

УДК 629.027:621 313.17

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-62-69

## Аналитическое исследование переходных процессов в электрическом амортизаторе

Ю.А. Мощинский, Е.М. Соколова

Кинетическая энергия вибрации при езде электромобиля по неровной дороге обычно переходит в тепловую энергию в механических амортизаторах и других средствах демпфирования и рассеивается, т. е. энергия расходуется расточительно. Применение электрического амортизатора позволяет преобразовать энергию вибраций в электрическую энергию и затем сохранить ее в аккумуляторе. Амортизатор состоит из цилиндрического линейного генератора с постоянными магнитами, пружины и аккумулятора электрической энергии. Генератор, работающий как демпфер и преобразователь, совместно с батареей являются основными частями амортизатора. Основная цель статьи — анализ характера переходного процесса при воздействии ступенчатой нагрузки.

Генератор постоянно работает в переходном режиме, описываемом системой дифференциальных уравнений (ДУ) третьего порядка, которая характеризует переходный процесс в электрической цепи и колебания механической части амортизатора. В зависимости от коэффициентов ДУ переходный процесс может быть аperiodическим или колебательным. Представлено аналитическое решение системы ДУ на основе операторного метода. Получено решение, которое позволяет исследовать переходные процессы при различных законах воздействия возмущающей силы. Приведены результаты расчета для перемещения и скорости вторичной части, а также тока генератора при воздействии ступенчатой силы. Показано, что для правильной работы амортизатора необходимо, когда ЭДС генератора будет меньше напряжения на аккумуляторе, обмотку генератора замыкать накоротко, а сам аккумулятор отключать от сети. При этом корни характеристического многочлена будут действительными и отрицательными, а колебания перемещения и скорости — аperiodическими.

*Ключевые слова:* электрический амортизатор, линейный генератор, операторный метод, дифференциальные уравнения.

*Для цитирования:* Мощинский Ю.А., Соколова Е.М. Аналитическое исследование переходных процессов в электрическом амортизаторе // Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 62—69. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-62-69.

## An Analytical Study of Transients in an Electric Shock Absorber

Yu.A. Moschinsky, E.M. Sokolova

The kinetic energy of vibration that occurs when an electric car moves on a rough road is usually transformed into thermal energy in mechanical shock absorbers and other means of damping and dissipates; that is, this energy is wasted. By using an electric shock absorber it becomes possible to convert the energy of vibration into electrical energy with subsequently storing it in a battery. The electric shock absorber consists of a cylindrical permanent-magnet linear generator, a spring and an electric energy storage battery. The generator, which operates as a damper and a converter together with the battery, are the shock absorber main parts. The aim of the article is to analyze the transient triggered by a step load.

The generator operates constantly in a transient mode, which is described by a system of third-order differential equations (DEs), which describes the transient in the electrical circuit and the oscillations of the shock absorber mechanical part. Depending on the DE coefficients, the transient may be aperiodic or oscillatory in nature. The analytical solution of the DE system using the operator method is presented. A solution using which the transients triggered by a disturbing force described by different variation laws can be studied is obtained. The calculation results for the secondary part displacement and velocity, and for the generator current for the case when the system is subjected to a stepped force are given. It is shown that for ensuring correct operation of the shock absorber under the conditions when the generator EMF is less than the storage battery voltage, the generator winding should be short-circuited, and the battery itself should be disconnected from the network. In that case, the characteristic polynomial will have real and negative roots, and the displacement and velocity fluctuations will be aperiodic in nature.

*Key words:* electric shock absorber, linear generator, operator method, differential equations.

*For citation:* Moschinsky Yu.A., Sokolova E.M. An Analytical Study of Transients in an Electric Shock Absorber. Bulletin of MPEI. 2020;2:62—69. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-62-69.

### Введение

Идея электрического амортизатора изложена в ряде литературных источников [1 — 4]. Он состоит из линейного генератора, пружины и накопителя электрической энергии — аккумулятора.

Выборочный обзор статей за последние годы показывает, что в них основное внимание уделяется разработке и оптимизации конструкции линейного генератора и созданию имитационных моделей системы. Так, исследования, проведенные в [1, 4, 5], доказали, что

предпочтительной является конструкция линейного генератора с коротким наружным индуктором, в пазах которого расположена трехфазная обмотка генератора. Вторичный элемент имеет радиально намагниченные постоянные магниты с остаточной индукцией  $B_r = 0,9 \dots 1,2$  Тл и коэрцитивной силой  $H_c = (6 \dots 10) \cdot 10^5$  А/м на основе редкоземельных элементов, что позволяет уменьшить массу системы возбуждения.

Электрический амортизатор обычно работает в динамических режимах. Во время езды по неровной

дороге возникают колебания автомобиля, в результате вторичный элемент перемещается относительно индуктора. Вследствие относительного линейного перемещения элементов: первичного с обмоткой и вторичного с постоянными магнитами, в обмотке индуктируется переменная ЭДС, которая выпрямляется трехфазным выпрямителем и подается на аккумулятор (рис. 1), являющийся накопителем электрической энергии.

Таким образом, представляет интерес исследование процессов преобразования механической энергии в электрическую в этих режимах.

Для моделирования электромеханических преобразователей различных типов используются следующие подходы. Первый из них — моделирование на основе уравнений обобщенного электромеханического преобразователя энергии [3, 6]. Однако в указанных работах отсутствует анализ колебаний электрического амортизатора. Вторым подходом является составление полевой модели [7 — 9]. В нем определяются параметры генератора по результатам расчета магнитного поля и оптимизируются его показатели. Данные модели более точно описывают процессы в преобразователе, однако машинное время для расчета увеличивается.

Публикаций, в которых изучаются колебательные процессы с целью выяснения общих особенностей и закономерностей протекания этих процессов в системе электрического амортизатора и условий их суще-

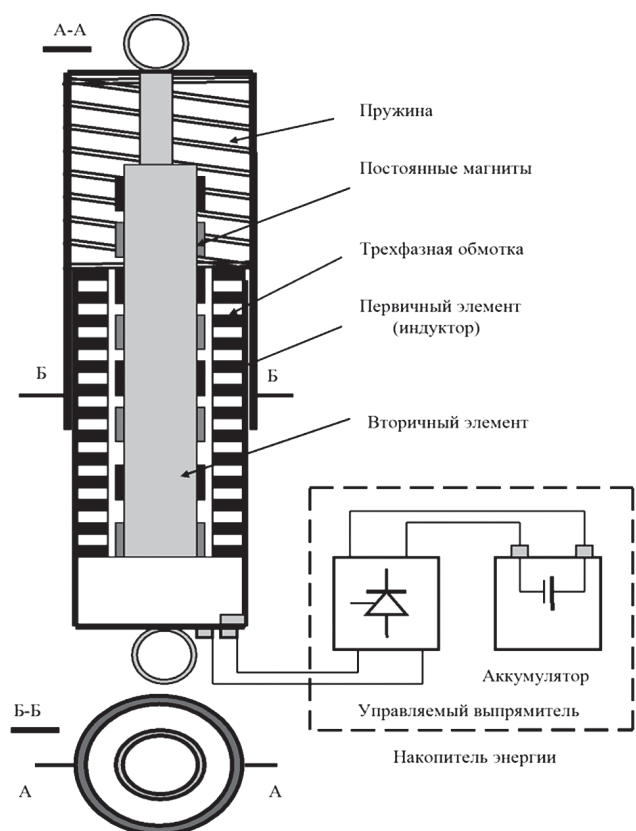


Рис. 1. Конструктивная схема электрического амортизатора

ствования, т. е. анализа специфических типов движения, присущих данному классу систем, не обнаружено. Цель данной работы — изучение характера колебательных процессов на основе анализа решений дифференциальных уравнений амортизатора.

**Постановка задачи**

Система дифференциальных уравнений, описывающих работу амортизатора, состоит из дифференциальных уравнений на основе второго закона Кирхгофа для электрической цепи (рис. 2), включающей активные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности фаз генератора, ЭДС в якоре от поля постоянных магнитов и напряжение аккумулятора, и дифференциальных уравнений равновесия сил, действующих на ротор демпфера, согласно второму закону Ньютона (рис. 3).

Уравнение равновесия напряжений и ЭДС для эквивалентной схемы (см. рис. 2) имеет вид

$$L \frac{di}{dt} + Ri = e - U_{ak}, \tag{1}$$

где  $R = R_d + 2R_a$  — активное сопротивление цепи  $R_{ak}$ ;  $U_{ak}$  — напряжение аккумулятора;  $R_d$  — сопротивление диода;  $L = 2L_a$  — общая индуктивность линейного генератора при работе на выпрямитель;  $R_a, L_a$  — активное сопротивление и индуктивность фазы якоря генератора;  $e = Kv$  — ЭДС генератора;  $K$  — постоянный коэффициент для ЭДС.

Поскольку в схеме выпрямления используется трехфазный двухполупериодный выпрямитель, то преобразованию подвергаются линейные напряжения.

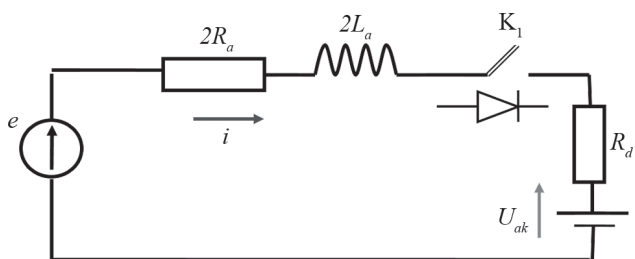


Рис. 2. Эквивалентная схема электрического амортизатора с диодом (ключ K1)

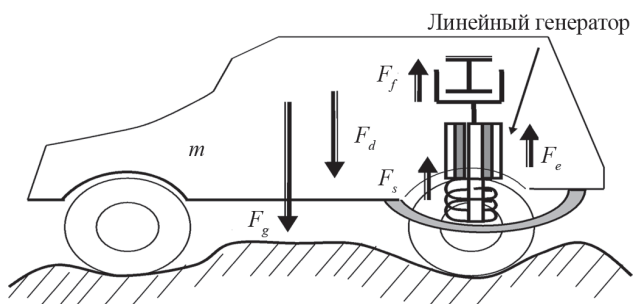


Рис. 3. Механическая модель электрического амортизатора

В результате к аккумулятору попеременно подключаются две фазы генератора, и этим объясняются удвоения сопротивления  $R_d$  и индуктивности фазы  $L_d$ .

Механическая система автомобиля с действующими силами (см. рис. 2) описывается следующим дифференциальным уравнением второго порядка:

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

где  $m$  — масса машины;  $F_g = mg$ ,  $g$  — гравитационная постоянная;  $F_d$  — движущая сила;  $F_{em} = K_e i$  — электромагнитная сила,  $i$  — выходной ток;  $F_s = K_s x$  — сила пружины,  $K_s$  — постоянная пружины;  $x$  — линейное перемещение вторичного элемента линейного генератора относительно индуктора;  $F_f = vD$  — сила трения,  $D$  — коэффициент трения;  $v$  — относительная скорость вторичного элемента.

По приведенным уравнениям создана модель амортизаторов в программном комплексе Matlab-Simulink [6]. Она позволяет исследовать динамические процессы. При подаче на ее вход возмущающего воздействия система входит в колебательный режим, при этом коэффициенты дифференциального уравнения, например сопротивление  $R_d$ , определяют характер колебаний. При  $R_d \approx 0$  колебания практически не затухают, т. е. режим системы автоколебательный. При увеличении  $R_d$  колебания становятся затухающими, поэтому работа амортизатора зависит от величины сопротивления. На модели трудно установить оптимальную величину  $R_d$  и других коэффициентов системы, обеспечивающую желаемый характер переходного процесса.

### Результаты исследования

Рассмотрим аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (1), (2), которое позволяет более подробно исследовать качество переходного процесса и влияние коэффициентов системы на характер колебаний.

Следует отметить, что наличие диода в электрической схеме требует анализа двух режимов работы амортизатора:

- когда ЭДС генератора больше напряжения аккумулятора ( $e > U_{ak}$ ), диод открыт (ключ  $K_1$  замкнут) и его сопротивление мало, полагаем  $R_d = 0$ ;
- когда ЭДС генератора меньше напряжения аккумулятора ( $e < U_{ak}$ ), диод закрыт (ключ  $K_1$  разомкнут), его сопротивление велико, полагаем  $R_d = 1000$  Ом.

Следовательно, представляет теоретический интерес исследование переходных процессов для этих режимов при воздействии ступенчатой нагрузки на амортизатор.

Для поиска аналитических зависимостей перемещения, скорости и тока применим операторный метод решения системы линейных дифференциальных уравнений [10], согласно которому искомые функции пере-

менных  $f(t)$ , называемых оригиналами, заменяются функциями  $F(p)$ .

Начальные условия для тока и скорости — нулевые. Начальное условие для перемещения находится из решения (2) при подстановке в него значений  $i = v = 0$ ,  $dx/dt = 0$  и  $F_d = 0$ , т.е.

$$mg = K_s X_0.$$

Тогда  $X_0 = mg/K_s = 0,093$  м.

Представим систему дифференциальных уравнений (1), (2) в операторной форме. Она будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} LpI(p) + RI(p) - KV(p) &= -\frac{U_{ak}}{p}; \\ mpV(p) + DV(p) + K_e I(p) + K_s X(p) &= \frac{mg}{p} + \frac{F_d}{p}; \\ pX(p) - X_0 &= V(p). \end{aligned}$$

Решив данную систему относительно перемещения  $X(p)$ , получим уравнение в виде дроби

$$X(p) = \frac{M(p)}{pN(p)}. \quad (3)$$

Здесь полиномы третьей степени  $M(p)$  и  $N(p)$  равны

$$M(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0,$$

где коэффициенты полинома числителя  $M(p)$  —  $a_3 = LmX_0$ ;  $a_2 = (LD + Rm)X_0$ ;  $a_1 = (RD + K_e K)X_0 + LA_m$ ;  $a_0 = RA_m - U_{ak} K_e$ ;  $A_m = F_d + mg$ .

$$N(p) = b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0,$$

где коэффициенты полинома знаменателя  $N(p)$  —  $b_3 = Lm$ ;  $b_2 = (LD + Rm)X_0$ ;  $b_1 = RD + K_e K + LK_s$ ;  $b_0 = RK_s$ .

Аналитическое решение для рациональной дроби (3) находится с помощью теоремы разложения по формуле [10]:

$$x(t) = \frac{M(0)}{N(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{M(p_k)}{p_k N'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (4)$$

где  $p_k$  — корни полинома знаменателя  $N(p) = 0$ .

Число действительных корней полинома зависит от его коэффициентов. Уравнение может иметь или три действительных корня или один действительный и два мнимых.

Согласно (4) аналитическое решение для перемещения  $x(t)$  имеет вид:

$$x(t) = A_0 + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t}.$$

Зависимость скорости  $v$  от времени определяется как

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 = \sum_{k=1}^3 A_k p_k e^{p_k t}.$$

Если среди корней есть комплексные корни (они могут быть только сопряженными), например  $p_2 = -\alpha - j\omega$  и  $p_3 = -\alpha + j\omega$ , то в решении (4) удобнее заменить соответствующую пару экспонент функцией  $C_1 = e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \gamma)$ , где  $C_1, \gamma$  — постоянные интегрирования, зависящие от  $A_2$  и  $A_3$ . Тогда решение (4) при мнимых корнях может быть представлено в виде:

$$x(t) = A_0 + A_1 e^{p_1} + C_1 e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \gamma).$$

Выражение для скорости:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = p_1 A_1 e^{p_1} - \alpha C_1 e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \gamma) + \omega C_1 e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \gamma). \quad (5)$$

Коэффициенты зависимости тока от времени, которая выглядит как

$$i(t) = A_{0i} + A_{1i} e^{p_1} + A_{2i} e^{p_2} + A_{3i} e^{p_3},$$

находятся из дифференциального уравнения (1) при подстановке в него выражения для скорости (5). Приравняв коэффициенты при одинаковых экспонентах, найдем их значения:

$$A_{1i} = \frac{K_e p_1 A_1}{L p_1 + R}; \quad A_{2i} = \frac{K_e p_2 A_2}{L p_2 + R};$$

$$A_{3i} = \frac{K_e p_3 A_3}{L p_3 + R}; \quad A_{0i} = -\frac{U_{ak}}{R}.$$

Для анализа работы электрического амортизатора в динамических режимах получены зависимости скорости и перемещения от времени. При расчете исполь-

зованы 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; масса —  $m = 100$  кг; постоянная пружины —  $K_s = 10,3 \cdot 10^3$  Н/м; коэффициент трения —  $D = 0,12$  Н·с/м; гравитационная постоянная —  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>; сопротивление аккумулятора —  $R_{ak} = 0$  Ом; напряжение источника —  $U_{ak} = 12$  В.

Движущая сила представляет собой динамическую силу, приложенную к амортизатору, когда автомобиль встречает неровность во время движения, и принята равной  $F_d = 1450$  Н.

Результаты моделирования при ступенчатом воздействии движущей силы, когда активное сопротивление схемы составляет  $R = 2,6$  Ом, изображены на рис. 4, где представлены временные зависимости перемещения индуктора амортизатора —  $x$  и скорости —  $v$ . На рисунке 5 продемонстрированы зависимости перемещения и скорости при активном сопротивлении электрической схемы  $R = 1000$  Ом.

Характер зависимости перемещения  $x$  (см. рис. 3) показывает, что после приложения к амортизатору ступенчатой силы, оно плавно нарастает, приближаясь к установившемуся значению  $x_{уст} = [(mg + F_d) - U_{ak} K_e / R] / K_s = 0,203$  м.

Апериодический процесс колебаний объясняется тем, что при малом сопротивлении  $R$  корни полинома  $N(pk) = 0$  будут вещественными и отрицательными. Для случая, когда диод открыт (ключ К1 замкнут, рис. 2),  $R = 2R_a = 2,6$  Ом) они равны:  $p_1 = -172,5$  1/с;  $p_2 = -37,29$  1/с;  $p_3 = -3,31$  1/с. Постоянная составляющая  $A_0$  и коэффициенты при экспонентах  $A_k$  при этом составляют:  $A_0 = 0,235$ ;  $A_1 = 2,6 \cdot 10^{-5}$ ;  $A_2 = 0,0113$ ;  $A_3 = 0,1282$ . Таким образом, зависимость  $x(t)$  включа-

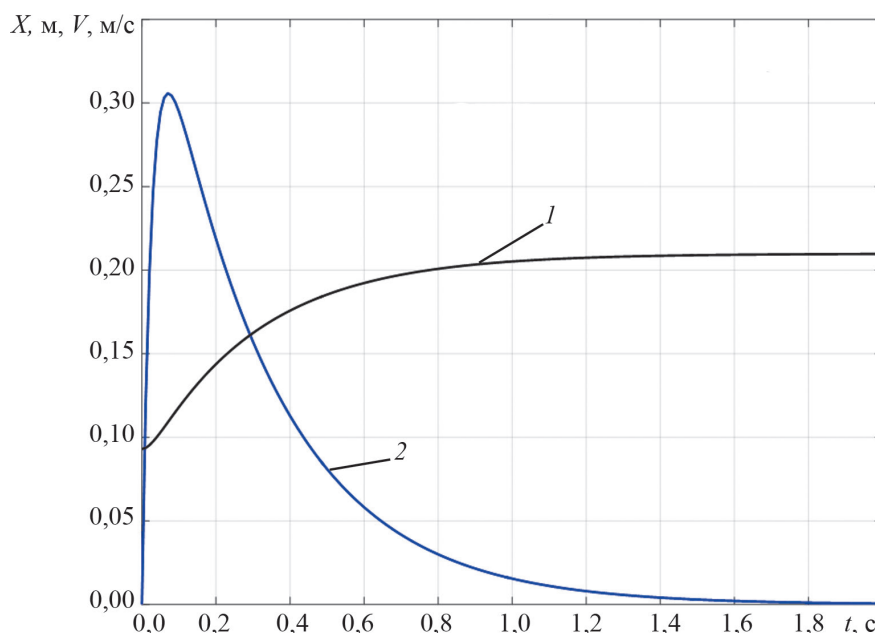


Рис. 4. Графики перемещения  $X$  (1) и скорости  $V$  (2) вторичного элемента,  $R = 2,6$  Ом

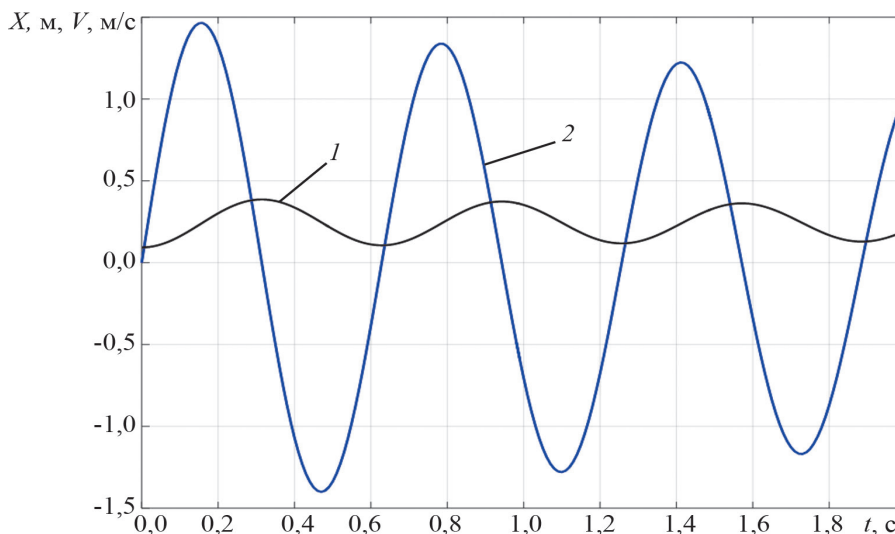


Рис. 5. Графики перемещения  $X$  (1) и скорости  $V$  (2) вторичного элемента,  $R = 1000$  Ом

ет сумму экспонат, стремящихся к нулю при  $t \rightarrow \infty$ , а решение к величине установившегося значения —  $A_0$ . Также плавно, без колебаний меняется и скорость, поскольку она образована экспонентами с этими же корнями, но с другими коэффициентами.

Когда диод заперт (ключ К1 разомкнут, рис. 2), т. е. при большом активном сопротивлении  $R$  в электрической схеме, два корня полинома  $N(p_k) = 0$  будут комплексными:  $p_2 = -0,145 + j9,9$  1/с;  $p_3 = -0,145 - j9,9$  1/с, а один действительным —  $p_1 = -2,45 \cdot 10^4$  1/с. Коэффициенты при экспонентах:  $A_0 = 0,248$ ;  $A_1 = 1,36 \cdot 10^{-9}$ ;  $A_2 = 0,075 + j0,0003$ ;  $A_3 = 0,075 + j0,0003$ .

Характер корней объясняет, почему графики зависимостей перемещения  $x$  и скорости  $v$  на рис. 5 представляют собой медленно затухающие колебания с частотой  $f = \omega/(2\pi) = 3,1$  Гц. При комплексных корнях решение содержит синусоидальную функцию:

$$x(t) = X_0 + A_1 e^{-p_1 t} + C_1 e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \gamma) + C_2 e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \gamma).$$

Колебания возникают, когда скорость движущейся части генератора становится меньше значения, при ко-

тором индуцируемая ЭДС равна напряжению на аккумуляторе ( $e = U_{ak}$ ).

Токи для двух режимов работы диода в электрической схеме показаны на рис. 6, 7. Зависимость тока на рис. 6 носит апериодический, а на рис. 7 — колебательный характеры, что также объясняется свойствами корней многочлена  $N(p) = 0$ .

Из анализа зависимости тока (см. рис. 6) следует, что его амплитуда мала, т. е.  $i_{\max} \sim 0,32$  А. Следовательно, амплитуда электромагнитной силы также будет небольшой:  $F_{em, \max} = K i_{\max} = 23,04$  Н·М. Электромагнитная сила мала и не создает значительного противодействия приложенной силе, что приводит к колебаниям перемещения  $x$  и скорости  $v$  вторичного элемента около их установившихся значений (см. рис. 5).

Таким образом, для случая подключения генератора к аккумулятору через диод при езде автомобиля по неровной дороге амортизатор работает в двух режимах:

- при скоростях, когда  $e > U_{ak}$  (процесс зарядки аккумулятора) переходные процессы амортизатора затухающие;

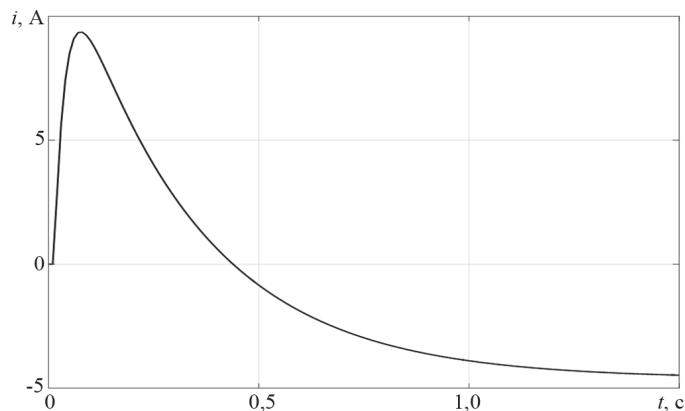


Рис. 6. Осциллограмма тока  $i$  в электрической схеме,  $R = 2,6$  Ом

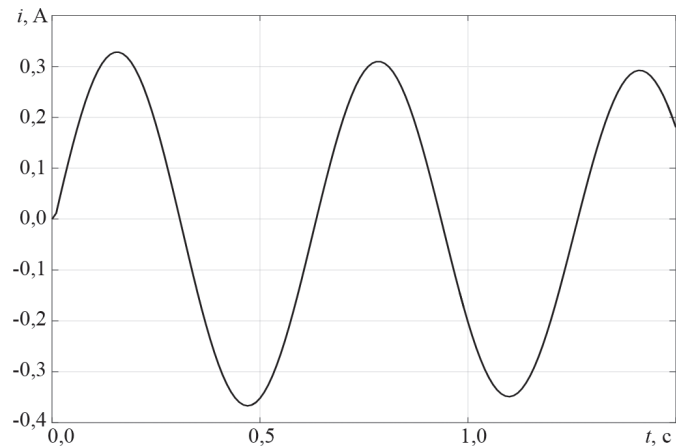


Рис. 7. Осциллограмма тока  $i$  в электрической схеме,  $R = 1000$  Ом

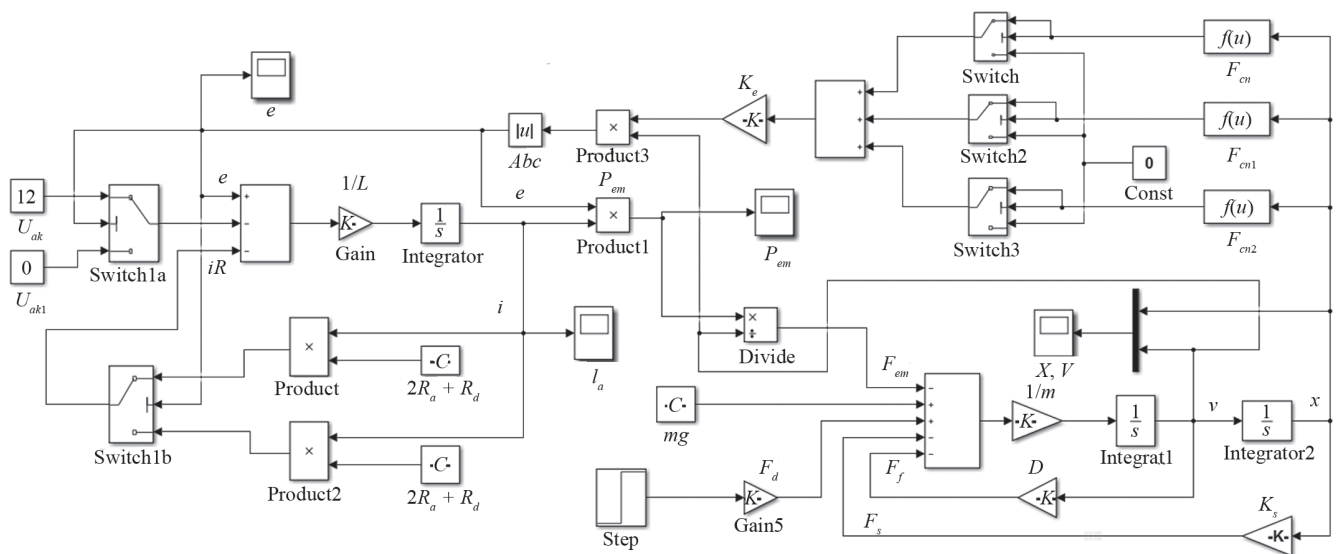


Рис. 8. Улучшенная математическая модель электрического амортизатора с двумя ключами в программе Matlab-Simulink

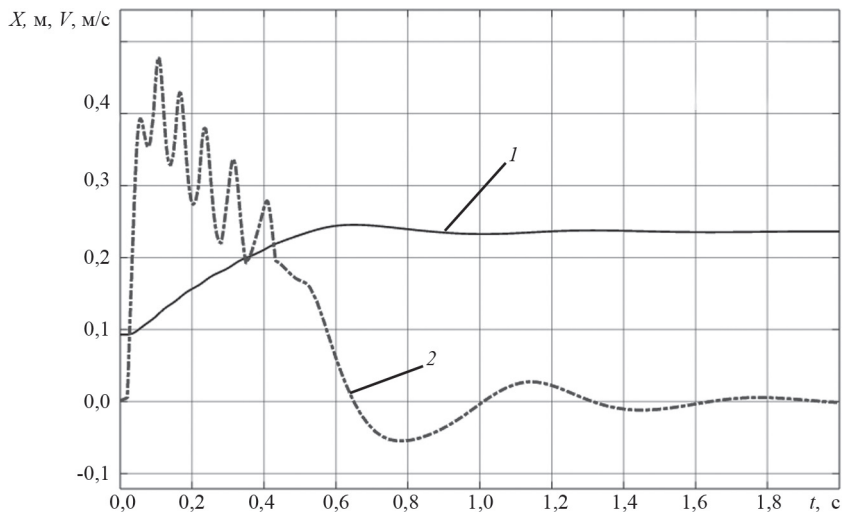


Рис. 9. Графики перемещения  $X$  (1) вторичного элемента и его скорости  $V$  (2) при воздействии движущей силы в виде ступени

• при скоростях, когда  $e < U_{ak}$ , переходные процессы амортизатора колебательные с небольшим затуханием.

Для устранения механических колебаний при  $e < U_{ak}$  необходимо в электрическую схему включить вместо одного неуправляемого ключа два управляемых. Один ключ отключает аккумулятор, когда  $e < U_{ak}$ , а второй замыкает генератор накоротко. В этом случае в обоих режимах показатели экспонент будут вещественными и отрицательными, а переходные процессы — затухающими.

На основе проведенных исследований была доработана математическая модель электрического амортизатора (рис. 8) [6]. Выходные характеристики перемещения и скорости вторичного элемента для этой модели даны на рис. 9. Из приведенных кривых (см. рис. 9) следует, что использование двух ключей в электрической схеме (одного (Switch1a) — для отключения аккумулятора, а другого (Switch1b) — для замыкания

генератора накоротко) приводит к быстрому затуханию переходного процесса.

### Заключение

Получено аналитическое решение системы линейных дифференциальных уравнений третьего порядка, с постоянными коэффициентами, описывающими переходной процесс электрического амортизатора автомобиля.

Анализ характера корней системы дифференциальных уравнений показал, что в зависимости от величины активного сопротивления электрической цепи, переходные процессы движения вторичной части амортизатора могут быть или апериодическими, или колебательными.

Для устранения механических колебаний электрическая схема должна иметь два ключа (транзистора), один для отключения аккумулятора, а другой — для замыкания генератора накоротко, когда напряжение на генераторе становится меньше напряжения аккумулятора.

### Литература

1. Dixon J.C. The Shock Absorber Handbook. N.-Y.: John Wiley&Sons, 2007.
2. Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.
3. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб.: Корона Принт, 2008.
4. Patil R.U., Gawade S.S. Design and Static Magnetic Analysis of Electromagnetic Regenerative Shock Absorber // Intern. J. Advanced Eng. Technol. 2012. V. III. No. 2. Pp. 54—59.
5. Gupta A., Jendrzejczyk J.A. Design of Electromagnetic Shock Absorbers // Intern. J. Mechanics and Material in Design. 2006. V. 3. No. 3. Pp. 285—291.
6. Соколова Е.М., Мошинский Ю.А. Модель электродинамического амортизатора // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Ульяновск: Изд-во Ульяновского гос. техн. унт-та., 2017. С. 22—29.
7. Piskur P., Just K., Tarnowski W. Definition of Optimization Problem for Electromagnetic Linear Actuator // Proc. COMSOL Conf. Milan, 2010. Pp. 4—18.
8. Piskur P., Tarnowski W., Just K. Model of the Electromagnetic Linear Actuator for Optimization Purposes // Proc. 23<sup>rd</sup> European Conf. Modeling and Simulation. Madrid, 2009. Pp. 207—214.
9. Lohgxin Zhen, Xiogang Wei. Structure and Magnetic Field Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber // Proc. Intern. Conf. Information Eng. 2010. V. 3. Pp. 152—153.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1974.

### References

1. Dixon J.C. The Shock Absorber Handbook. N.-Y.: John Wiley&Sons, 2007.
2. Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems. Amsterdam: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.
3. Khiterer M.Ya., Ovchinnikov I.E. Sinkhronnye Elektricheskie Mashiny Vozvratno-postupatel'nogo Dvizheniya. SPb.: Korona Print, 2008. (in Russian).
4. Patil R.U., Gawade S.S. Design and Static Magnetic Analysis of Electromagnetic Regenerative Shock Absorber. Intern. J. Advanced Eng. Technol. 2012. V. III;2: 54—59.
5. Gupta A., Jendrzejczyk J.A. Design of Electromagnetic Shock Absorbers. Intern. J. Mechanics and Material in Design. 2006;3;3:285—291.
6. Sokolova E.M., Moshchinskiy Yu.A. Model' Elektrodinamicheskogo Amortizatora. Voprosy Teorii i Proektirovaniya Elektricheskikh Mashin. Ulyanovsk: Izd-vo Ulyanovskogo Gos. Tekhn. Unt-ta., 2017;22—29. (in Russian).
7. Piskur P., Just K., Tarnowski W. Definition of Optimization Problem for Electromagnetic Linear Actuator. Proc. COMSOL Conf. Milan, 2010:4—18.
8. Piskur P., Tarnowski W., Just K. Model of the Electromagnetic Linear Actuator for Optimization Purposes. Proc. 23<sup>rd</sup> European Conf. Modeling and Simulation. Madrid, 2009:207—214.
9. Lohgxin Zhen, Xiogang Wei. Structure and Magnetic Field Analysis of Regenerative Electromagnetic Shock Absorber. Proc. Intern. Conf. Information Eng. 2010;3:152—153.
10. Korn G., Korn T. Spravochnik po Matematike. M.: Nauka, 1974. (in Russian).

**Сведения об авторах:**

**Мощинский Юрий Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: MoshchinskyYA@mpei.ru

**Соколова Елена Михайловна** — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: SokolovaYM@mpei.ru

**Information about authors:**

**Moschinsky Yuriy A.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: MoshchinskyYA@mpei.ru

**Sokolova Elena M.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: SokolovaYM@mpei.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 03.07.2019

**The article received to the editor:** 03.07.2019