

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

---

---

УДК 62-185.7

**Юрий Борисович Казаков**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: dr.kazakov@mail.ru

**Иван Сергеевич Егоров**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: elmash@em.ispu.ru

### **Электротехническая система преобразования энергии колебаний на основе совместной работы линейного генератора и магнитожидкостного демпфера**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Линейные генераторы, применяемые, в том числе, как автономные источники электроэнергии и электромеханические амортизаторы, преобразуют энергию колебаний в электрическую энергию с линейным возвратно-поступательным движением индуктора. ЭДС генератора имеет несинусоидальную форму из-за высших пространственных и временных гармоник. Изменение скорости движения индуктора определяется характером воздействующих усилий, но при анализе обычно принимается гармоническим при синусоидальном распределении магнитной индукции. Снижение гармоник ЭДС возможно в электротехнической системе, содержащей линейный генератор и магнитожидкостный демпфер, за счет совершенствования конструкций на основе уточненного анализа.

**Материалы и методы.** Снижение пространственных гармоник ЭДС осуществлено путем совершенствования зубцовой зоны и обмотки якоря, применения магнитной жидкости, снижения временных гармоник за счет обеспечения электротехнической системой необходимого изменения линейной скорости индуктора. Анализ проведен в пакетах ANSYS Electronics Desktop, ANSYS MAXWELL и Elcut.

**Результаты.** Разработана электротехническая система преобразования энергии колебаний на основе линейного генератора и магнитожидкостного демпфера, описаны ее функции, особенности и режимы работы. Разработаны совмещенные конструкции устройства, трехфазная совмещенная обмотка с повышенной на 2 % ЭДС и сниженным на 20 % коэффициентом искажения синусоидальности. Предложены математические аналитическая и численная на основе конечно-элементного моделирования методики расчета характеристик.

**Выводы.** Разработанная электротехническая система позволяет эффективно перераспределять энергию колебаний между линейным генератором и магнитожидкостным демпфером, обеспечивает снижение высших гармоник в ЭДС. Применение управляемой магнитным полем магнитной жидкости позволяет регулировать силу сопротивления движению индуктора, осуществлять управляемую вязкостную диссипацию энергии в слоях жидкости, демпфирование колебаний, увеличивать магнитную проводимость зазора, повышать магнитный поток, снижать пульсации зубцовых гармоник магнитной индукции, повышать теплоотвод от магнитов и обмоток, обеспечивать эффективную смазку.

**Ключевые слова:** энергия колебаний, электротехническая система, линейный генератор, магнитожидкостный демпфер, совмещенная конструкция ЛГ–МЖД, конечно-элементное моделирование

**Yurii Borisovich Kazakov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dr.kazakov@mail.ru

**Ivan Sergeevich Egorov**

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, e-mail: elmash@em.ispu.ru

## Electrical system for converting vibration energy based on the combined operation of a linear generator and a magnetic fluid damper

### Abstract

**Background.** Linear generators used as autonomous sources of electric power and electromechanical shock absorbers convert vibration energy into electric energy with a linear reciprocating motion of the inductor. The EMF of the generator has a non-sinusoidal shape due to higher spatial and temporal harmonics. The change in the speed of the inductor is determined by the nature of the acting forces, but during the analysis, it is usually taken as harmonic with a sinusoidal distribution of magnetic induction. Reduction of EMF harmonics is possible in an electrical system with a linear generator and a magnetic liquid damper, by improving the designs based on a refined analysis.

**Materials and methods.** The reduction of spatial harmonics of EMF has been achieved by improving the tooth zone and armature winding, using magnetic fluid. The reduction of time harmonics has been achieved by providing the electrical system with the necessary change in the linear speed of the inductor. The analysis has been carried out using the ANSYS Electronics Desktop, ANSYS MAXWELL and Elcut packages.

**Results.** An electrical system to convert vibration energy based on a linear generator and a magnetic liquid damper has been developed; its functions, features and operating modes have been described. The authors have developed combined device designs, a three-phase combined winding with an EMF increased by 2 % and a sinusoidal distortion coefficient reduced by 20 %. Mathematical analytical and numerical methods to calculate characteristics based on finite element modeling have been proposed.

**Conclusions.** The developed electrical system allows efficient redistribution of vibration energy between the linear generator and the magnetic liquid damper and ensures reduction of higher harmonics in the EMF. The use of magnetic liquid controlled by a magnetic field allows us to regulate the resistance force to the inductor movement, to control viscous energy dissipation in liquid layers, to dampen vibrations, to increase the magnetic conductivity of the gap and the magnetic flux, to reduce the pulsations of the tooth harmonics of magnetic induction, to increase heat removal from magnets and winding, and to ensure efficient lubrication.

**Key words:** vibration energy, electrical system, linear generator, magnetic fluid damper, combined design of LG-MFD, finite element modeling

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2025.1.067-074

**Состояние вопроса.** Линейные генераторы (ЛГ) применяются в качестве автономных источников электроэнергии для питания территориально удаленных устройств, подводных и космических аппаратов, в качестве электромеханических амортизаторов с электромагнитным демпфированием колебаний кузова при движении транспортных средств и др. ЛГ преобразуют энергию колебаний в электрическую энергию при линейном возвратно-поступательном движении возбужденного индуктора – подвижного элемента (ПЭ), относительно неподвижных якорных обмоток [1–3]. ЛГ могут работать с приводом от резервуаров со сжатым газом при срабатывании дискретных порций газа через мембранно-клапанную систему, или от подвески транспортных средств, или от свободно-поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) без промежуточного кривошипно-шатунного механизма, или от двигателей Стирлинга.

Характер изменения линейной скорости движения ПЭ определяется характером изменения воздействующих усилий и может быть усложненным, как например, в рабочем цикле

поршневых ДВС на этапах сжатия и воспламенения горючей смеси и последующего ее расширения в цилиндрах (рис. 1)<sup>1</sup>.

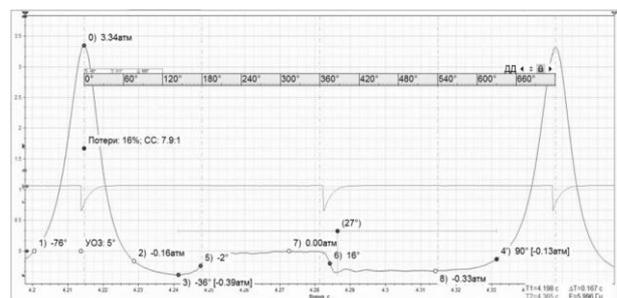


Рис. 1. Оциллограмма изменения давления в цилиндре ДВС а/м ВА3-21114 на этапах рабочего цикла

Генерируемая в обмотке якоря традиционных ЛГ электродвижущая сила (ЭДС) обычно имеет несинусоидальную форму из-за наличия высших пространственных и временных гармоник. Для генераторов с приводом от ДВС коэффициент искажения синусоидальности напряжения

<sup>1</sup> Сайт <https://rotkee.com/ru/waveform-library> (Дата обращения 11.07.2024).

$K_i$  не должен превышать 8 %<sup>2</sup>. В связи с этим целесообразна разработка мероприятий, обеспечивающих снижение высших гармоник в ЭДС ЛГ.

Анализ работы ЛГ часто проводится с допущениями о гармоническом законе изменения линейной скорости движения индуктора ЛГ при возвратно-поступательном движении ПЭ и синусоидальном изменении индукции в зазоре ЛГ [4–5]. Оценка мер по снижению высших гармоник в ЭДС ЛГ должна проводиться на основе уточненных методик расчета ЛГ с использованием численного моделирования магнитного поля в ЛГ с учетом нелинейности магнитных характеристик, зубчатости сердечников и дискретности распределения витков обмотки по пазам, а также с использованием моделирования динамических режимов ЛГ с учетом рабочего цикла источника колебаний и временного характера изменения действующих сил.

**Конструкции и материалы.** Зубчатость сердечника якоря и явнополюсность индуктора ЛГ вызывают при линейном возвратно-поступательном движении ПЭ спектры гармоник магнитной проводимости зазора ЛГ и магнитной индукции, пространственные гармоники ЭДС в дискретно распределенной обмотке якоря. Снижение пульсаций индукции в зазоре ЛГ с приближением распределения индукции к синусоидальному возможно за счет корректного выбора числа пазов, совершенствования конструкции зубцовопазовой зоны и структуры обмотки якоря, заполнения зазора магнитной жидкостью (МЖ).

При неравномерности линейной скорости индуктора в обмотке наводится ЭДС изменяемой величины и частоты, появляются временные гармоники ЭДС. Снижение временных гармоник возможно обеспечением требуемого характера изменения скорости движения индуктора.

Гармоники напряжения ЛГ могут быть сглажены последующим управляемым полупроводниковым выпрямителем в сочетании с преобразователями напряжения и частоты, рассчитанными на полную мощность ЛГ, выходное напряжение которого все равно может быть не строго синусоидальной формы.

Другим способом выработки в ЛГ электроэнергии с синусоидальным напряжением при неравномерной линейной скорости движения ПЭ может быть разделение энергии колебаний на две части: 1) частично на диссипацию энергии в управляемом магнитожидкостном демпфере (МЖД) [6–7]; 2) преобразованием другой части энергии в ЛГ в электрическую энергию требуемых параметров. Совместную работу в отдельных ЛГ и МЖД можно реализовать в составе электротехнической системы преобразования энергии колебаний (рис. 2) [8].

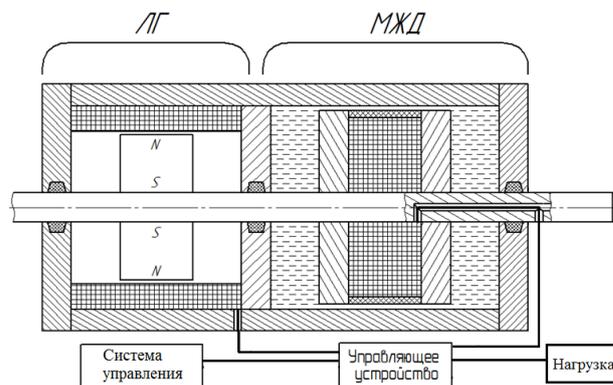


Рис. 2. Совместная работа отдельных линейного генератора и магнитожидкостного демпфера в составе электротехнической системы

Система управления через управляющее устройство перераспределяет энергию колебаний ПЭ между ЛГ и МЖД. Например, при необходимости поглощения излишней механической энергии при ее резком изменении основную роль может брать на себя МЖД. Работа электротехнической системы возможна с реализацией нескольких режимов: рекуперативное торможение (энергия торможения преобразуется в электрическую энергию и выдается в сеть), динамическое торможение, нагрузочный режим (подключение к обмотке ЛГ электрических нагрузок разного характера: активной, индуктивной, емкостной, смешанной), режим активного управления от контроллера.

Так как для наведения в обмотке якоря синусоидальной ЭДС постоянной частоты при синусоидальном изменении индукции в зазоре требуется постоянная скорость движения индуктора, то основная задача системы управления должна заключаться в поддержании как можно дольше на этапах рабочего цикла постоянной скорости движения индуктора с быстрым набором им скорости в начале цикла работы и быстрым же замедлением в конце цикла. Временной график изменения скорости движения индуктора на рабочем цикле должен представлять трапецию с как можно более короткими временными интервалами набора и снижения скорости. В этом случае временные гармоники ЭДС в обмотке якоря ЛГ будут снижены.

Функции ЛГ и МЖД можно совместить в одной цилиндрической конструкции (рис. 3) [9].

Совмещенная конструкция ЛГ–МЖД содержит кольцевые катушки в пазах неподвижного якоря. В индукторе расположены кольцевые полюсы, между которыми располагаются кольцевые постоянные магниты осевой намагниченности. Применение в индукторе магнитов повышает удельную мощность и КПД ЛГ по сравнению с использованием обмотки возбуждения,

<sup>2</sup> ГОСТ Р 53986-2010 «Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателей внутреннего сгорания».

исключает организацию подвода тока в обмотку движущегося индуктора.

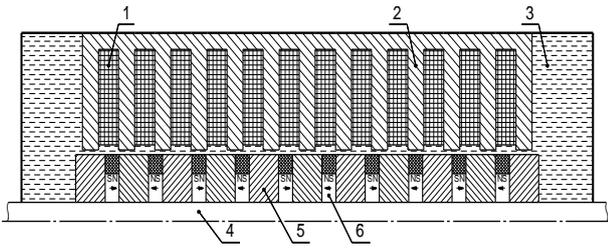


Рис. 3. Совмещенная конструкция ЛГ и МЖД: 1 – обмотка якоря; 2 – сердечник якоря; 3 – МЖ; 4 – шток; 5 – полюс индуктора; 6 – магнит

Использование в ЛГ большого числа полюсов  $2r$  позволяет снизить требуемую толщину спинки якоря и, соответственно, уменьшить внешний диаметр ЛГ, но требует большего числа пазов в удлиненном якоря. Для уменьшения числа пазов в многополюсных ДГ возможно использование кольцевых сосредоточенных обмоток с числом пазов на полюс и фазу  $q < 1$ . Применение распределенной по пазам обмотки позволяет снизить пространственные гармоники в кривой ЭДС. Дополнительное снижение влияния пространственных гармоник ЭДС в трехфазных дискретно распределенных обмотках также возможно путем использования совмещенной двухслойной обмотки [10] с последовательно соединенными частями обмотки, собранными по схемам «звезда» и «треугольник».

Зазор и концевые зоны совмещенной конструкции ЛГ–МЖД заполняются МЖ. Применение МЖД с управляемым магнитным полем МЖ в составе электротехнической системы преобразования энергии колебаний позволяет регулировать силу сопротивления МЖД движению ПЭ, осуществлять управляемую вязкостную диссипацию энергии в слоях МЖ, реализовать демпфирование колебаний. В отличие от применения пружины в электромеханических амортизаторах [3], где возникает механический колебательный процесс, применение МЖ предотвращает возникновение колебательных процессов.

В МЖ при воздействии магнитного поля изменяется вязкость  $\eta$  и положение МЖ. В отличие от ньютоновской жидкости МЖ имеет нелинейную реологическую характеристику, нелинейную зависимость  $\eta$  от концентрации магнитных частиц в МЖ и скорости сдвига слоев МЖ  $\gamma = dv_{\text{МЖ}}/dr$ , где  $v_{\text{МЖ}}$  – скорость течения МЖ;  $r$  – координатная ось, перпендикулярная направлению скорости  $v_{\text{МЖ}}$ . Индуктор и МЖ перемещаются вдоль зазора ЛГ в противоположных направлениях. Скорость течения МЖ  $v_{\text{МЖ}}$  и скорость движения индуктора  $v_{\text{ПЭ}}$  различаются в соотношении различия объемов индуктора и МЖ (обычно  $v_{\text{МЖ}} \gg v_{\text{ПЭ}}$ ).

В статическом режиме при воздействии магнитного поля в МЖ формируется структура из магнитных частиц. Для приведения МЖ в движение необходимо приложить усилие срагивания. Начавшееся от состояния покоя движение МЖ приводит к разрушению структуры частиц и снижению силы сопротивления структуры. С ростом  $v_{\text{МЖ}}$  увеличивается вязкостная сила сопротивления МЖ. МЖ можно рассматривать как вязкопластичное тело с динамическим напряжением сдвига МЖ  $\tau_d$ . При начавшемся движении напряжение сдвига слоев МЖ определяется как  $\tau = (\tau_d + k\gamma)$ , где  $k$  – коэффициент для данной МЖ;  $\eta = \tau/\dot{\gamma}$  – динамическая вязкость.

Воздействие магнитной индукции  $B$  усиливает взаимодействие магнитных частиц в МЖ, увеличивает  $\eta$ ,  $\tau_d$  и  $\tau$  (рост может быть более чем на порядок). Изменение  $B$  и  $v_{\text{МЖ}}$  приводит к изменениям свойств МЖ с миллисекундными задержками. Возникающий при электрической нагрузке ЛГ ток обмотки якоря  $I$  создает подмагничивающее действие на МЖ, изменяя  $\eta$  и  $\tau$ . Таким образом, МЖ обладает нелинейными характеристиками:  $\tau = f(B, v_{\text{МЖ}}, I)$ ,  $\eta = f(B, v_{\text{МЖ}}, I)$  (рис. 4).

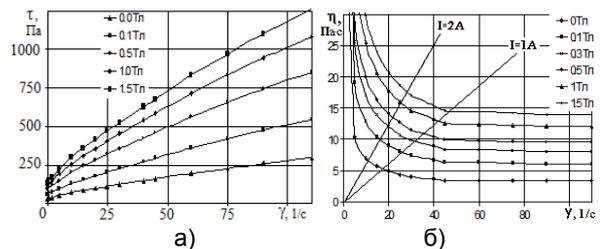


Рис. 4. Магнито-реологические характеристики МЖ: а – напряжение сдвига; б – вязкость

Размещение МЖ в зазоре увеличивает его магнитную проводимость и несколько повышает магнитный поток, снижает пульсации зубцовых гармоник магнитной индукции в зазоре вследствие магнитного сглаживания зубчатости сердечника. МЖ в качестве охлаждающей среды повышает теплоотвод от магнитов и обмоток, улучшает условия охлаждения.

При работе удлиненных ЛГ при значительном рабочем ходе индуктора может возникнуть проблема со смазкой скользящих поверхностей. При прогибе индуктора возможно выдавливание традиционных смазок из зоны трения. Обычные смазки могут обеспечить гидродинамическое «всплывание» перемещающегося индуктора и низкий коэффициент трения  $K_{\text{ТР}}$  в подшипниках скольжения и индуктора только при высоких линейных скоростях ПЭ, для околонулевых скоростей возможно почти «сухое» трение со значительным повышением  $K_{\text{ТР}}$ . Обычные смазки выносятся из зоны трения во время движения индуктора.

МЖ обеспечивает хорошие смазочные свойства [11], обволакивая полюсы и магниты индуктора, зубцы якоря, заполняя неровности

поверхностей скольжения. МЖ удерживается магнитным полем в зазоре, в том числе в зонах трения подшипников скольжения, что обеспечивает жидкостную смазку по всей длине индуктора и его «всплывание» при разных линейных скоростях. При использовании МЖ  $K_{ТР}$  может снизиться на порядок по сравнению с «сухим» трением скольжения [11].

**Расчетные модели и методы.** При работе системы ЛГ–МЖД силе  $F_{ШТ}(t)$  от источника колебаний, заставляющей ПЭ (шток вместе с индуктором ЛГ) совершать движение, противодействуют электромагнитная сила ЛГ  $F_{ЭЛГ}(t)$ , сила сопротивления МЖД  $F_{МЖД}(t)$  и сила трения элементов конструкции ЛГ–МЖД  $F_{ТР}$  (рис. 5).

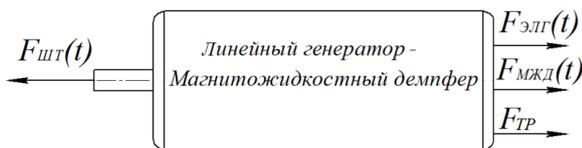


Рис. 5. Баланс сил в системе

Характер перемещения ПЭ массой  $G_{ПЭ}$  с линейной скоростью  $v_{ПЭ}(t)$  в координате  $x_{ПЭ}(t)$  определяется дифференциальным уравнением баланса сил:

$$F_{ПЭ}(t) = F_{ШТ}(t) - F_{ЭЛГ}(t) - F_{МЖД}(t) - F_{ТР} = G_{ПЭ} \frac{dv_{ПЭ}(t)}{dt} = G_{ПЭ} \left( \frac{d^2 x_{ПЭ}(t)}{dt^2} \right). \quad (1)$$

Вызывающая колебания сила приводного механизма  $F_{ШТ}(t)$  задается временной зависимостью (см. рис. 1).

Создаваемая в МЖД сила сопротивления рассчитывается как

$$F_{МЖД}(t) = F_{\tau}(t) + F_{\eta}(t) = \frac{cL_{ПЭ}S_{ПЭ}\tau_d(B, v_{МЖ}, l)}{2R} + \frac{3L_{ПЭ}S_{ПЭ}[Q + R w v_{МЖ}(t)]\eta(B, v_{МЖ}, l)}{2QwR^3}, \quad (2)$$

где  $F_{\tau}(t)$  – сила, вызываемая напряжением сдвига МЖ;  $c$  – константа, зависящая от МЖ и конструкции МЖД;  $R$  – величина зазора;  $L_{ПЭ}$ ,  $S_{ПЭ}$  – длина (рабочий ход, обычно равный длине ПЭ) и сечение ПЭ;  $F_{\eta}(t)$  – сила вязкостного сопротивления трения слоев МЖ;  $w$  – окружная длина щелевого канала МЖД;  $Q$  – расход МЖ;  $l$  – ток якоря ЛГ.

Сила трения составляет

$$F_{ТР} = K_{ТР} (P \pm F_{М.ТЯЖ}), \quad (3)$$

где  $P$  – сила тяжести ПЭ;  $F_{М.ТЯЖ}$  – сила одностороннего магнитного тяжения, возникающая в протяженном ЛГ–МЖД при эксцентриситете  $\varepsilon_0$  воздушного зазора  $\delta$ :

$$F_{М.ТЯЖ} = 294000 DL_{ПЭ}\varepsilon_0 / \delta. \quad (4)$$

Электромагнитная сила ЛГ составляет

$$F_{ЭЛГ}(t) = mB_{\delta}(t) l(t) Wl, \quad (5)$$

где  $B_{\delta}(t)$  – магнитная индукция в зазоре;  $m$  – число фаз;  $l$ ,  $W$  – длина витка и число витков фазы обмотки якоря.

Так как наводимая в проводнике обмотки якоря ЛГ ЭДС определяется как

$$E_{пр} = B_{пр} l_{пр} v_{пр}, \quad (6)$$

где  $B_{пр}$  – магнитная индукция в зоне проводника;  $l_{пр}$  – длина проводника;  $v_{пр}$  – линейная скорость движения проводника, то для заданной  $l_{пр}$  наводимая  $E_{пр}$  будет иметь синусоидальную форму при синусоидальном изменении  $B_{пр}$  и постоянной  $v_{пр}$ . Несинусоидальное распределение  $B_{пр}$  в зазоре ЛГ и/или изменяющаяся во времени  $v_{пр}$  не обеспечивают синусоидальную форму  $E_{пр}$ .

При гармоническом возвратно-поступательном движении ПЭ линейная скорость составляет

$$v_{ПЭ}(t) = v_{ПЭ.max} \sin(\omega_x t), \quad (7)$$

где  $v_{ПЭ.max} = L_{ПЭ}\pi f_x = x_{ПЭ.max}\omega_x$  – амплитуда скорости движения ПЭ;  $\omega_x = 2\pi f_x$  – угловая частота изменения  $x_{ПЭ}(t)$ ;  $f_x$  – механическая частота колебаний штока.

Изменение координаты ПЭ составляет

$$x_{ПЭ}(t) = -\frac{v_{ПЭ.max}}{\omega_x} \cos(\omega_x t). \quad (8)$$

В фазе обмотки якоря ЛГ наводится ЭДС

$$E_{\phi}(t) = B_{\delta}(t) \frac{dx_{ПЭ}(t)}{dt} l W. \quad (9)$$

При синусоидальном изменении индукции в зазоре по длине полюсного деления индуктора магнитная индукция составляет

$$B_{\delta}(t) = -B_{\delta.max} \sin(2\pi f_e t), \quad (10)$$

где  $f_e = f_x L_{ПЭ}/h_{пол}$  – частота изменения  $B_{\delta}$ ;  $B_{\delta.max}$  – максимальная индукция в зазоре;  $h_{пол}$  – длина полюсного деления, при этом соотношение  $L_{ПЭ}/h_{пол}$  должно составлять целое число полюсов  $2p$  ЛГ.

В фазе обмотки якоря наводится ЭДС [5]

$$E_{\phi}(t) = 2B_{\delta.max} \cos\left(\frac{2\pi L_{ПЭ}}{h_{пол}} f_x t\right) L_{ПЭ} \pi \times \times f_x \sin(2\pi f_x t) l W. \quad (11)$$

Произведение двух гармонических функций в (11) – линейной скорости (7) и индукции (10) – дает несинусоидальную форму ЭДС. В трехфазном ЛГ при пространственном сдвиге катушек фаз на  $1/3$  двухполюсного деления ЭДС фаз сдвинуты во времени на  $1/3$  периода и имеют несимметрию по амплитуде (рис. 6).

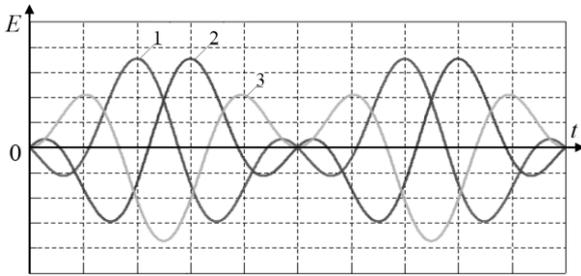


Рис. 6. Графики изменения фазных ЭДС: 1 –  $E_B$ ; 2 –  $E_C$ ; 3 –  $E_A$

Электрический расчет системы «ЛГ–электрическая нагрузка» осуществляется на основе уравнения баланса электрического равновесия. При подключении нагрузки к обмотке ЛГ возникает ток  $I(t)$ , который создает собственное магнитное поле – поле реакции якоря, влияющее на МЖ. Поскольку  $E_\phi$  и  $I$  пропорциональны  $v_{пэ}$  и, соответственно,  $\gamma$ , изменение тока  $I(t)$  приводит к смещению рабочей точки МЖ на магнитореологической характеристике. При регулировке  $I(t)$ , например, в зависимости от условий работы происходит изменение вязкости МЖ  $\eta(\gamma, B, I)$  (рис. 4,б) и усилий ЛГ (5) и МЖД (2).

Совместная работа ЛГ и МЖД имеет свои особенности. В ЛГ при  $v_{пэ} = 0$ ,  $E_\phi = 0$ ,  $I = 0$  и  $F_{элг} = 0$ , т. е. при не начавшем движении ПЭ, ЛГ не создает демпфирующего усилия и подмагничивания МЖ. С ростом  $v_{пэ}$  возрастают  $E_\phi$  и  $I$ , демпфирующее усилие  $F_{элг}$ , возникает подмагничивание МЖ. В МЖД в начале движения штока при  $\gamma = 0$  вследствие структурирования магнитных частиц в МЖ создается значительная  $F_{мжд}$ .

Для расчетного анализа работы электротехнической системы использовалось моделирование магнитных полей и динамических процессов в пакетах ANSYS Electronics Desktop, ANSYS MAXWELL и Elcut.

**Результаты.** Разработан и проанализирован вариант конструкции трехфазного многополюсного ЛГ–МЖД с  $2p = 10$  и  $q = 2/5$ , что обеспечивает небольшой наружный диаметр устройства при малом числе пазов  $Z = 12$ . Рассматривались кольцевые однослойная и двухслойная обмотки, в том числе совмещенная с последовательным соединением схем «звезда» и «треугольник» (рис. 7).

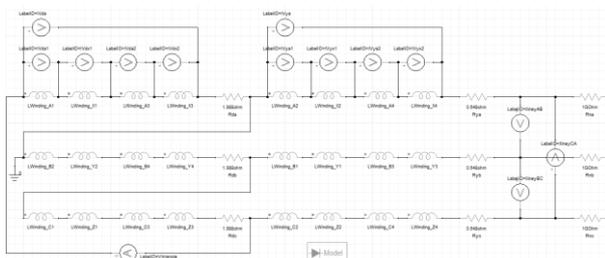


Рис. 7. Расчетная схема совмещенной двухслойной обмотки ЛГ–МЖД

В конструкции использованы редкоземельные магниты, размеры магнитной системы по результатам конечно-элементного моделирования подобраны так, чтобы  $B_{\delta, \max}$  не превышало 0,4 Тл (рис. 8) для возможности реагирования магнитной системы на процессы подмагничивания и размагничивания МЖ током якоря.

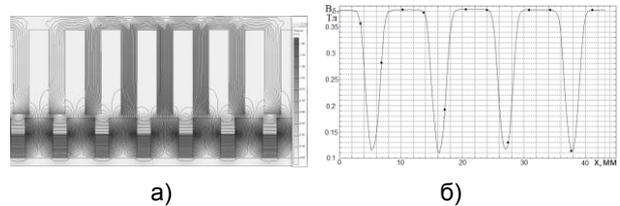


Рис. 8. Распределение линий магнитного потока в ЛГ–МЖД (а) и модуля индукции в зазоре (б)

Результаты конечно-элементного моделирования позволяет рассчитать изменения параметры ЛГ–МЖД. Выяснено, что амплитуда ЭДС ЛГ с совмещенной обмоткой на 2 % больше за счет повышения коэффициента распределения, чем у несовмещенной обмотки, а коэффициент искажения синусоидальности ЭДС для совмещенной обмотки на 20 % меньше, чем для стандартной обмотки.

Работа ЛГ на трехфазный шестидиодный выпрямитель вызывает значительные пульсации выходного напряжения (рис. 9). Результаты анализа частоты и, соответственно, амплитуды наводимой фазной ЭДС (рис. 10) показывают необходимость учета изменений  $f_x(t)$  (7) и, соответственно,  $f_e(t)$  (10) при неравномерности  $v_{пэ}(t)$ .

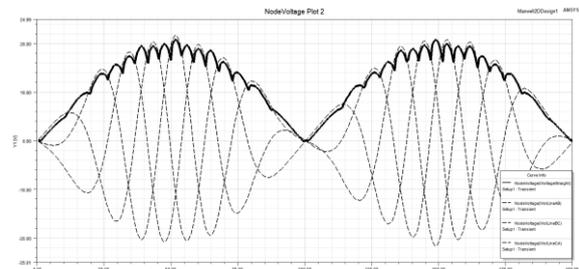


Рис. 9. Линейные и выпрямленное напряжения ЛГ

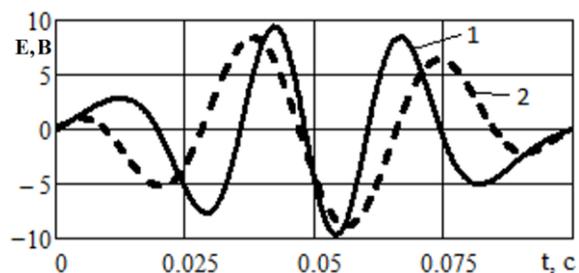


Рис. 10. ЭДС в фазе: 1 – при учете изменения  $f_x(t)$  при неравномерности  $v_{пэ}(t)$ ; 2 –  $f_x(t) = \text{const}$

**Выводы.** Напряжение линейных генераторов, преобразующих энергию колебаний в электрическую энергию с линейным возвратно-

поступательным движением индуктора, имеет несинусоидальную форму, содержит высшие пространственные и временные гармоники вследствие зубчатости сердечника якоря и явнополюсности индуктора, дискретности распределения обмотки якоря, неравномерности линейной скорости движения индуктора.

Разработанная электротехническая система преобразования энергии колебаний на основе совместной работы линейного генератора и магнитоэластического демпфера позволяет осуществлять эффективное перераспределение энергии колебаний индуктора между линейным генератором и магнитоэластическим демпфером, что может обеспечить выходное напряжение требуемой формы.

Разработанные совмещенные конструкции линейного генератора и магнитоэластического демпфера, структура трехфазной обмотки, в том числе эффективной совмещенной обмотки, применение управляемой магнитным полем магнитной жидкости позволяют регулировать силу сопротивления движению штока, осуществлять управляемую вязкостную диссипацию энергии в слоях жидкости, реализовать демпфирование колебаний, увеличить магнитную проводимость зазора, повысить магнитный поток, снизить пульсации зубцовых гармоник магнитной индукции, повысить теплоотвод от магнитов и обмоток, улучшить условия их охлаждения, обеспечить эффективную смазку поверхностей трения.

Предложенные математические аналитическая и численная на основе конечно-элементного моделирования методики расчета характеристик совмещенных линейного генератора и магнитоэластического демпфера позволили выявить, что амплитуда ЭДС линейного генератора с совмещенной обмоткой на 2 % больше за счет повышения коэффициента распределения, коэффициент искажения синусоидальности ЭДС для совмещенной обмотки на 20 % меньше, чем для стандартной обмотки, работа ЛГ на трехфазный выпрямитель при движении индуктора по гармоническому закону вызывает значительные пульсации выходного напряжения.

#### Список литературы

1. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: Корона принт, 2013. – 357 с.
2. **Линейные** электрические машины возвратно-поступательного действия – области применения / В.Б. Баль, В.Я. Геча, В.И. Гончаров и др. // Вопросы электромеханики. – 2015. – Т. 149. – С. 3–17.
3. **Соколова Е.М., Мощинский Ю.А., Шумов К.В.** Линейный генератор с постоянными магнитами в схеме электрического амортизатора // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 2(39). – С. 70–74.

4. **Математическое** моделирование и определение параметров регулирования линейной электрической машины возвратно-поступательного действия / П.Г. Колпахчян, В.Г. Щербак, А.Е. Кочин, А.Р. Шайхиев // Электротехника. – 2017. – № 5. – С. 18–24.

5. **Обзор** технических решений и методов проектирования линейных электрических генераторов с постоянными магнитами / А.С. Крамаров, Д.В. Батищев, А.В. Павленко, И.В. Троценко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 6. – С. 36–51.

6. **Randin D., Abakumov A., Goryachkin A.** Research of a nonlinear vibration isolation system with a controlled magnetorheological damper // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – С. 773–783.

7. **Accurate** and fast estimation for field-dependent nonlinear damping force of meandering valvebased magnetorheological damper using extreme learning machine method / I. Bahiuddin, F. Imaduddin, S.A. Mazlan, et al. // Sensors Actuators A Phys. – 2021. – Vol. 318. – P. 112479.

8. **Пат.** на полезную модель 205731 U1. Магнитоэластический электромеханический демпфер / С.А. Нестеров, И.С. Егоров, Н.А. Морозов; заяв. № 2021112961 от 04.05.2021; опубл. 30.07.2021.

9. **Казаков Ю.Б., Егоров И.С., Нестеров С.А.** Магнитоэластический демпфер – линейный генератор // XXI Всерос. с междунар. участием Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. – Иваново, 2024. – С. 198–204.

10. **The Use** of Combined Star–Triangle Windings in Three-Phase Electric Motors: a Refined Analysis / Y.B. Kazakov, D.S. Smirnov, M.A. Kiselev, et al. // Russian Electrical Engineering. – 2024. – Vol. 95, No. 3. – P. 165–174.

11. **Линейный** двигатель-маховик с магнитной смазкой / В.Я. Геча, А.Б. Захаренко, Н.А. Белокурова, А.К. Надкин // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 72–75.

#### References

1. Khiterer, M.Ya., Ovchinnikov, I.E. *Sinkhronnye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* [Synchronous electric machines with reciprocating motion]. Saint-Petersburg: Korona print, 2013. 357 p.
2. Bal', V.B., Gecha, V.Ya., Goncharov, V.I., Ezhov, E.V., Chirkin, V.G., Shirinskiy, S.V., Lezhnev, L.Yu. *Lineynye elektricheskie mashiny vozvratno-postupatel'nogo deystviya – oblasti primeneniya* [Linear electric machines with reciprocating action – areas of application]. *Voprosy elektromekhaniki*, 2015, vol. 149, pp. 3–17.
3. Sokolova, E.M., Moshchinskiy, Yu.A., Shumov, K.V. *Lineynyy generator s postoyannymi magnitami v skheme elektricheskogo amortizatora* [Mathematical modeling and determination of control parameters of a linear electric reciprocating machine]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2018, no. 2(39), pp. 70–74.
4. Kolpakhch'yan, P.G., Shcherbakov, V.G., Kochin, A.E., Shaykhiev, A.R. *Matematicheskoe modelirovaniye i opredeleniye parametrov regulirovaniya lineynoy elektricheskoy mashiny vozvratno-postupatel'nogo deystviya* [Mathematical modeling and determination of control parameters of a linear electric reciprocating machine]. *Elektrotekhnika*, 2017, no. 5, pp. 18–24.
5. Kramarov, A.S., Batishchev, D.V., Pavlenko, A.V., Trotsenko, I.V. *Obzor tekhnicheskikh resheniy i metodov proektirovaniya lineynykh elektricheskikh generatorov s postoyannymi magnitami* [Overview of solutions and design methods for linear electric generators with

permanent magnets]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 36–51.

6. Randin, D., Abakumov, A., Goryachkin, A. Research of a nonlinear vibration isolation system with a controlled magnetorheological damper. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2022, pp. 773–783.

7. Bahiuddin, I., Imaduddin, F., Mazlan, S.A., Ariff, M.H.M., Mohmad, K.B., Sabino, U., Choi, S.B. Accurate and fast estimation for field-dependent nonlinear damping force of meandering valvebased magnetorheological damper using extreme learning machine method. *Sensors Actuators A Phys.*, 2021, vol. 318, p. 112479.

8. Nesterov, S.A., Egorov, I.S., Morozov, N.A. *Magnitozhidkostnyy elektromekhanicheskiy dempfer* [Magnetic fluid electromechanical damper]. Patent RF, no. 205731, 2021.

9. Kazakov, Yu.B., Egorov, I.S., Nesterov, S.A. Magnitozhidkostnyy dempfer – lineynyy generator [Magnetic fluid damper – linear generator]. *Sbornik nauchnykh trudov XXI Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem Plesskoy nauchnoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Proceedings of XXI All-Russian Plyos scientific conference with international participation on nano dispersed magnetic fluids]. Ivanovo, 2024, pp. 198–204.

10. Kazakov, Yu.B., Smirnov, D.S., Kiselev, M.A., Novikov, I.V., Zakharov, A.V. The Use of Combined Star-Triangle Windings in Three-Phase Electric Motors: a Refined Analysis. *Russian Electrical Engineering*, 2024, vol. 95, no. 3, pp. 165–174.

11. Gecha, V.Ya., Zakharenko, A.B., Belokurova, N.A., Nadkin, A.K. Lineynyy dvigatel'–makhovik s magnitnoy smazkoy [Linear flywheel motor with magnetic lubrication]. *Elektrotehnika*, 2018, no. 10, pp. 72–75.