig. 2. The transient dynamic magnetization characteristic:

Ψ_b, i_b are initial values of flux linkage and current; Ψ_e, i_e are final values of flux linkage and current

Также по аналогии с двигательным режимом всё многообразие процессов энергопреобразования, обладающих общими свойствами, можно разделить на несколько групп (режимов), характеризующих эффект генерации при отрыве якоря (рис. 3): 1) при одновременном увеличении тока и потокосцепления (рис. 3, а); 2) при увеличивающемся токе и постоянном потокосцеплении (рис. 3, б); 3) при увеличивающемся токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, в); 4) при постоянном токе и уменьшающемся потокосцеплении (рис. 3, г); 5) при одновременном уменьшении тока и потокосцепления (рис. 3, д).

В настоящей работе рассматриваются вопросы энергопреобразования ненасыщенного ЭМД постоянного тока, сопровождаемые генераторным эффектом при отрыве якоря внешними силами.

При решении этих вопросов потерями энергии на активных сопротивлениях, вихревыми токами и явлением гистерезиса пренебрегаем. Также полагаем, что энергопреобразование рассматривается для случая линейной среды и определяется только переходной кривой динамической характеристики намагничивания, которая формируется из совокупности элементарных магнитных циклов [30]. Будем считать, что каждый из этих циклов характеризует процесс движения якоря под действием внешней силы. В конкретном случае электромагнитные силы совершают только отрицательную работу по перемещению якоря, так как внешняя механическая сила преобладает над электромагнитной силой, что соответствует генераторному режиму.

При выводе энергетических соотношений воспользуемся законом сохранения энергии с возможностью получения формул для энергии и сил, присущих статическим режимам [33, 34]. Аналогичный подход применялся авто-

рами работы [35, 36] при выводе энергетических соотношений применительно к двигательному режиму.

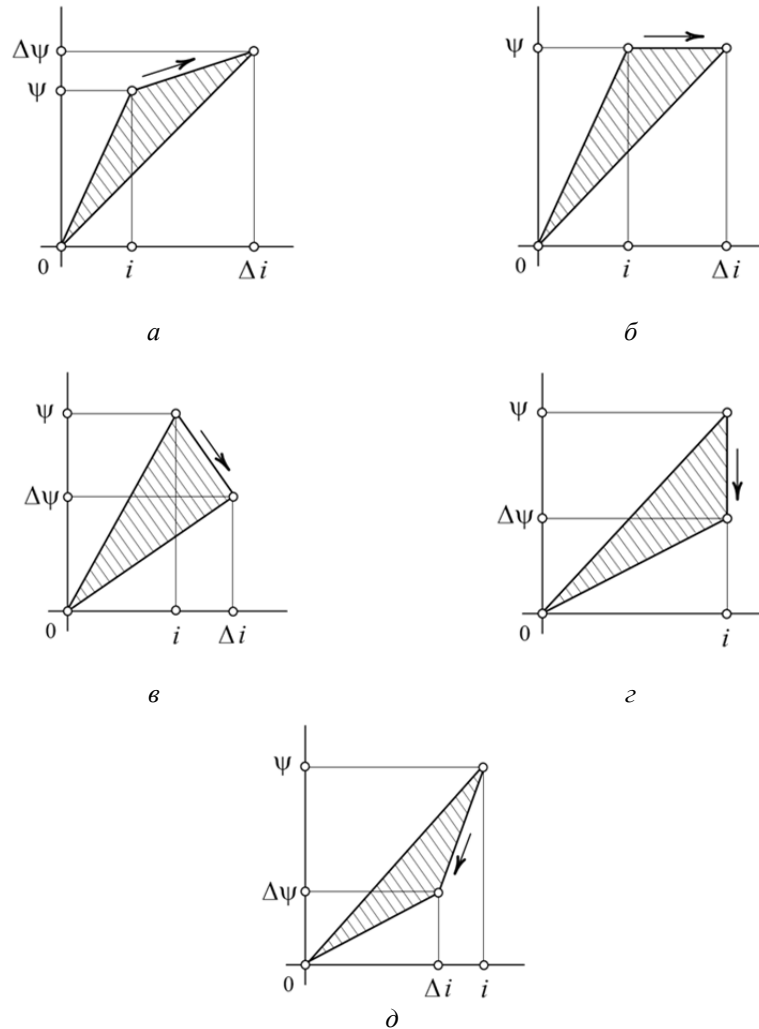


Рис. 3. Элементарные магнитные циклы

Fig. 3. Elementary magnetic cycles

2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Очевидно, что все процессы энергопреобразования (рис. 3), протекающие с уменьшением потокоцепления ($d\psi < 0$), сопровождаются отдачей энергии источнику посредством питающей цепи ЭМД. За время dt источнику возвращается энергия $dW_{\text{ЭМ}}$ за вычетом дополнительных тепловых потерь dW_Q на активном сопротивлении:

$$dW_{\text{ЭМ}} - dW_Q = dW_{\text{эл}}.$$

Энергия движения $dA_{\text{мех}}$ при отрыве якоря внешними силами переходит в энергию магнитного поля. Соотношение между магнитной и электромагнитной энергиями

$$dA_{\text{мех}} + dW_{\text{м}} = dW_{\text{эм}}.$$

Дифференциал энергии электромагнитного поля, вызванного уменьшением потокосцепления и изменением знака электродвижущей силы:

$$dW_{\text{эм}} = -eidt = -id\psi(i, x) = -i \frac{\partial \psi}{\partial i} di - i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx.$$

В первом режиме энергопреобразования (рис. 3, а) при отрыве якоря одновременно увеличиваются потокосцепление и ток. Возможность передачи энергии источнику здесь исключается ($d\psi > 0$). Характерной особенностью режима является потребление электромагнитной энергии от источника питания.

Работа внешних сил и энергия, потребляемая от источника за время движения якоря, затрачиваются на изменение энергии магнитного поля, тем самым пополняя существующий запас магнитной энергии.

Дифференциал энергии магнитного поля

$$\begin{aligned} dW_{\text{м1}} = \Delta W_{\text{м1}} &= \frac{1}{2}(\psi + \Delta\psi)(i + \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi = \frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i = \\ &= \frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di = \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (1)$$

Элементарная работа, вызванная внешним воздействием, с учтенным изменением знака электродвижущей силы

$$\begin{aligned} dA_{\text{мех1}} = dW_{\text{эм}} - dW_{\text{м1}} &= \\ &= i \frac{\partial \psi}{\partial i} di + i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = \\ &= \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = \frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (2)$$

Усиление, возникающее при отрыве якоря внешними силами:

$$F_1 = \frac{dA_{\text{мех1}}}{dx} = \frac{1}{2}i \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dx} + \frac{1}{2} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx} = \frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (3)$$

Для второго режима энергопреобразования (рис. 3, б) энергия источнику не передается и не потребляется от источника, поскольку $dW_{\text{эм}} = id\psi = 0$ ($\psi = \text{const}$).

Дифференциал энергии магнитного поля

$$dW_{\text{м2}} = \Delta W_{\text{м2}} = \frac{1}{2}\psi(i + \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi = \frac{1}{2}\psi\Delta i = \frac{1}{2}\psi di. \quad (4)$$

Работа внешних сил затрачивается только на изменение энергии магнитного поля, запасаемого системой в виде магнитной энергии, и выражается зависимостью

$$dA_{\text{мех}} = -dW_{\text{м2}} = -\frac{1}{2}\psi di. \quad (5)$$

Усилие при отрыве якоря внешними силами

$$F_2 = \frac{dA_{\text{мех2}}}{dx} = -\frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (6)$$

В третьем режиме энергопреобразования (рис. 3, в) дифференциал энергии магнитного поля

$$\begin{aligned} dW_{\text{м3}} = \Delta W_{\text{м3}} &= \frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)(i + \Delta i) - \frac{1}{2}\psi i = -\frac{1}{2}i\Delta\psi + \frac{1}{2}\psi\Delta i = \\ &= -\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (7)$$

Элементарная работа внешнего источника механической силы с учетом изменением знака электромагнитной энергии

$$\begin{aligned} dA_{\text{мех3}} = dW_{\text{эм}} - dW_{\text{м3}} &= \\ &= -i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (8)$$

Усилие, возникающее при отрыве якоря внешними силами:

$$F_3 = \frac{dA_{\text{мех3}}}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dx} - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (9)$$

В данном режиме энергопреобразования энергия, переходящая источнику, может превышать затраты энергии на работу внешних сил или быть значительно меньшей затрат этой энергии, что в существенной степени зависит от значения дифференциала магнитной энергии $dW_{\text{м3}}$. Например, в случае выполнения условия $id\psi = \psi di$ приращение энергии магнитного поля полностью отсутствует ($dW_{\text{м3}} = 0$), при этом энергия, переходящая источнику, в точности соответствует энергии, затраченной на работу внешних сил при отрыве якоря.

В четвертом режиме энергопреобразования (рис. 3, г) энергия, поступающая в систему от внешнего силового воздействия, находится в равных долях с энергией, приходящейся на изменение энергии магнитного поля, т. е. всегда выдерживается условие

$$dA_{\text{мех4}} = -dW_{\text{м4}}.$$

Генераторный эффект поддерживается как за счет убывания энергии магнитного поля ($d\psi < 0$), так и за счет энергии внешней силы при отрыве якоря.

Дифференциал энергии магнитного поля (рис. 3, з) выражается зависимостью

$$\begin{aligned} dW_{M4} = \Delta W_{M4} &= \frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)i - \frac{1}{2}i\psi = -\frac{1}{2}i\Delta\psi = -\frac{1}{2}id\psi = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx. \end{aligned} \quad (10)$$

Электродвижущая сила также меняет свой знак. Элементарная работа по перемещению якоря, вызванная внешним воздействием:

$$\begin{aligned} dA_{Mех4} = dW_{эм} - dW_{M4} &= -i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx = -\frac{1}{2}id\psi. \end{aligned} \quad (11)$$

Соответствующее режиму усилие при отрыве якоря

$$F_4 = \frac{dA_{Mех4}}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dx} - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx}. \quad (12)$$

Для пятого режима энергопреобразования (рис. 3, д) дифференциал энергии магнитного поля будет выражаться зависимостью

$$\begin{aligned} dW_{M5} = \Delta W_{M5} &= \frac{1}{2}(\psi - \Delta\psi)(i - \Delta i) - \frac{1}{2}i\psi = -\frac{1}{2}i\Delta\psi - \frac{1}{2}\psi\Delta i = \\ &= -\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx - \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (13)$$

Элементарная работа, вызванная внешним силовым воздействием:

$$\begin{aligned} dA_{Mех5} = dW_{эм} - dW_{M5} &= \\ &= -i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di + \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di = \\ &= -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} di - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} dx + \frac{1}{2}\psi di = -\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di. \end{aligned} \quad (14)$$

Возникающее усилие при отрыве якоря

$$F_5 = \frac{dA_{Mех5}}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dx} - \frac{1}{2}i \frac{\partial\psi}{\partial x} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx} = -\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}. \quad (15)$$

Особенность режима заключается в том, что источнику в форме электрической энергии возвращается энергия, которая может превышать работу внешних сил, и связано это с процессом убывания тока.

Выполненный анализ режимов энергопреобразования ненасыщенного ЭМД, сопровождаемых генераторным эффектом при отрыве якоря внешними силами, в соответствии с полученными выражениями (1)–(15) представлен в таблице.

Параметры режимов энергопреобразования ЭМД

Parameters of EMM energy conversion modes

| Режим | Дифференциал энергии магнитного поля, dW_M | Элементарная работа внешних сил, $dA_{\text{мех}}$ | Средняя сила, действующая на якорь, F |
|-------|--|--|--|
| 1 | $\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di$ | $\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di$ | $\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$ |
| 2 | $\frac{1}{2}\psi di$ | $-\frac{1}{2}\psi di$ | $-\frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$ |
| 3 | $-\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di$ | $-\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di$ | $-\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} - \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$ |
| 4 | $-\frac{1}{2}id\psi$ | $-\frac{1}{2}id\psi$ | $-\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx}$ |
| 5 | $-\frac{1}{2}id\psi - \frac{1}{2}\psi di$ | $-\frac{1}{2}id\psi + \frac{1}{2}\psi di$ | $-\frac{1}{2}i \frac{d\psi}{dx} + \frac{1}{2}\psi \frac{di}{dx}$ |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реализации генераторного эффекта с передачей части энергии в цепь питания реальный интерес может представлять переходная динамическая характеристика намагничивания, в основе формирования которой используются элементарные магнитные циклы при увеличивающемся токе и уменьшающемся потокоцеплении (рис. 3, в), при постоянном токе и уменьшающемся потокоцеплении (рис. 3, г), а также при одновременном уменьшении тока и потокоцепления (рис. 3, д).

Дальнейшее повышение эффективности процесса энергопреобразования непосредственно связано с необходимостью реализации указанной переходной характеристики намагничивания на интервале движения якоря под действием вынуждающей внешней силы, что является очевидным только с использованием специальных средств регулирования.

Эффект генерации и передачи энергии по цепям питания при отрыве якоря внешними силами очевиден и в случае нелинейной среды. Также для случая нелинейной среды сохраняется предпочтительность в использовании магнитных циклов или их комбинаций, представленных на рис. 3, в–д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Духанин В.И., Кецарис А.А.* Анализ рабочего процесса линейного генератора с возвратно-поступательным движением // Известия МГТУ МАМИ. – 2012. – Т. 1, № 2 (14). – С. 104–110.
2. Автономные системы электропитания на основе синхронных генераторов возвратно-поступательного движения / В. Климов, А. Демьянов, И. Царьков, С. Климова // Силовая электроника. – 2016. – Т. 4, № 61. – С. 49–54.
3. *Сафонов В.А., Белецкий И.Л., Кузнецов П.Н.* Термомеханический двигатель с линейным генератором, работающий по циклу Стирлинга // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 60–62.
4. *Нуен Ф.Т., Крамаров А.С.* Линейные электрические генераторы возвратно-поступательного движения для энергосиловых установок на основе двигателя внутреннего сгорания со свободным поршнем. Состояние вопроса // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 27–37.
5. *Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.* Линейный синхронный генератор мощностью 30 кВт для волновой энергетики // Электротехника. – 2017. – № 2. – С. 8–14.
6. Линейные магнитокоммутационные генераторы для систем электропитания автономных объектов / В.Е. Высоцкий, А.П. Синицин, В.С. Пенетов, Е.С. Юзефпольская // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 26–31.
7. *Соколова Е.М., Моцинский Ю.А.* Линейные генераторы с постоянными магнитами возвратно-поступательного движения // Электротехника. – 2018. – № 9. – С. 68–73.
8. Перспективы применения синхронных генераторов с постоянными магнитами и возвратно-поступательным движением индуктора / Г.С. Тамоян, М.В. Афонин, Е.М. Соколова, Тег Ту Мью // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 54–56.
9. *Кондратенко И.П., Рацепкин А.П., Ваццишин Д.Д.* Динамическая модель линейного генератора с постоянными магнитами для преобразования энергии волн // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 113–114.
10. *Бартедьев О.В., Морозкина М.В.* Исследование эффективности линейного генератора, работающего на зарядное устройство // Электротехника. – 1992. – № 8–9. – С. 61–63.
11. *Соколова Е.М., Моцинский Ю.А., Шумов К.В.* Линейный генератор с постоянными магнитами в схеме электрического амортизатора // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 2 (39). – С. 70–74.
12. *Хитерер М.Я., Овчинников И.Е.* Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: Корона принт, 2004. – 368 с.
13. *Сергеенкова Е.В., Федин М.А.* Исследование линейного синхронного генератора с постоянными магнитами, преобразующего энергию колебаний в электрическую // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 13–16.
14. *Менжинский А.Б., Малашин А.Н., Суходолов Ю.В.* Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 118–128.
15. *Ивашин В.В., Плотников С.Б.* Энергетические соотношения электромагнита постоянного тока при отрыве якоря внешними силами // Силовые полупроводниковые и импульсные электромеханические преобразовательные устройства / под общ. ред. В.В. Ивашина. – Куйбышев, 1976. – С. 12–16.
16. 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.
17. *Нейман В.Ю., Петрова А.А.* Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
18. 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.
19. *Нейман В.Ю.* Режимы форсированного аккумулярования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник НГТУ. – 2003. – № 1. – С. 105–112.

20. Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного вибросточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
21. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
22. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 57–62.
23. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
24. 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.
25. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Исследование двухкатушечной синхронной электромагнитной машины с инерционным реверсом бойка // Современные проблемы теории машин. – 2014. – № 2. – С. 109–110.
26. 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.
27. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.
28. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник НГТУ. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256.
29. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40.
30. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
31. 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.
32. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
33. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику. – М.: Энергия, 1969. – 336 с.
34. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
35. 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.
36. Малинин В.И., Ряшенцев А.Н., Толстик А.И. Предельный КПД электромагнита с линейной магнитной системой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1991. – № 4. – С. 72–76.

Нейман Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – силовые электромагнитные импульсные системы. Автор более 200 научных публикаций. E-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Neyman Vladimir Yurievich, D.Sc. (Eng.), professor, head of the department of theoretical fundamentals of electrical engineering in the Novosibirsk State Technical University. The field of his research is power electromagnetic pulse systems. He is the author of more than 200 publications. E-mail: nv.nstu@ngs.ru.

Energy Conversion in a non-saturated electromagnetic motor with the armature detached by external forces*

V. Yu. NEYMAN

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

nv.nstu@ngs.ru

Abstract

The effectiveness of mechanical oscillation energy conversion is estimated in systems with self-contained power supplies when linear generators based on reciprocated electromagnetic motors are applied. The research subject is a single-coil dc electromagnetic motor operating in the generator mode. The paper considers the non-saturated electromagnetic motor energy conversion when the armature is detached by external forces. Expressions for the energy and forces for static modes have been derived from the energy conservation law. The formulas have been obtained for the armature motion caused by the external mechanical force when the “generator” effect and partial energy transmission to the source take place. If the medium is linear, the elementary magnetic cycles describing energy conversion modes and energy transmission when the armature is moved by the external force are preferable. The results obtained should be taken into account when linear generators with electromagnetic excitation are designed as they help to increase the linear generator effectiveness in systems with self-contained power supplies.

Keywords: self-contained power supply, linear generator, electromagnetic motor, energy conservation law, energy conversion, elementary magnetic cycle

REFERENCES

1. Dukhanin V.I., Ketsaris A.A. Analiz rabocheho protsessa lineinogo generatora s vozvratno-postupatel'nym dvizheniem [Analysis of the workflow of linear generator of reciprocating motion type]. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI – News of Moscow State Technical University MAMI*, 2012, vol. 1, no. 2 (14), pp. 104–110.
2. Klimov V., Dem'yanov A., Tsar'kov I., Klimova S. Avtonomnye sistemy elektropitaniya na osnove sinkhronnykh generatorov vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya [Autonomous power supply systems based on synchronous generators of reciprocating motion]. *Silovaya elek-tronika – Power electronics*, 2016, vol. 4, no. 61, pp. 49–54.
3. Safonov V.A., Beletskii I.L., Kuznetsov P.N. Termomekhanicheskii dvigatel' s lineinym generatorom, rabotayushchii po tsiklu Stirlinga [Thermomechanical motor with linear generator, working on the Stirling cycle]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2014, no. 4, pp. 60–62.
4. Nguen F.T., Kramarov A.S. Lineinye elektricheskie generatory vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya dlya energosilovykh ustanovok na osnove dvigatelya vnutrennego sgoraniya so svobodnym porshnem. Sostoyanie voprosa [Linear electric generator of reciprocating motion for power-generating plants based on an internal-combustion engine with a free-piston. The state of the question]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 27–37. (In Russian).
5. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Lineinyi sinkhronnyi generator moshchnost'yu 30 kVt dlya volnvoi energetiki [30 kW linear synchronous generator for wave power]. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2017, no. 2, pp. 8–14. (In Russian).
6. Vysotskii V.E., Sinitin A.P., Penetov V.S., Yuzefpol'skaya E.S. Lineinye magnetokomm-tatsionnye generatory dlya sistem elektropitaniya avtonomnykh ob"ektov [Linear magneto-switching

* Received 27 March 2019.

generators for power systems of autonomous objects]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2014, no. 5, pp. 26–31. (In Russian).

7. Sokolova E.M., Moshchinskii Yu.A. Lineinye generatory s postoyannymi magnitami vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya [Permanent magnet linear reciprocating linear oscillators]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2018, no. 9, pp. 68–73. (In Russian).

8. Tamoyan G.S., Afonin M.V., Sokolova E.M., Tet Tu M'yu. Perspektivy primeneniya sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami i vozvratno-postupatel'nym dvizheniem induktora [Prospects for the use of synchronous generators with permanent magnets and reciprocating inductor]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2007, no. 11, pp. 54–56.

9. Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P., Vashchishin D.D. Dinamicheskaya model' lineinogo generatora s postoyannymi magnitami dlya preobrazovaniya energii voln [A dynamic model of a linear permanent magnet generator for converting wave energy]. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical Electrodynamics*, 2012, no. 2, pp. 113–114.

10. Barten'ev O.V., Morozkina M.V. Issledovanie effektivnosti lineinogo generatora, rabotayushchego na zaryadnoe ustroystvo [Investigation of the efficiency of a linear generator operating on a charger]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1992, no. 8–9, pp. 61–63. (In Russian).

11. Sokolova E.M., Moshchinskii Yu.A., Shumov K.V. Lineinyi generator s postoyannymi magnitami v skheme elektricheskogo amortizatora [Permanent magnet linear oscillator in electrical shock absorber circuit]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы – Electrotechnical Systems and Complexes*, 2018, no. 2 (39), pp. 70–74.

12. Khiterer M.Ya., Ovchinnikov I.E. *Sinkhronnye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* [Synchronous electric reciprocating machines]. St. Petersburg, Corona print Publ., 2004. 368 p.

13. Sergeenkova E.V., Fedin M.A. Issledovanie lineinogo sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami, preobrazuyushchego energiyu kolebaniy v elektricheskuyu [The study of a linear synchronous generator with permanent magnets that converts the oscillation energy into electrical]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2011, no. 3, pp. 13–16. (In Russian).

14. Menzhinskii A.B., Malashin A.N., Sukhodolov Yu.V. Razrabotka i analiz matematicheskikh modelei generatorov lineinogo i vozvratno-postupatel'nogo tipov s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Development and analysis of mathematical models of linear and reciprocating types of generators with electromagnetic excitation]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 118–128.

15. Ivashin V.V., Plotnikov S.B. Energeticheskie sootnosheniya elektromagnita postoyannogo toka pri otryve yakorya vneshnimi silami [The energy ratio of the DC electromagnet at the anchor detachment by external forces]. *Silovye poluprovodnikovye i impul'snye elektromekhanicheskie preobrazovatel'nye ustroystva* [Power semiconductor and pulsed electromechanical converters]. Kuibyshev, 1976, pp. 12–16.

16. 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.

17. Neyman V.Yu. Petrova A.A. Sravnenie sposobov forsirovki impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelei [Comparison of forcing methods of pulsed linear electromagnetic motors]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 47a–50.

18. 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.

19. Neyman V.Yu. Rezhimy forsirovannogo akkumulirovaniya magnitnoy energii v impul'snykh lineinykh elektromagnitnykh dvigatelyah [Modes of accelerated accumulation of magnetic energy in a pulse of electromagnetic linear motors]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2003, no. 1, pp. 105–112.

20. Simonov B.F., Neiman V.Yu., Shabanov A.S. Impul'snyi lineinyi elektromagnitnyi privod dlya skvazhinogo 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.

21. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [About the method of choosing the type of electromagnet according to the values of the design factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2011, no. 2, pp. 310–313.

22. Malinin L.I., Neiman V.Yu. Opredelenie napryazheniya preobrazovaniya energii i elektromagnitnykh sil v elektromekhanicheskikh sistemakh [Determination of the voltage of energy conversion and electromagnetic forces in electromechanical systems]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2008, no. 6, pp. 57–62.

23. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Vliyaniye sootnoshenii glavnykh razmerov elektromagnitov na znacheniya konstruktivnogo faktora i pokazatelya ekonomichnosti [The influence of the ratio of the main dimensions of the electromagnets on the values of the design factor and the indicator of efficiency]. *Avtomatizirovannyye elektromekhanicheskiye sistemy [Automated electromechanical systems]*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 177–187.

24. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Primeneniye metoda provodimostei dlya ucheta sily odnostoronnnego 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.

25. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Issledovaniye dvukhkatushechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny s inertsiyonnym reversom boika [Research two-coil synchronous electromagnetic machine with inertial reversal the firing pin]. *Sovremennyye problemy teorii mashin – Modern Problems of Theory of Machines*, 2014, no. 2, pp. 109, 110.

26. 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.

27. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovaniye dinamicheskikh protsessov v elektromagnitnykh preobrazovatelyakh energii dlya sistem generirovaniya silovykh vozdeystvii i nizkochastotnykh vibratsii [Simulation of dynamic processes in the electromagnetic energy converters for generating the force effects systems and low-frequency vibrations]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 154–162.

28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Povysheniye tochnosti analiticheskogo rascheta radial'nykh sil odnostoronnnego magnitnogo prityazheniya nekoaksial'nykh elementov magnetoprovoda [Improving the accuracy of analytical calculation unilateral radial forces of magnetic attraction coaxial magnetic elements]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (58), pp. 246–256.

29. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatel'nogo dvizheniya s uprugimi svyazyami [Mathematical model of electromechanical system with vibrational motion of elastic connections]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 6, pp. 35–40.

30. Ryashentsev N.P., Timoshenko E.M., Frolov A.V. *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* [Theory, calculation and design of electromagnetic percussion machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1970. 260 p.

31. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Issledovaniye kombinirovannykh magnitnykh tsiklov elektromekhanicheskikh preobrazovatelyei 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.

32. Ryashentsev N.P., Miroshnichenko A.N. *Vvedeniye v teoriyu energopreobrazovaniya elektro-magnitnykh mashin* [Introduction to the theory of energy conversion of electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 160 p.

33. Shmitts N., Novotnyi D. *Vvedeniye v elektromekhaniku* [Introduction to electromechanics]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 336 p.

34. Chunikhin A.A. *Elektricheskkiye apparaty* [Electrical apparatus]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 720 p.

35. 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).

36. Malinin V.I., Ryashentsev A.N., Tolstik A.I. Predel'nyi KPD elektromagnita s lineinoi magnitnoi sistemoi [The ultimate efficiency of an electromagnet with a linear magnetic system]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 1991, no. 4, pp. 72–76.

Для цитирования:

Нейман В.Ю. Энергопреобразование ненасыщенного электромагнитного двигателя при отрыве якоря внешними силами // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 3 (76). – С. 135–148. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-135-148.

For citation:

Neyman V.Yu. Energopreobrazovanie nenasyshchennogo elektromagnitnogo dvigatelya pri otrывe 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. DOI: 10.17212/1814-1196-2019-3-135-148.