

## Разработка имитационной модели электродинамического амортизатора

МОЩИНСКИЙ Ю.А., СОКОЛОВА Е.М.

*Представлена математическая модель электрического амортизатора с линейным генератором с постоянными магнитами на основе стандартной модели генератора вращательного движения в пакете Matlab/Simulink, позволяющая исследовать качество переходных процессов при различных законах изменения возмущающей силы и параметрах системы. Являясь универсальной, разработанная модель позволяет проводить исследования и сравнение различных типов амортизаторов, а также проектировать их под заданные характеристики.*

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

Одним из главных критериев сравнения автомобилей является уровень комфорта. Современные автомобили оснащены такими средствами, как подогрев дворников, кондиционеры, подушки безопасности, дистанционное включение двигателя, электростеклоподъемники др. Однако не менее важной составляющей для обеспечения максимального комфорта является система подвески, исключая тряску при езде по неровной дороге. Для того чтобы обеспечить плавность движения автомобиля, надо уменьшить ударную нагрузку на упругие элементы подвески и погасить их колебания. В этом заключается назначение амортизатора, поглощающего энергию упругого элемента и тем самым способствующего быстрому затуханию колебаний.

На автомобилях применяют гидравлические амортизаторы. При колебаниях упругого элемента подвески залитая в амортизатор жидкость принуждена перетекать из одной полости в другую через небольшие отверстия, которые оказывают сопротивление этому перетеканию. На перемещение жидкости затрачивается определенная работа и расходуется энергия колебаний.

Альтернативой гидравлическому амортизатору может быть электрический амортизатор, в котором кинетическая энергия колеблющегося объекта преобразуется в электрическую. Эта энергия может быть использована для зарядки батареи, служащей ее накопителем.

Идея электрического амортизатора изложена в опубликованных работах [1–3], однако существует ряд научных задач, которые еще необходимо решить. Электрический амортизатор обычно работает в динамических режимах, поэтому представляет интерес исследовать, какая часть энергии механических колебаний преобразуется в электрическую энергию. Также важно оценить электромагнитную

силу, ее пиковое значение, время переходного процесса и число колебаний в этот период.

Схема электрического амортизатора представлена на рис. 1. Она включает линейный генератор, пружину и накопитель электрической энергии. Возможны различные варианты конструкции линейного генератора. Предпочтительной является конструкция линейного синхронного с коротким наружным индуктором, в пазах которого расположена трехфазная обмотка. Вторичный элемент имеет радиально намагниченные постоянные магниты на основе сплава NdFeB. Во время колебаний автомобиля вторичный элемент движется относительно индуктора. Вследствие относительного линейного перемещения элементов – первичного с обмоткой и вторичного с постоянными магнитами – в обмотке индуцируется переменное напряжение, которое, выпрямляясь трехфазным выпрямителем, подается на аккумулятор, являющийся накопителем электрической энергии. Так как магнитное поле, созданное постоянными магнитами, меняется относительно индуктора, его сердечник выполняется шихтованным для уменьшения магнитных потерь на гистерезис и вихревые токи.

На этапе проектирования линейного генератора колебательного движения, принимая во внимание сложный характер механической нагрузки, необходимо решать задачу моделирования электромеханических переходных процессов с учетом полупроводникового преобразователя. Для случая генераторов вращательного движения при решении таких задач все более широко используется пакет программ Matlab, Simulink, SimPowerSystems [4]. Однако в случае применения линейных генераторов этот вопрос освещен в литературе недостаточно подробно и требует специального рассмотрения.

Цель данной работы – описание одного из методов моделирования электромеханических пере-

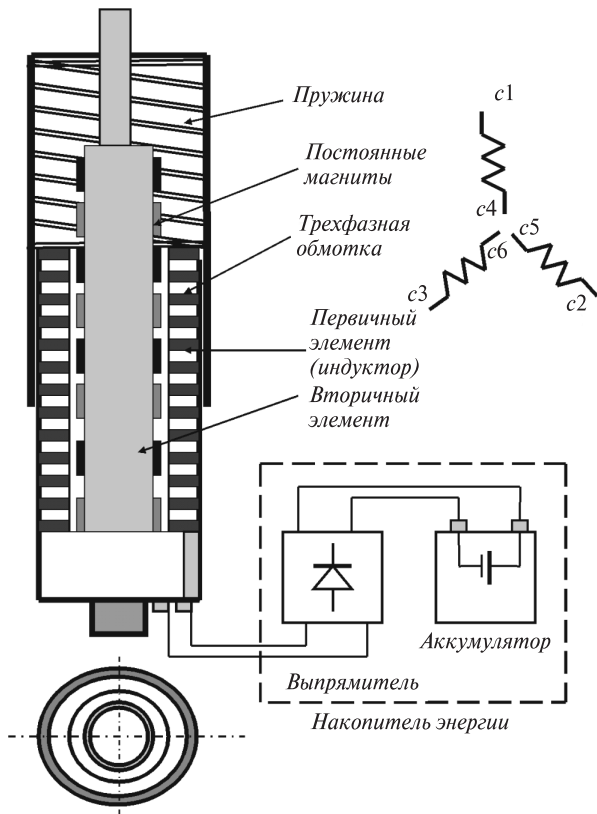


Рис. 1. Схема электрического амортизатора

ходных процессов в линейном генераторе возвратно-поступательного движения на основе физико-математического пакета программ Matlab Simulink. Согласно этому методу необходимо вначале установить соответствие между исследуемым линейным генератором и эквивалентным ему генератором вращательного движения и определить его электромагнитные параметры. Затем, используя стандартные блоки в пакете SimPowerSystems, выполнить компьютерное моделирование линейного генератора. Библиотека блоков SimPowerSystems является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентирована на моделирование конкретных электротехнических устройств и содержит модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электрических машин вращательного движения. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники. Комбинируя возможности Simulink и SimPowerSystems, можно не только имитировать работу генератора во временной области, но и выполнять различные виды анализа его работы в составе различных систем.

Возможность замены линейного генератора эквивалентным генератором с вращающимся ротором справедлива при следующих допущениях:

поскольку генератор имеет короткий индуктор (или длинный вторичный элемент), при движении

вторичного элемента полагаем, что концевые участки не влияют на процессы в активной зоне индуктора;

малые скорости движения подвижной части генератора позволяют не учитывать влияние продольного краевого эффекта;

параметры трехфазных обмоток линейного и эквивалентного генераторов одинаковы.

Отметим, что вопросы учета краевых и ряда других эффектов, возникающих в линейных машинах, при выполнении моделирования в пакете Matlab/Simulink требуют отдельного рассмотрения.

Конструкции линейных цилиндрических синхронных машин будут подобны конструкциям линейных плоских машин, если их развернуть в плоскость. При учете указанных выше допущений электромагнитные процессы в линейном генераторе будут подобны процессам в соответствующем генераторе вращательного движения. Основные характеристики этих процессов будут совпадать количественно при выполнении условий геометрического подобия активной зоны индуктора и равенстве ее основных размеров: полюсного шага  $\tau$ , длины  $l_i$  и ширины  $b_i$  активной зоны, числа пар полюсов  $p$ , равенстве линейной скорости на поверхности якоря  $v = \omega_r R$ . Механические мощности генераторов и кинетические энергии их подвижных частей также должны быть равны:

$$M_e \omega_r = F_e v; \quad (1)$$

$$J_r \omega_r^2 / 2 = m v^2 / 2. \quad (2)$$

В этих формулах  $\omega_r$ ,  $M_e$ ,  $J_r$ ,  $R$  — угловая частота вращения, электромагнитный момент, момент инерции ротора, радиус расточки генератора вращательного движения;  $v$ ,  $F_e$ ,  $m$  — линейная скорость движения вторичной части, электромагнитная сила и масса якоря линейного двигателя. Радиус расточки  $R$  может быть вычислен из равенства  $2\pi R = 2p\tau$ , где величина  $2p\tau$  представляет собой длину активной зоны линейного генератора.

При выполнении этих условий электромеханический процесс в линейном генераторе описывается той же системой дифференциальных уравнений, что и для генератора вращательного движения, и имеет те же значения параметров, входящих в эту систему. Система уравнений в координатах  $dq$  приведена в [7]. Ее численное решение реализовано в стандартном блоке для синхронной машины с постоянными магнитами в пакете Matlab/Simulink и при выполнении указанных соотношений может использоваться для расчета динамических процессов в линейном генераторе.

Для создания модели амортизатора необходимо знать параметры генератора, пружины и аккумуля-

тора, для чего был спроектирован генератор с постоянными магнитами, на основе характеристик которого рассчитана пружина. Генератор рассчитывался по известным методикам [5–7] на максимальную силу  $F_e = 1500$  Н, развиваемую при скорости вторичного элемента  $v = 0,5$  м/с. При этом напряжение на выходе выпрямителя должно быть равно напряжению аккумулятора  $U_{ак} = 24$  В.

Параметры цилиндрического линейного генератора (рис. 1): индуктор – число пар полюсов  $p = 4$ ; внешний диаметр  $D_1 = 0,1050$  м; диаметр ярма  $D_{ал} = 0,0988$  м; полюсное деление  $\tau = 0,035$  м; длина  $l_1 = 0,3$  м; воздушный зазор  $\delta = 0,001$  м; число зубцов  $Z_1 = 24$ ; обмотка индуктора – трехфазная, поскольку обладает более высоким значением обмоточного коэффициента по основной гармонической составляющей магнитного поля по сравнению с двухфазными и однофазными обмотками, число витков в фазе  $W_{\phi} = 560$ .

Так как трехфазная обмотка соединена с выпрямителем, а затем с накопителем, то ее параметры зависят от напряжения аккумулятора и демпфирующей силы, которую должен создать генератор, чтобы обеспечить передачу энергии от генератора к аккумулятору. При этом необходимо, чтобы значение ЭДС  $E$  в обмотке индуктора превосходило значение напряжения аккумулятора на  $\Delta U_a$ . В результате расчета получены следующие значения параметров обмотки: сопротивление фазы  $R_a = 1,66$  Ом; полные индуктивности статора по осям  $d$  и  $q$  –  $L_d = L_q = 12,61$  мГн; максимальное потокоцепление обмотки статора с полем постоянных магнитов  $\Psi_{п.м} = 0,9$  Вб; эти параметры задаются в блоке Simulink-модели генератора.

Вторичный элемент: наружный диаметр  $D_2 = 0,048$  м; наружный диаметр сердечника  $D_{a2} = 0,040$  м; длина  $l_2 = 0,42$  м; основные магнитные характеристики постоянных магнитов из сплава NdFeB: остаточная индукция  $B_r = 1,2$  Тл, коэрцитивная сила  $H_c = 900$  кА/м; высота постоянных магнитов  $h_M = 0,004$  м.

При разработке пружины учитывалось, что она работает на сжатие, поэтому должна быть изготовлена из хромованадиевой или хромоникелевой стали. Режим работы пружины – периодический с большим интервалом паузы. Основные параметры пружины: длина  $l = 0,15$  м; средний диаметр  $D_{пр} = 0,08$  м; число витков  $N = 6$ ; коэффициент упругости  $K_s = 10,5 \cdot 10^3$  Н/м.

Для исследования динамических характеристик электрического амортизатора на основе синхронного генератора использовалась модель в пакете Matlab/Simulink, представленная на рис. 2. Модель содержит стандартный блок синхронной электри-

ческой машины с постоянными магнитами «Permanent Magnet Synchronous Machine», который моделирует процессы в линейном генераторе. Трехфазное напряжение от генератора подается на трехфазный выпрямитель. Нагрузкой выпрямителя являются активное сопротивление  $R_L$  и противо-ЭДС  $E$ , имитирующая напряжение аккумулятора. Для наблюдения исследуемых переменных параметров используются осциллографы.

Механическая система автомобиля с действующими силами приведена на рис. 3. Она описывается дифференциальным уравнением второго порядка в форме Коши:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_g + F_d - F_f - F_s - F_e, \quad (3)$$

где  $m$  – масса машины;  $F_e$  – электромагнитная сила;  $F_g = mg$ ;  $g$  – гравитационная постоянная;  $F_d$  – движущая сила;  $F_s = K_s x$  – усилие пружины;  $K_s$  – коэффициент упругости пружины;  $x$  – линейное перемещение вторичного элемента линейного генератора относительно индуктора;  $F_f = v D_f$  – сила трения;  $D_f$  – коэффициент вязкого трения;  $v$  – относительная скорость вторичного элемента.

Численное интегрирование этого уравнения выполняется в блоке синхронного генератора с постоянными магнитами на основе сумматора, формирующего правую часть уравнения (2). Для генератора вращательного движения оно может быть записано в виде системы двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} J_r \frac{d\omega_r}{dt} &= (F_g + F_d - F_f - F_s - F_e)R; \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $J_r$  – эквивалентный момент инерции;  $\omega_r$  – угловая частота вращения ротора;  $\theta_r$  – угловое положение ротора;  $R$  – радиус расточки статора.

На вход сумматора поступают электромагнитная сила  $F_e$ , усилие пружины  $F_s$ , сила  $F_g$ , сила трения  $F_f$  и возмущающая сила  $F_d$ . При вычислении скорости и линейного перемещения используются формулы для расчета параметров поступательного движения на основе параметров вращательного движения, приведенные выше, и наоборот. Мгновенные значения угла, угловой частоты вращения и момента поступают с выхода блока генератора с постоянными магнитами. На выходе сумматора получаем мгновенные значения суммарного усилия, действующего на вторичную часть, которое пересчитывается в соответствующее значение момента и поступает на вход Simulink-модели генератора.

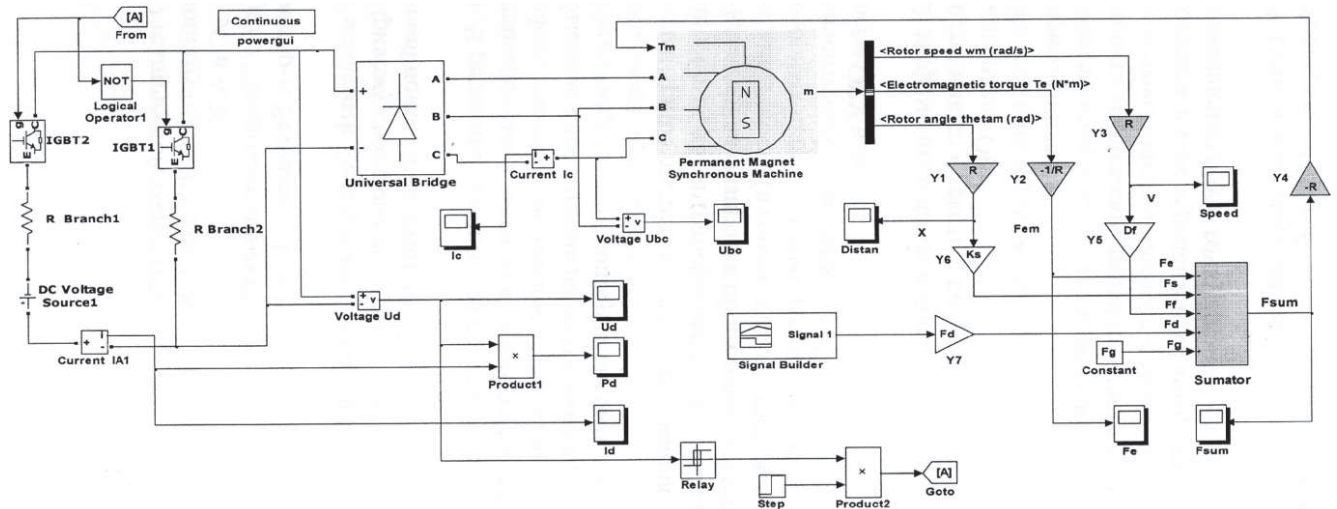


Рис. 2. Модель электрического амортизатора в физико-математическом пакете Matlab/Simulink

Для задания движущей силы используется блок «Signal Builder» (конструктор сигналов), который позволяет задать изменение движущей силы в виде ступени, импульса или другого произвольного кусочно-линейного сигнала.

Исследовались характеристики генератора при работе на выпрямитель с активной нагрузкой и противоЭДС  $E=24$  В. Для анализа работы электрического амортизатора в динамических режимах были проведены исследования зависимости движущей силы, тока, скорости и перемещения от времени.

При моделировании использованы следующие параметры и коэффициенты: масса  $m=100$  кг; жесткость пружины  $K_s=10,5 \cdot 10^3$  Н/м; коэффициент вязкого трения  $D_f=0,12$  Нс/м; гравитационная постоянная  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup>; сопротивление нагрузки  $R_L=10$  Ом; напряжение на аккумуляторе  $U_{ак}=24$  В. Эквивалентный радиус расточки генератора  $R=0,044$  м, тогда эквивалентный момент инерции ротора генератора  $J_r=0,2$  кг·м<sup>2</sup>.

Движущая сила представляет собой динамическую силу, действующую на амортизатор, когда автомобиль попадает на выступ во время движения (рис. 3), она принимается равной  $F_d=1500$  Н и прикладывается к амортизатору через 0,2 с с начала моделирования. Эти значения задаются в окне блока «Signal Builder» модели (рис. 2).

Начальные условия для скорости, токов и их фаз, за исключением перемещения  $x$ , приняты нулевыми. Начальное условие для  $x$  определяется из решения уравнения (3) при подстановке в него  $i=v=0$ ,  $dx/dt=0$  и  $F_d=0$ , т.е.

$$mg + F_d = K_s x. \tag{5}$$

Полученное значение  $x_0 = mg / K_s = 0,095$  м пересчитывается затем в угловое смещение ротора.

Результаты моделирования при ступенчатом воздействии возмущающей силы показаны на рис. 4 и 5. На графиках представлены временные зависимости перемещения индуктора амортизатора  $x$ , скорости  $v$ , тока  $i$  и электромагнитной силы  $F_e$  генератора.

Характер зависимости перемещения  $x$  показывает, что после того как к амортизатору приложена возмущающая сила, колебания будут затухать до тех пор, пока ЭДС будет несколько превышать напряжение аккумулятора  $e > U_{ак}$ . Колебания возникают, если скорость движущейся части линейного генератора превышает определенное значение. Ниже этого значения индуцируемое напряжение примерно равно или меньше напряжения источника  $e < U_{ак}$ . Так как при этом значение тока приближается к нулю, а сила сжатия не возникает, происходят колебания механической системы около установившегося значения, равного  $x_{уст} = (mg + F_d) / K_s = 0,235$  м (рис. 4).

Из анализа результатов моделирования следует, что если выходные клеммы выпрямителя постоянно подсоединены к аккумулятору, то амортизатор

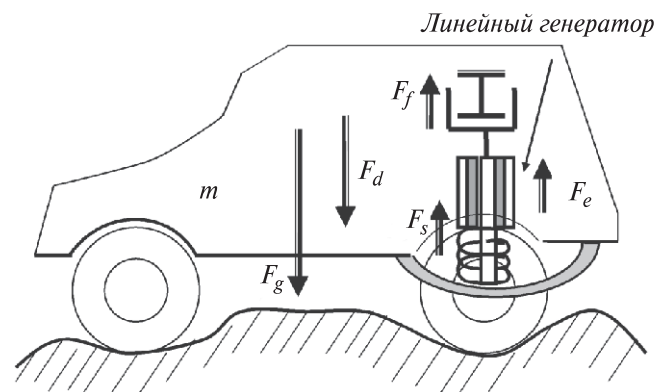


Рис. 3. Механическая модель электрического амортизатора

работает неправильно, так как механические колебания не затухают до нуля. Для того чтобы исправить ситуацию, нужно подключать небольшое активное сопротивление  $R_{доб} = 0,1$  Ом параллельно

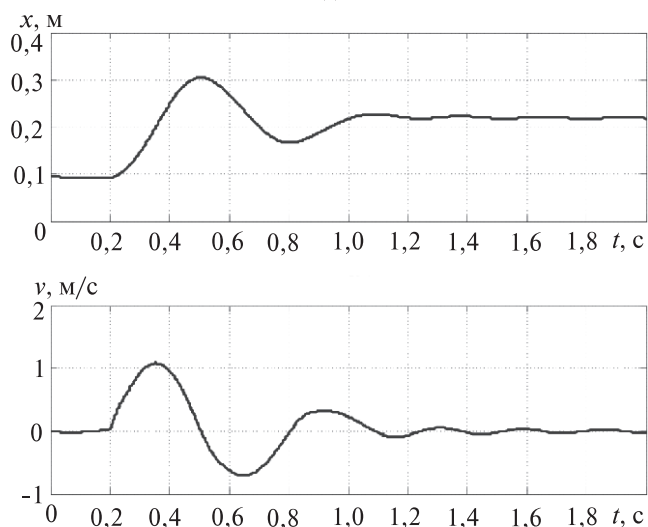


Рис. 4. Перемещение вторичного элемента и его скорости

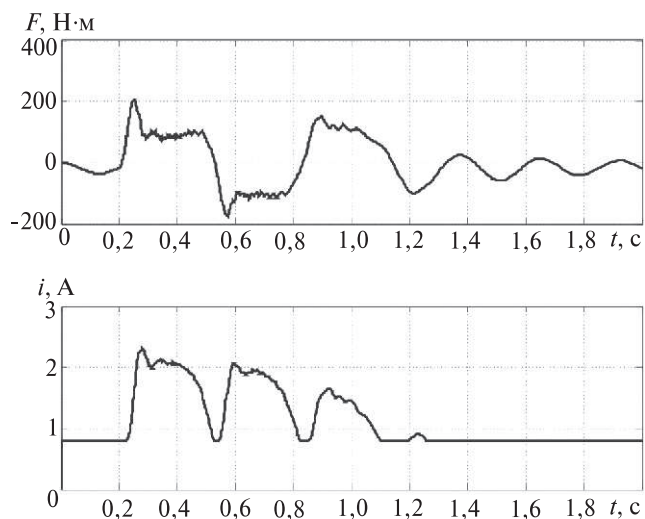


Рис. 5. Изменение электромагнитной силы и тока

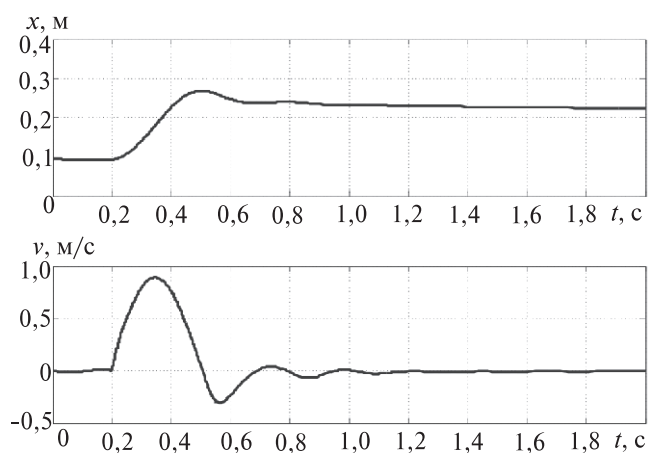


Рис. 6. Перемещение вторичного элемента и его скорости при включении транзистора

аккумулятору через транзистор IGBT1 (рис. 2), что равносильно короткому замыканию генератора. Тогда, если напряжение от генератора будет больше напряжения аккумулятора, через транзистор не потечет ток, так как он закрыт, а аккумулятор заряжается. При напряжении генератора, равном или меньшем напряжения на аккумуляторе, транзистор открывается и ток генератора идет через добавочное сопротивление. Второй транзистор IGBT2 работает в инверсном режиме, отключая и подключая аккумулятор к выпрямителю (рис. 6).

Работой транзисторов управляет схема, реализованная на стандартных блоках «RELAY» и блоках логических операций «NOT» и задержки работы схемы «STEP». На вход реле поступает напряжение от выпрямителя, которое переключается с плюса на минус и обратно. В момент равенства напряжений выпрямителя и аккумулятора и при условии  $e \leq U_{ак}$  сигнал с блока «NOT», который инвертирует сигнал, поступает на открытие транзистора 1, а инверсный сигнал на транзистор 2, закрывая его.

**Выводы.** 1. Представленная в статье математическая модель электрического амортизатора для транспортного средства позволяет исследовать динамические процессы и изучить качество его работы на основе анализа мгновенных значений тока, выходного напряжения, мощности, скорости и перемещения вторичного элемента.

2. Исследования показали, что колебания затухают до нуля после появления возмущающего воздействия; это означает, что электрический амортизатор работает правильно.

3. Применение упрощенной механической модели амортизатора позволяет значительно снизить затраты расчетного времени; модель может быть использована в алгоритмах управления микропроцессоров систем подвески автомобилей.

#### 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 Longxin and Wei Xiaogang. Structure and Performance Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber. — Journal of networks, December 2010, vol. 5, No. 12.
- Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008, 288 с.
- 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 ред. И.П. Копылова. — М.: Энергия, 1980, 495 с.

*Авторы: Мощинский Юрий Анатольевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1965 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Синхронный двигатель с постоянными магнитами с асинхронно-гистерезисным пуском». Доцент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» НИУ «МЭИ».*

*Соколова Елена Михайловна окончила в 1967 г. МЭИ. В 1974 г. защитила кандидатскую диссертацию «Оптимизация электропривода параболической антенны». Доцент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» НИУ «МЭИ».*

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 4, pp. 56–61.*

## Elaborating an Electrodynamics Shock Absorber Simulation Model

**MOSHCHINSKII Yurii A.** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**SOKOLOVA Yelena M.** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*The article presents a mathematical model of an electric shock absorber equipped with a linear generator with permanent magnets. The new model, which is constructed on the basis of the standard rotary motion generator model available in the Matlab/Simulink software package, makes it possible to investigate the quality of transients triggered by a disturbing force varying according to different laws and at different parameters of the system. Owing to its versatility, the developed model enables the user to investigate and compare various types of shock absorbers and design them for specified performance characteristics.*

*Key words: electric shock absorber, linear generator, permanent magnets, Simulink-based model of a generator*

### REFERENCES

1. **Khiterer M.Ya., Ovchinnikov I.Ye.** *Sinkhronnye elektricheskiye mashiny vozvratno-postupatel'nogo dvizheniya* (Synchronous electrical machines reciprocation). St. Petersburg, Publ. «Korona-Print», 2008, 368 p.
2. **Gieras J.F., Piech Z.J.** *Linear Synchronous Motors*, CRS, Press, 2000.
3. **Zhen Longxin and Wei Xiaogang.** Structure and Performance Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber. – *Journal of networks*, December 2010, vol. 5, No. 12.
4. **Chernykh I.V.** *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* (Simulation of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink). Moscow, Publ. DMC Press; St. Petersburg, Publ. «Piter», 2008, 290 p.
5. **Moshchinskii Yu.A.** *Raschet sinkhronnykh generatorov s postoyannymi magnitami* (Calculation of synchronous generators with permanent magnets). Moscow, Publ. of the Moscow Power Engineering Institute, 2002, 31 p.
6. **Sokolova Ye.M., Moshchinskii Yu.A.** *Tsilindricheskiye lineinye asinkhronnye dvigateli* (The cylindrical linear induction motors). Moscow, Publ. of the Moscow Power Engineering Institute, 1998, 26 p.
7. **Proyektirovaniye elektricheskikh mashin/Pod. red. I.P. Kopylova** (Design of electrical machines/Edit by I.P. Kopylov). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 495 p.

[07.12.2016]