

УДК 681.518

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ

**Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, М. О. ВНУКОВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** проезжая часть, искусственная неровность, поступательное движение, вращательное движение, электрогенератор, Matlab, Simulink.

### **Введение**

Искусственные неровности типа «лежачий полицейский» повсеместно распространены на дорогах Республики Беларусь. Автомобили, приближаясь к таким неровностям, снижают скорость и при переезде через них затрачивают некоторую энергию. Идея преобразования части этой энергии в электрическую энергию не нова. Существует множество разработок по данной тематике, однако все они представлены в основном в виде патентов. Из схем, приводимых в патентах, трудно судить об эффективности и экономической оправданности сооружения подобных установок. Вместе с тем, очевидно, что процесс генерирования электроэнергии в системе «автомобиль – искусственная неровность – механический преобразователь – электрогенератор» является достаточно сложным и зависит от множества факторов, таких, как скорость наезда и масса автомобиля, жесткость пружин, трение движущихся частей механического преобразователя, мощность и характер нагрузки электрогенератора и т. д. Часть этих факторов можно смоделировать в среде Simulink программного пакета Matlab, где имеются необходимые инструменты для реализации виртуальных элементов механики и электротехники, а также интерфейс для осуществления взаимодействия между ними.

Цель исследований – создать имитационную модель электрогенератора для проезжей части, позволяющую анализировать влияющие факторы и рассчитывать значения получаемой электроэнергии.

### **Аналитический обзор источников литературы**

В процессе движения автомобиль непрерывно взаимодействует с поверхностью дорожного покрытия. Процесс этого взаимодействия описан в имитационной модели [1]. На основе дифференциальных уравнений второго порядка авторам удалось с достаточной точностью описать взаимное влияние реакции водителя в процессе динамики автомобиля на искусственную неровность проезжей части.

В [2] для накапливания энергии движущихся автомобилей предлагается использовать суперконденсаторы.

В [3] предложен механико-электрический генератор, функционирующий на основе поступательного или вращательного движения различных объектов, таких, как автомобиль или человек. В патенте рассматриваются только конструкции ротора и статора генератора.

В [4] представлены разработки пластичного основания, передающего энергию с наезжающего автомобиля на электрогенератор. Какие-либо расчеты в патенте отсутствуют.

В [5] рассматривается система накопления электроэнергии, функционирующая на основе линейного электромагнитного генератора. Расчеты или ссылки на них здесь также отсутствуют.

В [6] предложен гидравлический преобразователь для передачи энергии от наезжающего автомобиля к электрогенератору. В патенте имеются только описания конструкций.

В [7] генерирующая установка функционирует на основе опускающейся и поднимающейся наклонной плоскости. Здесь также содержатся только описания конструкций.

### Упрощенная модель генерирующей установки

Обобщая конструкции, рассматриваемые в [2]–[7], можно выделить основные элементы, из которых состоит электрогенерирующая установка для проезжей части. Эти элементы представлены на функциональной схеме в рис. 1.

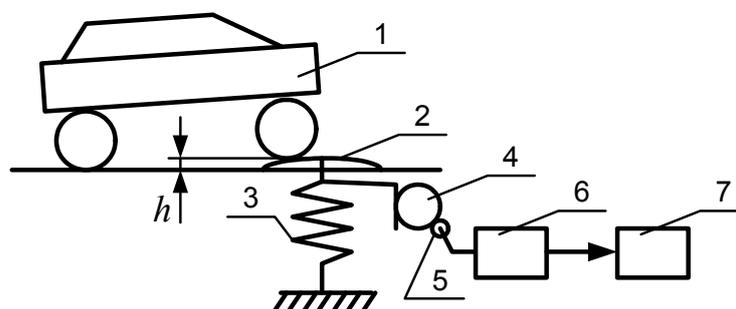


Рис. 1. Функциональная схема основных элементов электрогенерирующей установки для проезжей части: 1 – автомобиль; 2 – искусственная неровность; 3 – пружина; 4 – преобразователь поступательного движения во вращательное; 5 – редуктор; 6 – электрогенератор; 7 – нагрузка электрогенератора

Данная система работает следующим образом. Автомобиль 1 с массой  $m_c$  наезжает на платформу с массой  $m_p$ , искусственной неровности 2, которая начинает опускаться, преодолевая сопротивление пружины 3 и ротора электрогенератора 6. При этом поступательное движение платформы преобразуется во вращательное движение с помощью трансмиссии 4 и затем через редуктор 5 воздействует на ротор электрогенератора 6, цепь статора которого соединена с нагрузкой 7.

Если высота искусственной неровности равна  $h$ , то потенциальная энергия  $E_{\text{пот}}$  автомобиля, мгновенно оказавшегося одной парой колес на вершине этой неровности, в идеальном случае составит:

$$E_{\text{пот}} = \frac{m_c}{2} gh, \quad (1)$$

где  $m_c$  – масса автомобиля;  $g$  – ускорение свободного падения.

В соответствии с первым законом термодинамики и законами механики только часть энергии  $E_{\text{пот}}$  может быть преобразована в электрическую энергию. Однако для предварительной оценки возможного количества выработанной энергии можно воспользоваться формулой (1).

Пусть за сутки через искусственную неровность переезжает  $n$  автомобилей двумя парами колес, тогда общая потенциальная энергия  $E$  будет равна:

$$E = 2n \frac{m_c}{2} gh = nm_c gh. \quad (2)$$

Предположим, что КПД рассматриваемой механико-электрической системы равно 100 %. Оценим требуемое количество автомобилей  $n$  со средней массой 2000 кг для получения потенциальной энергии в 1 кВт·ч при высоте неровности  $h = 0,1$  м. В результате в соответствии с (2) получим:

$$n = \frac{E}{m_c gh} = \frac{1000 \cdot 3600}{2000 \cdot 10 \cdot 0,1} = 1800.$$

На центральных улицах г. Гомеля среднее количество автомобилей, проезжающих в светлое время суток, составляет более 5000 [8]. Таким образом, даже при КПД около 50 % установкой может быть выработано достаточно энергии для работы уличных светильников в ночное время.

### Simulink-модель генерирующей установки

Для моделирования механической части установки в среде Simulink удобно воспользоваться библиотекой Simscape, а для электрической части – библиотекой SimPowerSystems.

Механическая часть разработанной модели представлена на рис. 2.

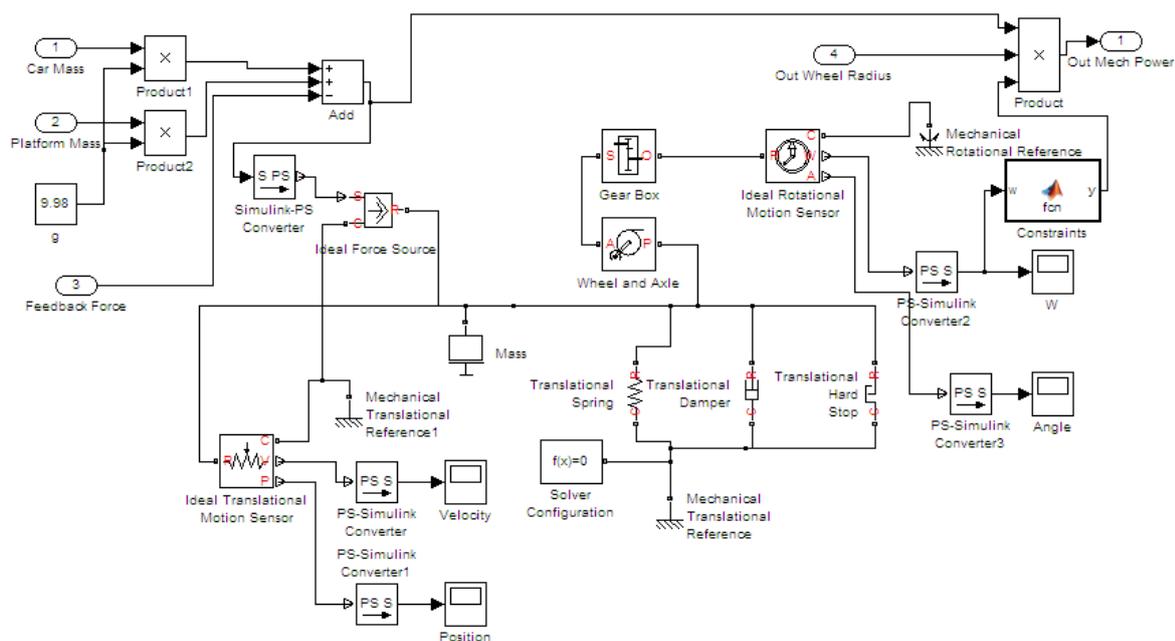


Рис. 2. Механическая часть Simulink-модели генерирующей установки

Входными параметрами механической части являются масса автомобиля Car Mass, масса платформы Platform Mass, обратная связь по силе Feedback Force и радиус выходного колеса редуктора Out Wheel Radius.

Величины Car Mass и Platform Mass умножаются на ускорение свободного падения  $g$ , а затем складываются. В результате вычисляется значение силы тяжести, которое представлено блоком Ideal Force Source из библиотеки Simscape. Дополнительно инерцию в системе формирует блок Mass.

Сила тяжести воздействует на пружину, которая реализована с помощью блоков Translational Spring, Translational Damper и Translational Hard Stop. В блоке Transla-

tional Spring задается упругость пружины в Н/м, а в блоке Translational Damper – жесткость пружины в Н/(м/с). Блок Translational Hard Stop определяет длину сжатой пружины.

Далее преобразование поступательного движения во вращательное осуществляется на основе блока Wheel and Axle, в котором нужно задать радиус  $R$  колеса, взаимодействующего с пружиной (элемент 4 на рис. 1). Это колесо соединено с редуктором, представленным блоком Gear Box, в котором задается передаточное число  $K_r$ .

Выходная механическая мощность Out Mech Power рассчитывается моделью по формуле

$$P_{mech} = \left( \left( \frac{m_c}{2} + m_p \right) g - F_{feedback} \right) R K_r w_r, \quad (3)$$

где  $m_c$  – масса автомобиля, кг;  $m_p$  – масса платформы, кг;  $F_{feedback}$  – эквивалентная сила обратной связи от нагрузки электрогенератора, Н;  $R$  – радиус колеса, взаимодействующего с пружиной, м;  $K_r$  – передаточное число редуктора;  $w_r$  – угловая частота вращения выходного колеса редуктора, рад/с.

Электрическая часть предлагаемой Simulink-модели приведена на рис. 3.

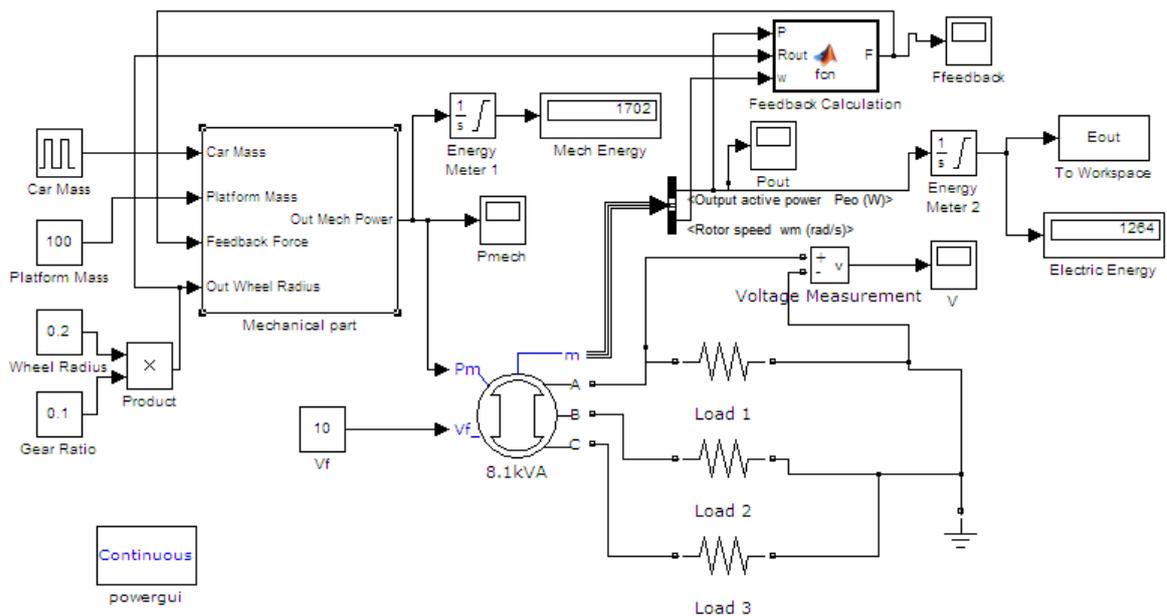


Рис. 3. Электрическая часть Simulink-модели генерирующей установки

Здесь механическая часть, показанная на рис. 2, представлена в виде единого блока Mechanical Part с соответствующими входами и выходом, на котором формируются расчетные значения механической мощности  $P_{mech}$ . Эти значения являются входными для синхронного трехфазного генератора, нагруженного на сопротивления Load. В блоке Feedback Calculation выполняется расчет величины  $F_{feedback}$  – эквивалентной силы обратной связи от нагрузки электрогенератора по следующей формуле:

$$F_{feedback} = P_g R K_r w_g, \quad (4)$$

где  $P_g$  – суммарная активная мощность на выходе генератора, Вт;  $w_g$  – угловая частота вращения ротора генератора, рад/с.

Величина  $F_{feedback}$  позволяет учесть механическое усилие, возникающее на роторе генератора при его работе на электрическую нагрузку. Это усилие эквивалентно снижению массы, которая давит на пружину, и, соответственно, величина  $F_{feedback}$  эквивалентна отрицательной силе тяжести. Таким образом, цикл расчета реализуется Matlab в следующей последовательности:

- масса автомобиля давит на платформу и пружину;
- начинают вращаться колеса трансмиссии;
- вращение передается на вал ротора генератора в виде механической мощности в соответствии с (3);
- генератор вырабатывает напряжение, которое обуславливает протекание токов в нагрузке;
- выполняется расчет значения  $F_{feedback}$  в соответствии с (4);
- из суммарной силы тяжести, давящей на пружину, вычитается значение  $F_{feedback}$ ;
- расчет повторяется циклически.

#### **Имитационное моделирование работы генерирующей установки**

Для оценочного расчета рассматриваемой электрогенерирующей системы выполнена имитация переезда автомобиля общей массой 2000 кг через платформу массой 100 кг. Имитация реализована с помощью Simulink-генератора прямоугольных импульсов (блок Car Mass на рис. 3), формирующего два импульса длительностью 0,3 с с периодом в 2 с, что эквивалентно переезду двух пар колес автомобиля через искусственную неровность со скоростью около 5 км/ч.

Для механической части выбраны следующие элементы:

- пружина сжатия: длина – 0,1 м; упругость – 100000 Н/м; жесткость – 20000 Н/(м/с);
- радиус колеса:  $R = 0,2$  м;
- передаточное число редуктора:  $K_r = 0,1$ .

Параметры пружины подобраны таким образом, чтобы она сжималась достаточно быстро при наезде автомобиля, но вместе с тем достаточно быстро возвращала платформу в исходное положение.

В качестве электрогенератора использован имеющийся в базе данных библиотеки SimPowerSystems синхронный генератор с номинальной мощностью 8,1 кВА и номинальным напряжением 400 В. Сопротивления нагрузки приняты равными 20 Ом, что соответствует номинальной нагрузке выбранного генератора.

Графики изменения механической мощности на валу электрогенератора, выходной мощности генератора и генерируемого фазного напряжения, полученные после выполнения расчетов системой Matlab в рассматриваемых условиях, показаны на рис. 4.

В момент наезда колес автомобиля на платформу происходит быстрый рост значения механической мощности  $P_{mech}$  (рис. 4, а) из-за сжатия пружины и, соответственно, вращения колес редуктора. При приближении пружины к своему конечному положению движение платформы замедляется и значение мгновенной механической мощности начинает снижаться.

Полученная механическая мощность передается на вал ротора электрогенератора, что, в свою очередь, обуславливает рост выходной электрической мощности  $P_{out}$  (рис. 4, б), отдаваемой в нагрузку.

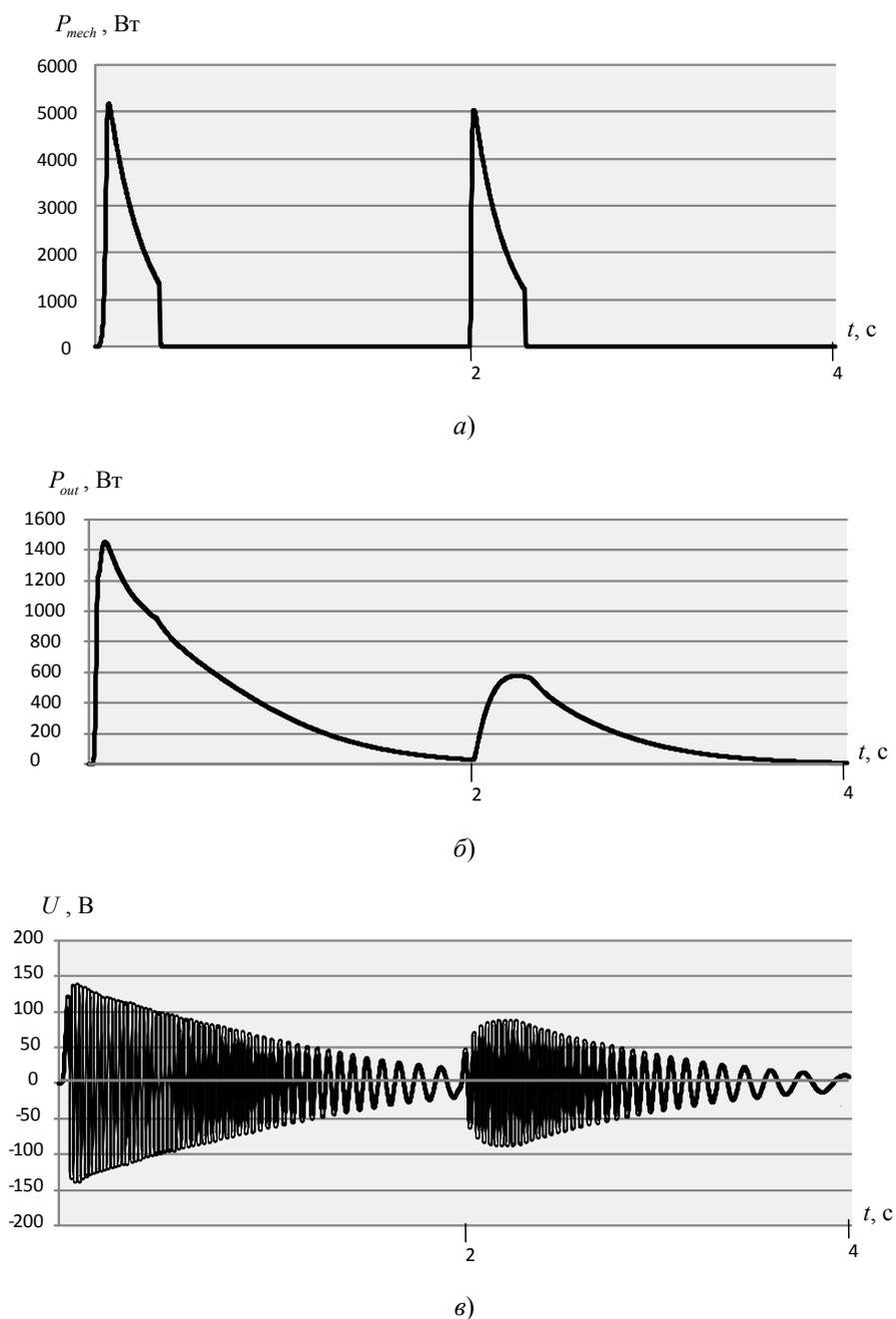


Рис. 4. Расчетные графики переходных процессов:

*a* – механическая мощность на валу электрогенератора; *б* – электрическая мощность на выходе электрогенератора; *в* – напряжение фазы «А» на выходе электрогенератора

Из-за инерционности ротора генератора после опускания платформы некоторое время продолжается его вращение и генерирование напряжения (рис. 4, в). По этой причине график электрической мощности отличается от графика механической мощности.

В результате расчета энергии за 4 с моделирования получены следующие значения:

- механическая энергия (Mech Energy на рис. 3) – 1702 Вт·с;
- электрическая энергия (Electric Energy на рис. 3) – 1264 Вт·с.

Таким образом, КПД электрической части равен:  $\frac{1264}{1702} = 0,74$ . В соответствии с (1) потенциальная энергия в рассматриваемой системе для двух пар колес составит:

$$E_{\text{пот}} = 2 \frac{m_c + m_p}{2} gh = (2000 + 100)10 \cdot 0,1 = 2100 \text{ Вт} \cdot \text{с},$$

где  $m_c$  – масса автомобиля;  $m_p$  – масса платформы.

Тогда общий КПД моделируемой установки будет равен:  $\frac{1264}{2100} = 0,6$ .

Полученные результаты демонстрируют, что среда Matlab позволяет выполнить предварительный анализ электрогенерирующей электромеханической системы для проезжей части в динамике и учесть множество различных влияющих факторов. Это может быть использовано в основном на этапах проектирования и технико-экономического обоснования применения подобных систем. Вместе с тем разработанную имитационную модель необходимо считать идеализированной, предназначенной для приближенной оценки эффективности генерирующей установки. Окончательные результаты могут быть получены только на действующей экспериментальной модели.

### Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Существует много разработок электрогенераторов для проезжей части, однако практически отсутствуют адекватные методики для технико-экономического обоснования их применения.
2. Оценка эффективности генерирующей установки в первом приближении может быть выполнена на основе расчета потенциальной энергии.
3. Для более точной оценки эффективности генерирующей установки можно использовать инструменты программной среды Simulink Matlab.
4. Имитационная Simulink-модель позволяет учесть параметры механической и электрической частей установки, а также их взаимное влияние.
5. Разработанная имитационная Simulink-модель может быть использована на этапах проектирования и технико-экономического обоснования применения электрогенерирующих систем для проезжей части.
6. Для окончательной проверки точности имитационной Simulink-модели необходима действующая экспериментальная установка.

### Литература

1. Brennan, S. The Illinois Roadway Simulator: A Mechatronic Testbed for Vehicle Dynamics and Control / S. Brennan, A. Alleyne // IEEE/Asme Transactions on Mechatronics. – 2000. – Vol. 5, No. 4. – December. – P. 349–359.
2. Yang, H. A Supercapacitor-based Energy Storage System for Roadway Energy Harvesting Applications / H. Yang. – Mineta Transportation Institute. – Report 19-03.
3. Method of generating electricity and electrical generator : pat. US3696251A / J. D. Last, D. Rowe ; granted 10.03.72 ; published 10.03.72.
4. Road Traffic Actuated Generator : pat. US4409489A / J. Hayes ; granted 11.10.83 ; published 11.10.83.
5. Structurally Integrated Electric Heat Generating Energy Recovery : pat. US8791584B2 / C. M. Sieger ; granted 29.07.14 ; published 29.07.14.

6. Traffic-actuated Electrical Generator Apparatus : pat. US7629698B2 / D. Horianopoulos, D. Horianopoulos ; granted 08.12.09 ; published 08.12.09.
7. Roadway electric generator : pat. US20030034652A1 / M. M. Villanueva, M. F. Leon ; granted 06.02.14 ; published 06.08.15.
8. Внуков, М. О. Оценочный расчет электрогенератора для проезжей части / М. О. Внуков, Д. И. Зализный // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2019. – С. 154–156.

*Получено 13.01.2020 г.*