

ЛИНЕЙНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СХЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА

Рассмотрены вопросы создания линейных генераторов с постоянными магнитами возвратно-поступательного движения. Применение высокоэнергетических постоянных магнитов делают перспективы их разработки вполне реальными, в частности при создании электрических амортизаторов, которые являются альтернативным вариантом амортизаторов гидравлических, широко применяемых в автомобилестроении. В электрическом амортизаторе кинетическая энергия колеблющегося элемента подвески преобразуется в электрическую. Эта энергия может быть использована для питания различных приборов автомобиля. Показано, что при выборе конструкции амортизатора предпочтительной оказалась конструкция с коротким наружным индуктором, в пазах которого расположена трехфазная обмотка генератора. Вторичный элемент имеет радиально намагниченные постоянные магниты на основе редкоземельных материалов. Вследствие относительного линейного перемещения элементов первичного с обмоткой и вторичного с постоянными магнитами, в обмотке индуцируется переменное напряжение, которое выпрямляется трехфазным выпрямителем и подается на аккумулятор. Представляет интерес оценить, какая часть энергии колебаний преобразуется в электрическую, а также электромагнитную силу, ее пиковые значения, время переходного процесса, число колебаний. Представлена математическая модель электрического амортизатора в пакете MATLAB/Simulink, позволяющая исследовать переходные процессы при различных законах изменения возмущающей силы. Приведены результаты исследования движущей силы, тока, скорости и перемещения от времени. Исследования показали, что для улучшения работы амортизатора необходимо параллельно аккумулятору подключить добавочное сопротивление, величина которого определяется для каждого конкретного случая. Предложенная математическая модель может быть использована в алгоритмах управления микропроцессоров систем подвески автомобилей и других средств передвижения.

Ключевые слова: электрический амортизатор, линейный генератор, постоянные магниты, Simulink-модель.

ВВЕДЕНИЕ

В современных технологиях успешно применяются линейные генераторы малой и средней мощности возвратно-поступательного движения. В частности, возникли предпосылки для создания таких генераторов мощностью в несколько десятков киловатт для гибридных автомобилей. Применение в линейных генераторах высокоэнергетических постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов делает перспективы их разработки вполне реальной.

В автомобилях одной из важных составляющих для обеспечения максимального комфорта является система подвеса, при которой пассажир не ощущает тряску при езде по неровной дороге. Для этого служат гидравлические амортизаторы. При колебаниях упругого элемента подвески залитая в амортизатор жидкость перетекает из одной полости в другую через небольшие отверстия, которые оказывают сопротивление этому перетеканию. Альтернативой такому гидравлическому амортизатору может быть электрический амортизатор, в котором кинетическая энергия колеблющегося элемента подвески преобразуется в электрическую энергию [1-3].

Эта энергия может быть использована для зарядки аккумулятора, который является ее накопителем, и в дальнейшем может быть использована для питания контрольно-измерительных приборов, освещения панели приборов управления, радиоприемника, магнитолы, вентилятора, электростеклопакета.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Электрический амортизатор представлен на **рис. 1**. Он состоит из линейного генератора, пружины и накопителя электрической энергии. Были рассмотрены различные варианты конструкции линейного генератора. Предпочтительной оказалась конструкция с коротким наружным индуктором, в пазах которого расположена трехфазная обмотка генератора. Вторичный элемент имеет радиально намагниченные постоянные магниты. В качестве постоянных магнитов используются магниты на основе редкоземельных материалов Nd-Fe-B, поскольку они обладают более высокой удельной магнитной энергией при сравнительно низкой стоимости исходных материалов по сравнению с другими марками магнитов.

Во время колебаний автомобиля вторичный элемент перемещается относительно индуктора. Вследствие относительного линейного перемещения элементов – первичного с обмоткой и вторичного с постоянными магнитами в обмотке индуцируется переменное напряжение, которое затем выпрямляется трехфазным выпрямителем и подается на аккумулятор. Здесь аккумулятор является накопителем электрической энергии. Так как магнитное поле, созданное постоянными магнитами, меняется относительно индуктора, его сердечник выполняется шихтованным, чтобы уменьшить магнитные потери на гистерезис и вихревые токи.

Существует ряд научных проблем, которые необходимо решить при создании электрического амортизатора. В частности, представляет интерес определить, какая часть энергии колебаний преобразуется в электрическую энергию, также важно оценить электромагнитную силу, ее пиковое значение, время переходного процесса, число и размах колебаний.

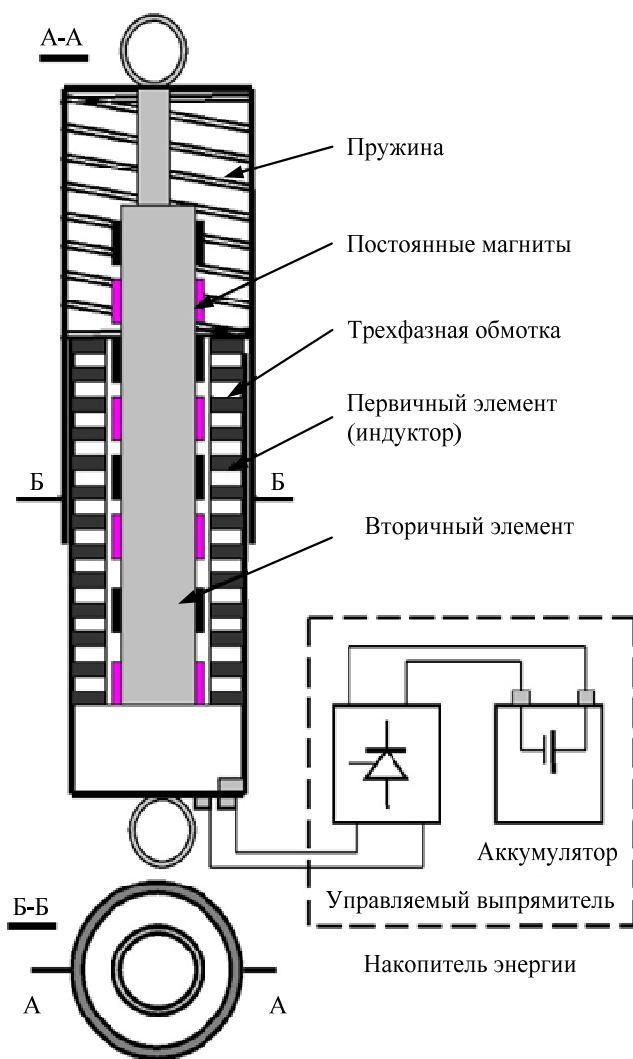


Рис. 1. Конструкция электрического амортизатора

При разработке электромеханического амортизатора основной задачей является оценка качества переходного процесса с целью учета влияния параметров схемы амортизатора на динамический процесс. Такую оценку дает приложение силы в виде ступени (внезапный наброс нагрузки). Ступенчатое возмущение достаточно широко используется в теории автоматического регулирования при исследовании динамических свойств объекта.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для ответа на эти вопросы была создана математическая модель амортизатора, которая включала параметры линейного генератора, пружины, выпрямитель и аккумулятор. Предварительно был рассчитан генератор с постоянными магнитами и на основе его характеристик разработана пружина.

Расчет генератора проводился по известным методикам [4-6]. Линейный генератор с постоянными магнитами заменяет гидравлический амортизатор, поэтому его характеристики должны соответствовать характеристикам последнего. Основной характеристикой механического амортизаторов является зависимость демпфирующей силы F_d , действующей на

поршень, от скорости его перемещения v : $F_d = k_d \cdot v_d$. Была выбрана стандартная характеристика гидравлического амортизатора, установленного на задней подвеске автомобиля с передним приводом [7]. При скорости поршня $v_{d\max} = 0,52$ м/с, максимальная демпфирующая сила, согласно обобщенной характеристики, составляет $F_{d\max} = 1450$ Н. Поэтому генератор проектировался на эту максимальную силу, развиваемую при скорости вторичного элемента $v = 0,52$ м/с, и напряжении на выходе выпрямителя, равном напряжению аккумулятора $U_{ak} = 24$ В.

Размеры линейного генератора и его выходные показатели приведены ниже.

Индуктор: число пар полюсов $p = 4$; внешний диаметр индуктора $D_1 = 0,1048$ м; диаметр яра индуктора $D_{a1} = 0,0988$ м; толщина яра индуктора $h_a = 0,003$ м; полюсное деление $\tau = 0,035$ м; высота зубца $h_z = 0,0244$ м; ширина зубца $b_z = 0,0039$ м; ширина паза $b_n = 0,0078$ м; длина индуктора $l_1 = 0,28$ м; число фаз $m_1 = 3$; число зубцов $Z_1 = 24$; число витков в фазе $W_\phi = 560$. Сопротивление фазы $R_a = 1,3$ Ом; индуктивность фазы $L_a = 6,1$ мГн.

Вторичный элемент: воздушный зазор $\delta = 0,001$ м; наружный диаметр вторичного элемента $D_2 = 0,048$ м; наружный диаметр сердечника вторичного элемента $D_{a2} = 0,040$ м; длина вторичного элемента $l_2 = 0,42$ м; постоянные магниты (NdFeB): остаточная индукция $B_r = 1,2$ Тл; коэрцитивная сила — $H_c = 900$ кА/м; высота постоянного магнита $h_m = 0,004$ м.

Основные выходные показатели линейного генератора: выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 24$ В; максимальная сила сжатия, развиваемая генератором при скорости $v = 0,5$ м/с, $F = 1450$ Н.

При проектировании пружины принималось, что она должна работать на сжатие, и может быть изготовлена из хромованадиевой или хромоникелевой стали. Режим работы пружины периодический, с большим интервалом пауз.

Основные параметры пружины: длина пружины $l = 0,14$ м; постоянная пружины $K_s = 10,3 \cdot 10^3$ Н/м; средний диаметр пружины $D = 0,08$ м; число витков пружины $N = 6$; диаметр прутка — $d = 0,023$ м.

Электрическая схема амортизатора и ее элементы представлена на рис. 2.

На ней трехфазная обмотка генератора соединена с выпрямителем, который подключен к накопителю. Для обеспечения передачи энергии генератора к аккумулятору необходимо, чтобы величина ЭДС E , индуцируемая в обмотке индуктора, превосходила напряжение аккумулятора на величину ΔU_a .

Для исследования основных показателей амортизатора, а также зависимости их от параметров электрической системы использовалась упрощенная эквивалентная схема замещения электрического амортизатора, представленная на рис. 3. Ключ $K1$, изображенной на схеме, отражает работу полупроводникового элемента — диода. Ключ закрыт, и ток проходит через него только в том случае, когда мгновенная величина ЭДС e , превышает напряжение аккумулятора.

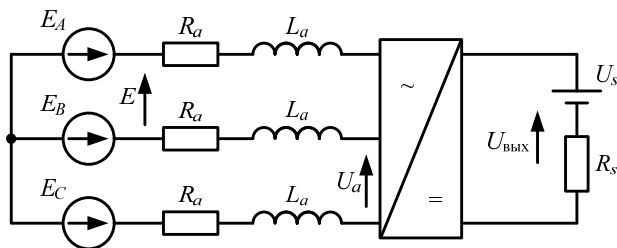


Рис. 2. Электрическая схема амортизатора

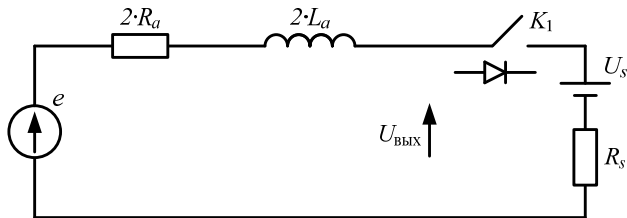


Рис. 3. Эквивалентная схема электрического амортизатора с диодом (ключ K_1)

Уравнение равновесия напряжений и ЭДС для этой схемы имеет вид

$$e = U_s + (2R_a + R_s) \cdot i + L \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

где R_s , U_s – сопротивление и напряжение аккумулятора; $L=2 \cdot L_a$ – общая индуктивность линейного генератора при работе на выпрямитель; L_a – индуктивность фазы.

Линейные напряжения трехфазного генератора, подключенные к трехфазному выпрямителю, могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} e_{AB} &= K_e [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - 2\pi/3)]; \\ e_{BC} &= K_e [\sin(\omega t - 2\pi/3) - \sin(\omega t + 2\pi/3)]; \\ e_{CA} &= K_e [\sin(\omega t + 2\pi/3) - \sin(\omega t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где $K_e = E/U_{\text{ВЫХ}} > 1$ – коэффициент ЭДС, который уточняется в процессе расчета.

Средняя величина ЭДС на выходе выпрямителя равна

$$E = 3\sqrt{3}E_\phi / \pi. \quad (3)$$

Механическая система автомобиля при действии всех сил описывается следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка [1]:

$$F_g + F_d = F_{em} + m \frac{d^2 x}{dt^2} + F_f + F_s, \quad (4)$$

где m – расчетная масса автомобиля, приходящаяся на один амортизатор; $F_{em}=K_E \cdot i$ – электромагнитная сила, i – выходной ток; $F_g=m \cdot g$; g – гравитационная постоянная; F_d – движущая сила; $F_s=K_s x$ – усилие пружины; K_s – постоянная пружины; x – линейное перемещение вторичного элемента линейного генератора относительно индуктора; $F_f=v \cdot D_f$ – сила трения; D_f – коэффициент трения; v – относительная скорость вторичного элемента; $P_{\text{ВЫХ}}=U_{\text{ВЫХ}} \cdot i$ – мгновенная выходная мощность; $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение.

На рис. 4 приведена блок-схема модели электрического амортизатора, построенная на основании вышеприведенных уравнений в физико-математическом пакете *MATLAB-Simulink* [8].

Начальные условия для всех интеграторов, за исключением интегратора перемещения, приняты нулевыми. Начальное условие последнего находится из решения уравнения (4) при подстановке в него значений $i=v=0$, $dx/dt=0$ и $F_d=0$, т. е.

$$mg + F_d = K_s \cdot x. \quad (5)$$

Тогда начальное значение $x_0 = m \cdot g / K_s = 0,093$ м. После приложения ступенчатого воздействия система амортизатора реагирует на это воздействие, начинается колебательный процесс, после которого она приходит в новое положение равновесия, отличающееся от начального наличием силы F_d . Поэтому $x_{\text{уст}}$ определяется с учетом действия этой силы на основе баланса всех сил после завершения переходного процесса, как $x_{\text{уст}} = (m \cdot g + F_d) / K_s = 0,237$ м.

Для анализа работы электрического амортизатора в динамических режимах были проведены исследования зависимости движущей силы, тока, скорости и перемещения от времени. При моделировании были использованы следующие параметры и коэффициенты: активное сопротивление фазы генератора $R_a=1,3$ Ом; индуктивность фазы генератора $L_a=6,1$ мГн; коэффициент связи напряжения и скорости $K_E=72$ В·с/м; расчетная масса автомобиля (масса кузова, двигателя и водителя малолитражного автомобиля принята равной 400, кг) на один амортизатор $m=100$ кг; постоянная пружины $K_s=10,3 \cdot 10^3$ Н/м; коэффициент трения $D_f=0,12$ Н·с/м; гравитационная постоянная $g=9,8$ м/с²; сопротивление источника $R_s=0,1$ Ом; напряжение источника $U_s=24$ В. Движущая сила представляет собой динамическую силу, действующую на амортизатор, когда автомобиль попадает на неровность во время движения, она принимается равной максимальной силе $F_d=1450$ Н. Эта сила прикладывается к амортизатору после 0,1 секунды от начала моделирования. Величина и характер силы задаются в свойствах блока «*Signal Builder*» модели (см. рис. 4). Результаты моделирования при ступенчатом воздействии движущей силы показаны на рис. 5. На графиках представлены временные зависимости перемещения индуктора амортизатора x и скорости v .

Характер зависимости перемещения x показывает, что, после того как к амортизатору приложена усилие, колебания будут затухать до тех пор, пока ЭДС генератора превышает напряжения аккумулятора ($e > U_s$). Эти колебания возникают, если скорость движущейся части линейного генератора превышает определенное значение. Ниже этого значения скорости индуцируемое напряжение меньше напряжения аккумулятора ($e < U_s$). В результате ток генератора стремится к нулю, и демпфирующая электромагнитная сила, развиваемая генератором, также стремится к нулю, что приводит к установившимся колебаниям механической системы около установившегося значения $x_{\text{уст}}$, которое равно $x_{\text{уст}}=0,235$ м (см. рис. 5).

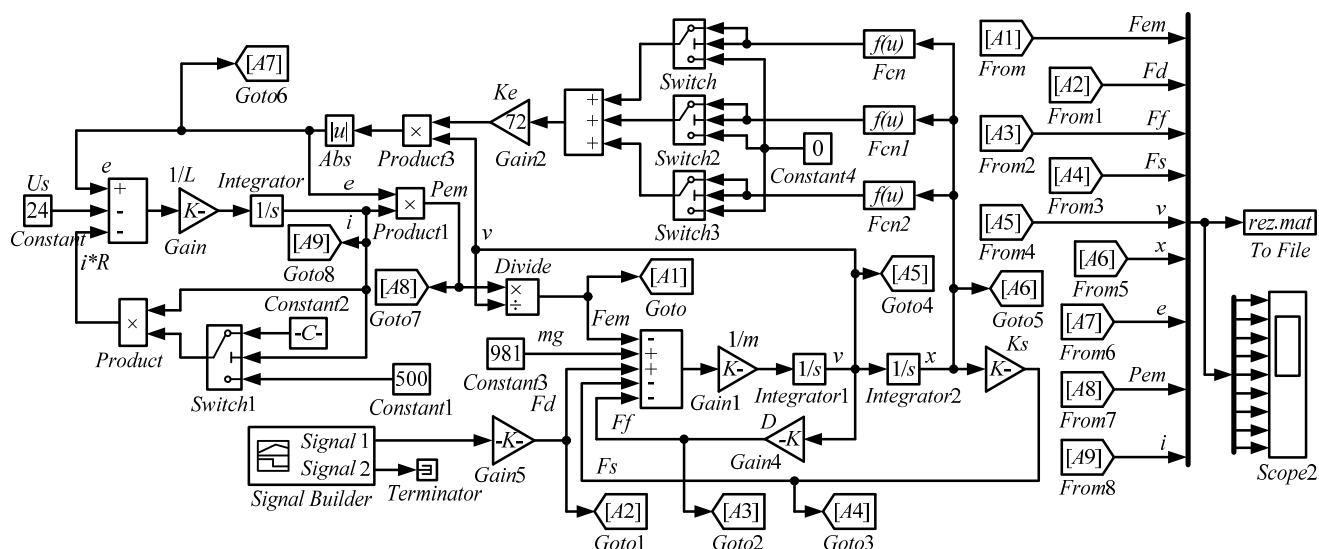


Рис. 4. Модель электрического амортизатора в физико-математическом пакете MATLAB-SIMULINK

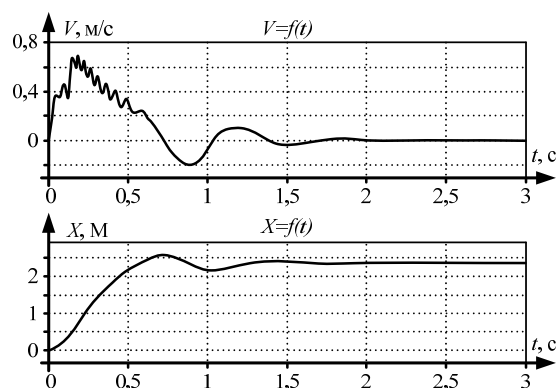


Рис. 5. Графики перемещения и скорости вторичного элемента при воздействии возмущающей силы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что для улучшения работы амортизатора необходимо параллельно аккумулятору подключать небольшое добавочное сопротивление, величина которого определяется для каждого конкретного случая. При включении сопротивления генератор переходит в режим, близкий к короткому замыканию, и колебания механической системы затухают гораздо быстрее, чем при его отсутствии.

В результате проделанной работы предложена математическая модель электрического амортизатора для транспортного средства, позволяющая исследовать динамические процессы и изучать качество его работы на основе анализа мгновенных значений тока, выход-

ного напряжения, мощности, скорости и перемещения вторичного элемента.

Данная математическая модель позволяет значительно снизить затраты расчетного времени при разработке линейных генераторов с постоянными магнитами. Эта модель также может быть использована в алгоритмах управления микропроцессоров систем подвески автомобиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб.: Корона-Принт, 2008. 368 с.
- Gieras J.F., Piech Z.J. Linear Synchronous Motors. CRS, Press. 2000.
- Zhen Longing and Wei Xiao gang, 'Structure and Performance Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber', Journal of networks, vol. 5, no. 12, December 2010.
- Мошинский Ю.А. Расчет синхронных генераторов с постоянными магнитами. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 31 с.
- Соколова Е.М., Мошинский Ю.А. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 1998. 26 с.
- Проектирование электрических машин / под общ. ред. Копылова И.П. М.: Энергия, 1980. 495 с.
- Дербаремдикер А.Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 236 с.
- Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. Потемкина В.Г. М.: Диалог-МИФИ, 2003. 496 с.

Поступила в редакцию 13 января 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

LINEAR GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS IN THE ELECTRIC SHOCK ABSORBER CIRCUIT

Jurij A. Moshhinskij

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). E-mail: MoshchinskyYA@mpei.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9292-2728>

Elena M. Sokolova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). E-mail: CokolovaYM@mpei.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2470-9570>

Kirill V. Shumov

Postgraduate student, Department of Electromechanics, Electrical and Electronic Devices, Moscow Power Engineering Institute (National Research University). E-mail: k_shumov@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0811-1659>

The problems of creating linear generators with permanent magnets of reciprocating motion are considered. The use of high-energy permanent magnets makes the prospects for their development very real, when creating electric shock absorbers, which are an alternative version of hydraulic shock absorbers widely used in the automotive industry. In the electric shock absorber, the kinetic energy of the oscillating suspension element is converted to electric one. This energy can be used to power various car devices. It is shown that when choosing a shock absorber design, the design with a short external inductor is preferable, in the grooves of which there is a three-phase winding of the generator. The secondary element has radially magnetized permanent magnets based on rare-earth materials. Due to the relative linear displacement of the primary with the winding and the secondary with permanent magnets, an alternating voltage is induced in the winding, which is rectified by a three-phase rectifier and is supplied to the battery. It is of interest to estimate which part of the vibrational energy is converted into electric one, the electromagnetic force, its peak values, the time of the transient process, the number of oscillations. A mathematical model of an electric shock absorber is presented in the MATLAB / Simulink package, which allows one to investigate transient processes under various laws of perturbation force variation. The results of the study of the driving force, current, speed and displacement from time are given. Studies have shown that to improve the performance of the shock absorber, it is necessary to connect in parallel the accumulator an additional resistance, the value of which is determined for each specific case. The proposed mathematical model can be used in algorithms for controlling microprocessors of suspension systems for cars and other vehicles.

Keywords: electric shock absorber, linear generator, permanent magnets, Simulink-model.

REFERENCES

1. Hiterer M.Ja., Ovchinnikov I.E. *Sinhronnye elektricheskie mashiny vozvratno- postupatel'nogo dvizhenija* [Synchronous electric reciprocating machines]. St. Petersburg, Korona-Print. 2008. 368 p. (In Russian)
2. Gieras J.F., Piech Z.J. *Linear Synchronous Motors*. CRS, Press. 2000.
3. Zhen Longing and Wei Xiao gang, 'Structure and Performance Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber', *Journal of networks*, vol. 5, no. 12, December 2010.
4. Moshhinskij Yu.A. *Raschet sinhronnyh generatorov s postojannymi magnitami* [Calculation of synchronous generators with permanent magnets]. Moscow, MPEI Publ., 2002, 31 p. (In Russian)
5. Sokolova E.M., Moshhinskij Yu.A. *Tsilindricheskie lineynye asinhronnye dvigateli* [Cylindrical Linear Asynchronous Motors]. Moscow, MPEI Publ., 1998, 26 p.
6. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Designing of electrical machines]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 495 p. (In Russian)
7. Derbaremdiker A. D. *Gidravlicheckie amortizatori avtomobilei* [Hydraulic shock absorbers for cars]. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 236 p. (In Russian)
8. Chernyh I.V., Potemkin V.G., *Simulink: sreda sozdanija inzhenernyh prilozhenij* [Simulink: the environment for creating engineering applications]. Moscow, Dialog – MEPhI Publ., 2003. 496 p. (In Russian)

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. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-70-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-70-74)

Sokolova E.M., Moshhinskij Ju.A., Shumov K.V. Linear Generator with Permanent Magnets in the Electric Shock Absorber Circuit. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2(39), pp. 70-74. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-70-74](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-70-74)