

УДК 621.319.34

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ НА РАБОТУ СХЕМЫ ЭМГ
НА ОСНОВЕ ДУПЛИКАТОРА БЕННЕТА****В.П. Драгунов, В.Ю. Доржиев***Новосибирский государственный технический университет*

В статье проводится математическое моделирование работы схемы электростатического микроэлектромеханического генератора (ЭМГ) на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором. Данная схема позволяет за счет преобразования энергии механических колебаний в электрическую энергию осуществлять подзаряд химического источника питания. Основным достоинством схемы является то, что в отличие от большинства схем для подзаряда источника питания она не содержит трудно изготавливаемого по интегральной технологии индуктивного элемента и переключателей, требующих дополнительных схем синхронизации, потребляющих энергию. Проведено моделирование работы схемы с использованием модели идеального диода, которое показало, что в установившемся режиме ток подзаряда источника питания не принимает отрицательных значений – отсутствует фаза разряда источника. Введение в модель диода обратных токов привело к появлению фазы разряда источника питания, которая вызвана компенсацией утечек заряда конденсаторов через запертые диоды. Проведено моделирование работы схемы с учетом емкостей диодов в предположении, что они не зависят от приложенного к диодам напряжения. Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда источника питания с учетом обратных токов и емкостей диодов и определить условия, при которых этот ток будет положительным. Показано, что напряжение пробоя диодов ограничивает возможность увеличения тока подзаряда путем увеличения напряжения на элементах схемы.

Ключевые слова: преобразование энергии, МЭМС, микрогенератор, дубликатор Беннета, емкость диода, обратный ток.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-57-68

Введение

С развитием беспроводных технологий проблема ограниченной энергоемкости применяемых на сегодняшний день автономных источников питания – химических источников тока, требующих периодической замены или подзарядки, становится все более актуальной. В связи с чем интенсивно ведутся поиски путей увеличения их энергоемкости, а также разрабатываются новые виды автономных источников питания, причем особый интерес проявляется к источникам питания, преобразующим энергию окружающей среды непосредственно на месте расположения устройства-потребителя.

Из большого разнообразия источников энергии в окружающей среде одними из наиболее распространенных являются источники механической энергии [1]. Механическая энергия может быть преобразована в электрическую различными способами, однако наиболее перспективным представляется использование электростатических микроэлектромеханических генераторов (ЭМГ) [1, 2], которые могут быть изготовлены по интегральной технологии без применения экзотических технологических операций и материалов.

Структурно ЭМГ можно разделить на две части – механическую и электрическую. Механической частью является переменный конденсатор, играющий роль преобразователя и изготавливаемый по интегральной технологии так, что одна его обкладка жестко связана с корпусом, а вторая закреплена на упругих подвесах. Электрическая часть представляет собой электрическую схему, задающую необходимый режим работы преобразователя и передающую преобразованную энергию в нагрузку или накопительный элемент.

При проектировании механической части ЭМГ одной из основных задач, стоящих перед разработчиками, является увеличение максимальной емкости и глубины модуляции емкости переменного конденсатора. Типичные значения максимальной емкости, которых удалось достичь на сегодняшний день, составляют порядка сотни пФ, при этом глубина модуляции емкости, как правило, не превышает 3 [2–4].

При проектировании электрической части ЭМГ возникает задача выбора электрической схемы, которых на сегодняшний день разработано различное множество [5–7]. Среди них, на наш взгляд, наиболее перспективными являются схемы, подзаряжающие за счет преобразовываемой энергии химический источник питания (аккумуляторную батарею), который согласует ЭМГ с нагрузкой и позволяет питать ее в моменты отсутствия механических колебаний. В большинстве таких схем для увеличения заряда в системе используется индуктивный элемент, трудно реализуемый в рамках интегральной технологии, и переключатель, требующий дополнительной схемы синхронизации, потребляющей энергию. Предложенная же в работе [7] схема ЭМГ на основе дубликатора Беннета состоит только из двух конденсаторов и трех диодов. Ее анализ проводился в работах [7–13], однако применяемые в них модели диодов не учитывали ряд принципиальных особенностей поведения реальных диодов, которые влияют на точность анализа функционирования схемы в целом. Кроме того, в работах [7–10] проводился анализ схемы с дифференциальным конденсатором (он может быть представлен как два переменных конденсатора, емкость которых изменяется в противофазе [14]), изготовление которого по интегральной технологии затруднительно.

В данной работе проводится исследование влияния параметров диодов на функционирование схемы ЭМГ на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором, и определяются условия, необходимые для ее работы в режиме подзаряда источника питания.

1. Анализ работы схемы с идеальными диодами

Электрическая схема ЭМГ на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором представлена на рис. 1. Она содержит источник питания (V_0), переменный конденсатор (C_{var}), постоянный конденсатор (C_{store}) и три диода ($D_1 - D_3$). Преобразование механической энергии в электрическую происходит за счет совершения работы внешней механической силой, направленной против силы притяжения обкладок заряженного переменного конденсатора C_{var} . При этом емкость C_{var} уменьшается и заряд из него перетекает в источник питания, вызывая ток подзаряда конденсатора C_{store} (заряд в системе увеличивается).

В данной работе будем полагать, что $C_{\text{store}} \gg C_{\text{var}}$ [11], а C_{var} является идеальным плоским конденсатором, емкость которого изменяется от минимального (C_{min}) до максимального (C_{max}) значений за счет изменения внешней механической силой его межэлектродного зазора по гармоническому закону с частотой f .

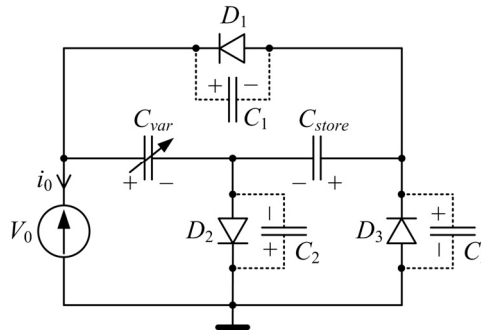


Рис. 1 – Электрическая схема ЭМГ на основе дупликатра Беннета с одним переменным конденсатором

Fig. 1 – Electrical circuit of e-VEH based on Bennet's doubler with single variable capacitor

Проведем моделирование работы схемы с использованием модели идеального диода (идеального ключа), аналогичной модели в [7, 8]. На рис. 2 представлены зависимости нормированных напряжений на конденсаторах, их суммарного заряда и емкости переменного конденсатора от времени, полученные в результате моделирования при $V_0 = 15$ В, $C_{\max} = 100$ пФ, $C_{\min} = 20$ пФ, $C_{\text{store}} = 1$ нФ и $f = 40$ Гц. В начальный момент времени конденсаторы были разряжены, а емкость C_{var} максимальна. Анализ этих зависимостей показывает, что в первый момент времени C_{var} по цепи $V_0 \rightarrow C_{\text{var}} \rightarrow D_2$ заряжается от источника питания до напряжения V_0 . Далее, при уменьшении емкости C_{var} , по цепи $C_{\text{var}} \rightarrow V_0 \rightarrow D_3 \rightarrow C_{\text{store}}$ течет ток, разряжающий C_{var} и заряжающий V_0 и C_{store} , причем заряд, ушедший из C_{var} , равен зарядам, пришедшим в V_0 и C_{store} . При увеличении емкости C_{var} вновь по цепи $V_0 \rightarrow C_{\text{var}} \rightarrow D_2$ течет ток, заряжающий C_{var} от источника питания до напряжения V_0 , и цикл повторяется. Через несколько таких циклов C_{store} заряжается до напряжения V_0 , и схема переходит в установившийся режим работы.

В установившемся режиме работы суммарный заряд конденсаторов остается постоянным и заряд от источника питания не потребляется – отсутствует ток через диод D_2 , а при увеличении емкости C_{var} течет ток по цепи $C_{\text{store}} \rightarrow D_1 \rightarrow C_{\text{var}}$, обусловленный перетеканием заряда из C_{store} в C_{var} . Таким образом, в установившемся режиме работы схемы при уменьшении емкости C_{var} течет ток подзаряда источника питания (i_0) и заряд (обозначим его q_0) из C_{var} перетекает в V_0 , при этом заряд C_{store} также увеличивается на q_0 , а при увеличении емкости C_{var} его заряд восстанавливается перетеканием q_0 из C_{store} .

При принятой модели диода средний ток подзаряда источника питания в установившемся режиме работы схемы ЭМГ на основе дупликатра Беннета с одним переменным конденсатором может быть оценен с помощью выражения

$$\bar{i}_0 = q_0 f = V_0 C_{\text{store}} f \frac{\eta - 2}{\alpha + 1}, \quad (1)$$

где $\alpha = C_{\text{store}}/C_{\min}$; $\eta = C_{\max}/C_{\min}$ – глубина модуляции емкости.

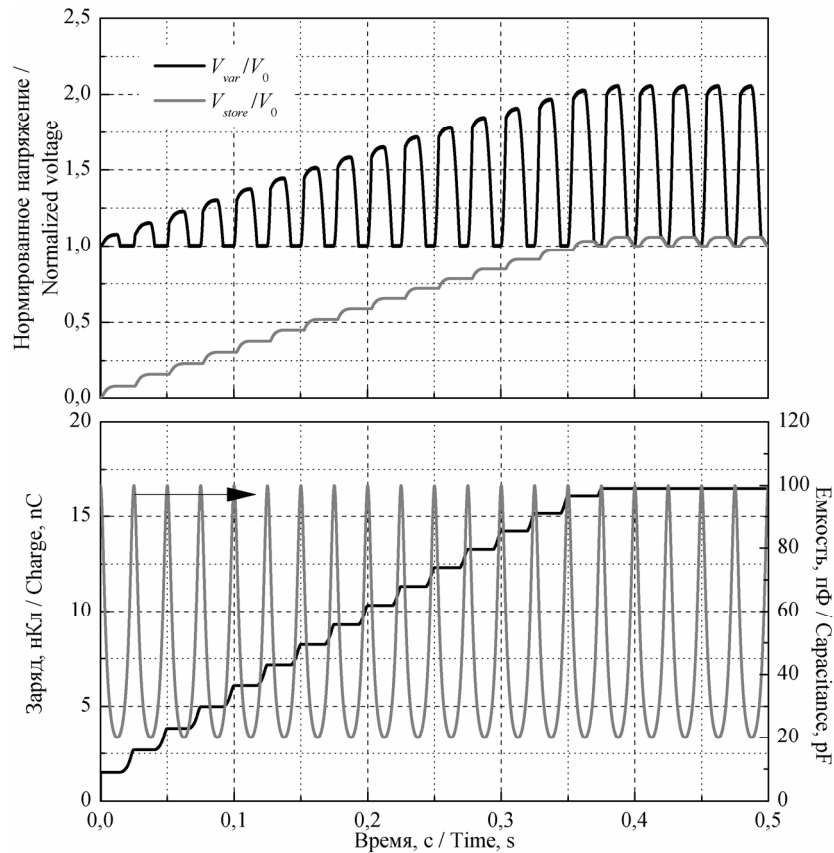


Рис. 2 – Зависимости нормированных напряжений на конденсаторах, их суммарного заряда и емкости переменного конденсатора от времени

Fig. 2 – Dependences of normalized capacitors voltages, their total charge and variable capacitor capacitance on the time

Анализ выражения (1) показывает, что средний ток подзаряда источника питания будет положительным при любом напряжении источника питания и при глубине модуляции емкости больше 2.

Однако сравнение расчетов с использованием (1) с экспериментом [9–13] показывает их существенное различие, которое вызвано, на наш взгляд, тем, что использованная модель диода не учитывает особенностей реальных диодов, таких как обратные токи, емкости и пробой.

2. Анализ влияния обратных токов диодов

Проведем моделирование работы схемы в предположении, что вольт-амперная характеристика диода описывается уравнением

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{V_D}{mV_T} \right) - 1 \right), \quad (1)$$

где I_D – ток диода; I_S – обратный ток насыщения; V_D – напряжение на диоде; m – коэффициент неидеальности; $V_T = 0,026$ В – температурный потенциал.

На рис. 3 представлены зависимости тока подзаряда источника питания от времени в установившемся режиме работы схемы, рассчитанные при принятых в предыдущем разделе параметрах и различных значениях обратного тока диодов.

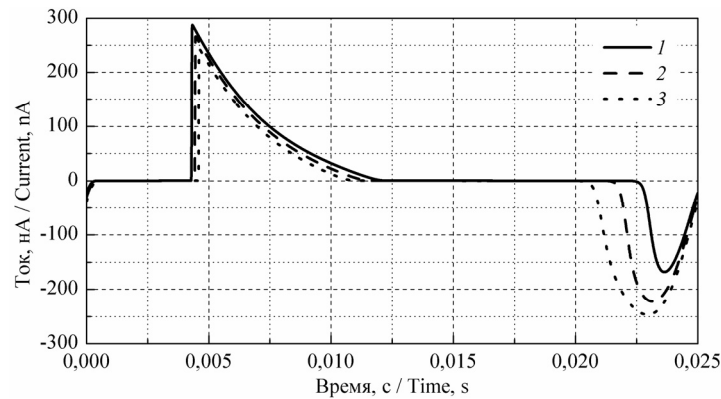


Рис. 3 – Зависимости тока подзаряда источника питания от времени:

1 – $I_S = 10$ нА, 2 – $I_S = 20$ нА, 3 – $I_S = 30$ нА

Fig. 3 – Dependences of charging current on the time:

1 – $I_S = 10$ nA, 2 – $I_S = 20$ nA, 3 – $I_S = 30$ nA

Из рисунка видно, что при наличии обратных токов диодов в установившемся режиме присутствует фаза разряда источника питания (ток подзаряда принимает отрицательные значения), причем при увеличении обратного тока разряд источника питания увеличивается, а подзаряд уменьшается. Оценки показывают, что среднее значение тока подзаряда при $I_S = 10$ нА составляет 20 нА, при $I_S = 20$ нА – 6 нА, а при $I_S = 30$ нА – –8 нА. То есть при $I_S = 30$ нА схема разряжает источник питания.

На рис. 4 представлены зависимости тока подзаряда источника питания, токов диодов, нормированных напряжений на конденсаторах и емкости переменного конденсатора от времени, рассчитанные при $I_S = 10$ нА. Из рисунка видно, что в момент времени, когда емкость C_{var} максимальна, напряжение на C_{var} равно напряжению источника питания. При уменьшении емкости C_{var} напряжение на нем увеличивается, и пока оно не достигло значения $V_{store} + V_0$ через диоды течет обратный ток, разряжающий C_{var} по цепи $C_{var} \rightarrow D_1 \rightarrow D_3 \rightarrow D_2$. При $V_{var} > V_{store} + V_0$ диод D_3 открывается, и заряд из C_{var} начинает перетекать в источник питания, создавая ток подзаряда, равный сумме прямого тока диода D_3 и обратного тока диода D_2 , при этом через закрытый диод D_1 заряд из C_{var} также перетекает в C_{store} . После того как напряжение $V_{store} + V_0$ становится равным напряжению на C_{var} , диод D_3 закрывается и C_{var} вновь начинает разряжаться обратными токами диодов по цепи $C_{var} \rightarrow D_1 \rightarrow D_3 \rightarrow D_2$ до тех пор, пока его емкость не начнет увеличиваться и напряжение V_{var} не станет меньше V_{store} . При $V_{store} > V_{var}$ диод D_1 открывается и заряд из C_{store} начинает перетекать в C_{var} , при этом C_{store} также разряжается и обратными токами диодов по цепи $C_{store} \rightarrow D_3 \rightarrow D_2$. Когда напряжение на C_{var} становится меньше V_0 , открывается

диод D_2 и C_{var} начинает заряжаться от источника питания до напряжения V_0 , при этом источник питания также разряжается и обратными токами диодов по цепи $V_0 \rightarrow D_1 \rightarrow D_3$. На этом цикл преобразования завершается. Таким образом, наличие обратных токов диодов приводит к уменьшению суммарного заряда конденсаторов, который восстанавливается в конце цикла преобразования зарядом из источника питания.

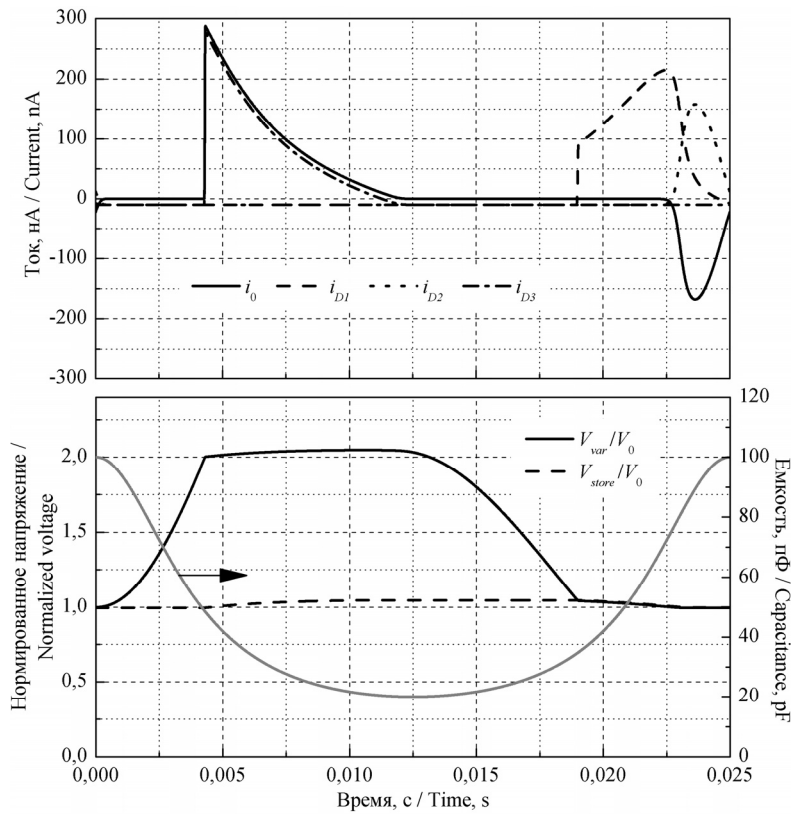


Рис. 4 – Зависимости тока подзаряда источника питания, токов диодов, нормированных напряжений на конденсаторах и емкости переменного конденсатора от времени

Fig. 4 – Dependences of charging current, diodes currents, normalized capacitors voltages and variable capacitor capacitance on the time

На основе проведенного анализа нами было получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда источника питания с учетом обратных токов диодов,

$$\bar{i}_0 = V_0 C_{\text{store}} f \frac{\eta - 2}{\alpha + 1} - I_S \frac{1.5\alpha + 1}{\alpha + 1}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что средний ток подзаряда источника питания будет положительным при условиях:

$$\eta > 2 + \frac{I_S + 1.5\alpha I_S}{C_{\text{store}} V_0 f},$$

$$V_0 > \frac{I_S (1.5\alpha + 1)}{C_{\text{store}} f (\eta - 2)},$$

$$f > \frac{I_S (1.5\alpha + 1)}{C_{\text{store}} V_0 (\eta - 2)},$$

$$I_S < \frac{C_{\text{store}} V_0 f (\eta - 2)}{1.5\alpha + 1}.$$

Оценки показывают, что при расчете зависимостей, показанных на рис. 4, при принятых значениях параметров схемы средний ток в источник питания будет положительным при условии, что глубина модуляции емкости больше 3.3, напряжение источника питания больше 6.3 В, частота изменения емкости больше 17 Гц, а величина обратного тока диодов не превышает 23 нА. В то время как согласно выражению (1) при отсутствии обратных токов диодов напряжение источника питания и частота изменения емкости могут быть сколь угодно малыми, а глубина модуляции емкости должна быть лишь больше 2.

3. Анализ влияния емкостей диодов

Как известно, емкость полупроводникового диода принято разделять на две составляющие: барьерную и диффузионную. Однако диффузионная емкость зашунтирована малым сопротивлением прямосмещенного p - n -перехода и не оказывает существенного влияния на работу схемы. Поэтому в данной работе будем учитывать только барьерную емкость в предположении, что ее величина не зависит от напряжения на диоде.

Проведем моделирование работы схемы с учетом обратных токов и емкостей диодов ($C_1 - C_3$ на рис. 1), считая, что $C_1 = C_2 = C_3 = C_D$. На рис. 5 представлены зависимости тока подзаряда источника питания от времени, рассчитанные при $I_S = 10$ нА и различных значениях C_D (остальные параметры соответствовали принятым в первом разделе). Из рисунка видно, что наличие емкостей диодов приводит к тому, что ток подзаряда становится отличным от нуля практически на протяжении всего цикла преобразования. Оценки показывают, что средний ток подзаряда при $C_D = 0$ пФ составляет 13 нА, при $C_D = 6$ пФ – 10 нА, а при $C_D = 12$ пФ – -1 нА. То есть при $C_D = 12$ пФ схема разряжает источник питания.

На рис. 6 представлены зависимости нормированных напряжений на диодах и тока подзаряда от времени, рассчитанные при $C_D = 6$ пФ. Анализ данных зависимостей показывает, что в момент времени, когда емкость C_{var} максимальна, емкость C_3 заряжена до напряжения V_0 , а емкости C_1 и C_2 разряжены. При уменьшении емкости C_{var} емкость C_3 разряжается, а C_1 и C_2 заряжаются до напряжения V_0 . При этом C_{var} разряжается током, равным сумме токов емкостей $C_1 - C_3$, источник питания заряжается током, равным сумме токов емкостей C_2 и C_3 , а C_{store} заряжается током, равным сумме токов емкостей C_1 и C_3 . При увеличении емкости C_{var} происходит обратный процесс.

На основе проведенного анализа нами было получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда с учетом и емкостей диодов,

$$\bar{i}_0 = V_0 C_{\text{store}} f \frac{\eta - 2}{\alpha + 1} - I_S \frac{1.5\alpha + 1}{\alpha + 1} - V_0 C_D f \frac{3\alpha + 2}{\alpha + 1}. \quad (4)$$

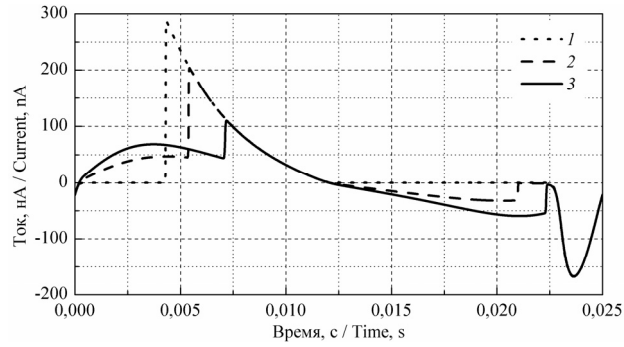


Рис. 5 – Зависимости тока подзаряда источника питания от времени:

1 – $C_D = 0$ пФ, 2 – $C_D = 6$ пФ, 3 – $C_D = 12$ пФ

Fig. 5 – Dependences of charging current on the time:

1 – $C_D = 0$ pF, 2 – $C_D = 6$ pF, 3 – $C_D = 12$ pF

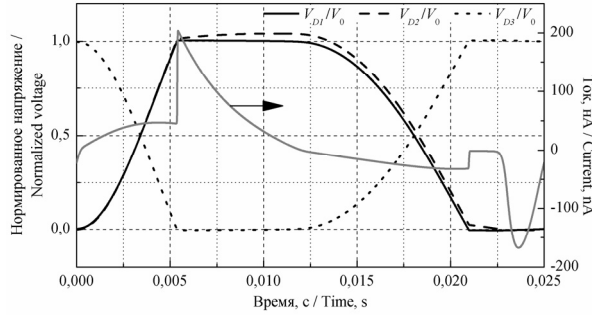


Рис. 6 – Зависимости нормированных напряжений на диодах и тока подзаряда от времени

Fig. 6 – Dependences of diodes voltages and charging current on the time

Анализ выражения (4) показывает, что средний ток подзаряда источника питания будет положительным при условиях:

$$C_D < \frac{2C_{\text{store}}V_0\eta f - 4C_{\text{store}}V_0f - 3I_S\alpha - 2I_S}{V_0f(6\alpha + 4)},$$

$$\eta > 2 + \frac{6C_DV_0\alpha f + 4C_DV_0f + 3I_S\alpha + 2I_S}{2C_{\text{store}}V_0f},$$

$$V_0 > \frac{-I_S(2C_D + 3C_D\alpha)}{2C_Df(2C_D + 2C_{\text{store}} + 3C_D\alpha - C_{\text{store}}\eta)},$$

$$f > \frac{-I_S(2C_D + 3C_D\alpha)}{2C_DV_0(2C_D + 2C_{\text{store}} + 3C_D\alpha - C_{\text{store}}\eta)},$$

$$I_S < \frac{V_0f(2C_{\text{store}}\eta - 6C_D\alpha - 4C_D - 4C_{\text{store}})}{3\alpha + 2}.$$

Оценки показывают, что при расчете зависимостей, показанных на рис. 6, при принятых значениях параметров схемы средний ток в источник питания будет положительным при условии, что глубина модуляции емкости больше 4.2, напряжение источника питания больше 9.1 В, частота изменения емкости больше 25 Гц, а величина обратного тока диодов не превышает 16 нА.

4. Анализ влияния напряжения пробоя диодов

Анализ выражений (1), (3) и (4) показывает, что средний ток подзаряда источника питания может быть увеличен путем увеличения напряжения источника питания, что и было использовано в работах [8, 9]. Однако еще одним из свойств реальных диодов является пробой, характеризующийся напряжением пробоя, при котором обратный ток диодов резко возрастает.

Проведем моделирование работы схемы с учетом обратных токов, емкостей и напряжения пробоя диодов, добавив к правой части выражения (1) слагаемое

$$I_B \exp\left(-\frac{V_D + V_B}{nV_T}\right),$$

где $I_B = 1$ мкА – начальный ток пробоя; V_B – обратное напряжение пробоя; n – коэффициент неидеальности на участке пробоя.

На рис. 7 представлены зависимости тока подзаряда при $V_B = 20$ В и различных значениях напряжения источника питания (остальные параметры соответствовали принятым в первом разделе). Анализ данных зависимостей показывает, что среднее значение тока подзаряда при $V_0 = 15$ В составляет 10 нА, при $V_0 = 20$ В – –12 нА, а при $V_0 = 25$ В – –61 нА. То есть при напряжениях источника питания, близких к напряжению пробоя, схема разряжает источник питания.

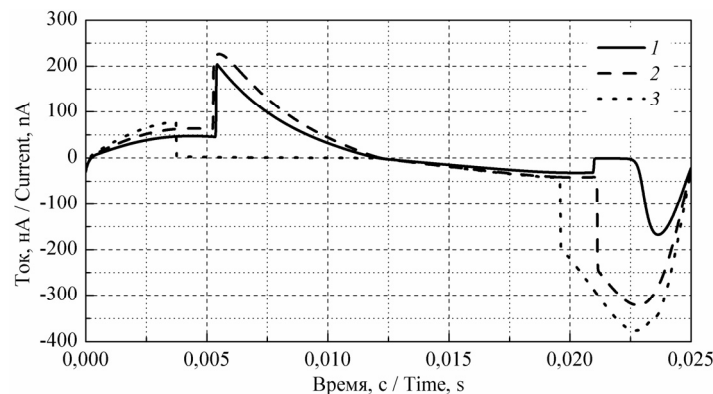


Рис. 7 – Зависимости тока подзаряда источника питания от времени:

1 – $V_0 = 15$ В, 2 – $V_0 = 20$ В, 3 – $V_0 = 25$ В

Fig. 7 – Dependences of charging current on the time

1 – $V_0 = 15$ В, 2 – $V_0 = 20$ В, 3 – $V_0 = 25$ В

Таким образом, для того чтобы средний ток подзаряда источника питания был положительным, необходимо, чтобы напряжение источника питания было меньше напряжения пробоя диодов. Необходимо также отметить, что напряжение пробоя диодов может ограничивать и напряжение, до которого возрастет напряжение на накопительном конденсаторе в случае его использования вместо источника питания [7].

Заключение

В данной статье проведено математическое моделирование работы схемы электростатического микроэлектромеханического генератора на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором с учетом основных параметров реальных диодов. Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить средний ток подзаряда источника питания с учетом обратных токов и емкостей диодов. Показано, что обратные токи и емкости диодов могут приводить к появлению фазы разряда источника. Определены условия, при которых средний ток подзаряда источника питания будет положительным. Показано, что напряжение пробоя диодов ограничивает возможность увеличения тока подзаряда путем увеличения напряжения на элементах схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Roundy S.J.** Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion: a dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering-mechanical engineering in the graduate division. – Berkeley: University of California, 2003. – 287 p.
2. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester / P. Basset, D. Galayko, A.M. Paracha, F. Marty, A. Dudka, T. Bourouina // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2009. – Vol. 19, N 11. – P. 115025/1–115025/12. – doi: 10.1088/0960-1317/19/11/115025.
3. **Chiu Y., Tseng V.F.G.** A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2008. – Vol. 18, N 10. – P. 104004/1–104004/8. – doi: 10.1088/0960-1317/18/10/104004.
4. Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact / P. Basset, D. Galayko, F. Cottone, R. Guillemet, E. Blokhina, F. Marty, T. Bourouina // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2014. – Vol. 24, N 3. – P. 035001/1–035001/14. – doi: 10.1088/0960-1317/24/3/035001.
5. **Драгунов В.П., Остергак Д.И.** Микроэлектромеханические преобразователи // *Микроэлектроника*. – 2012. – Т. 41, № 2. – С. 120–135.
6. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** МЭМ рекуператоры без разрыва цепи, содержащей индуктивный элемент // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2011. – № 2 (17). – С. 92–101.
7. **Queiroz A.C.M. de.** Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler // *Proceedings of 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS 2010)*, 1–4 August, 2010, Seattle, Washington, USA. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 2010. – P. 404–407. – doi: 0.1109/MWSCAS.2010.5548752.
8. **Queiroz A.C.M. de, Domingues M.** The doubler of electricity used as battery charger // *IEEE Transactions on Circuits and Systems: pt. 2: Express Briefs*. – 2011. – Vol. 58, iss. 12. – P. 797–801. – doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963.
9. **Dragunov V., Dorzhiev V.** Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2013. – Vol. 476, iss. 1. – P. 012115/1–012115/5. – doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115.
10. **Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.** Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета // *Нано- и микросистемная техника*. – 2012. – № 11. – С. 39–42.
11. Микроэлектромеханический преобразователь на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором / В.П. Драгунов, Д.Ю. Галайко, В.Ю. Доржиев, Ф. Бассэ // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2014. – № 2–3 (23–24). – С. 67–80.
12. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, F. Marty, V. Dragunov, D. Galayko // *IEEE Electron Device Letters*. – 2015. – Vol. 36, iss. 2. – P. 183–185. – doi: 10.1109/LED.2014.2387213.
13. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements / V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, V. Dragunov, D. Galayko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 557, iss. 1. – P. 012126/1–012126/5. – doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.

14. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Анализ влияния pull-in эффекта на параметры трехэлектродных МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2013. – № 2 (21). – С. 87–97.

INFLUENCE OF DIODES PARAMETERS ON THE OPERATION OF e-VEH CIRCUIT BASED ON BENNET'S DOUBLER

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In this paper the simulation of MEMS electrostatic vibration energy harvester (e-VEH) conditioning circuit based on Bennet's doubler with single variable capacitor was carried out. This conditioning circuit allows for converting of mechanical vibrations energy into electrical energy to carry out the recharging chemical power source. The main advantage of this scheme is that unlike most circuits for recharging the power source, it does not contain hardly compatible with batch-fabrication process inductive element and the switch, requiring additional timing circuit that consumes energy. The simulation of the circuit using a model of an ideal diode, which showed that in the steady state charging current does not accept negative values – there is no phase of the source discharging. Introduction to diode model of reverse currents led to the source discharge phase, which is caused by compensation of capacitors charge leakage through locked diodes. The simulation of the circuit with taking into account of diodes capacitance based on the assumption that they do not depend on the voltage applied to the diode is carried out. An analytical expression, allowing to estimate the average charging current with taking into account of diodes reverse currents and capacitors, and to determine the conditions under which the current is positive was obtained. It is shown that the diodes breakdown voltage limits the charging current increasing by increasing the voltage on the circuit elements.

Keywords: energy harvesting, MEMS, microgenerator, Bennet's doubler, diode capacitance, reverse current.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-2-57-68

REFERENCES

1. Roundy S. *Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion*: a dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering-mechanical engineering in the graduate division. Berkeley, University of California, 2003. 287 p.
2. Basset P., Galayko D., Paracha A.M., Marty F., Dudka A., Bourouina T. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, vol. 19, no. 11, pp. 115025/1–115025/12. doi: 10.1088/0960-1317/19/11/115025
3. Chiu Y., Tseng V.F.G. A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, vol. 18, no. 10, pp. 104004/1–104004/8. doi: 10.1088/0960-1317/18/10/104004
4. Basset P., Galayko D., Cottone F., Guillemet R., Blokhina E., Marty F., Bourouina T. Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 035001/–035001/14. doi: 10.1088/0960-1317/24/3/035001
5. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Микроэлектромеханические преобразователи [Microelectromechanical converters]. *Микроэлектроника – Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 120–135. (In Russian)
6. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. MEM рекуператоры без разрыва цепи, содержащей индуктивный элемент [MEM recuperators without break of a circuit with inductor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2011, no. 2 (17), pp. 92–101.
7. Queiroz A.C.M. de. Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler. *Proceedings of 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS 2010)*, Seattle, Washington, USA, 1–4 August, 2010, pp. 404–407. doi: 0.1109/MWSCAS.2010.5548752

8. Queiroz A.C.M. de, Domingues M. The doubler of electricity used as battery charger. *IEEE Transactions on Circuits and Systems. Pt. 2: Express Briefs*, 2011, vol. 58, iss. 12, pp. 797–801. doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963
9. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 476, iss. 1, pp. 012115/1–012115/5. doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115
10. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Mikroelektromekhanicheskii generator na osnove duplikatora Benneta [Microelectromechanical generator based on Bennet's doubler]. *Nano- i mikro-sistemnaya tekhnika – Nano and Microsystem Technique*, 2012, no. 11, pp. 39–42.
11. Dragunov V.P., Galaiko D.Yu., Dorzhiev V.Yu., Basse F. Mikroelektromekhanicheskii preobrazovatel' na osnove duplikatora Benneta s odnim peremennym kondensatorom [Microelectromechanical harvester based on Bennet's doubler with one variable capacitor]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 2–3 (23–24), pp. 67–80.
12. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Marty F., Dragunov V., Galayko D. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the Bennet's doubler as conditioning circuit. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, vol. 36, iss. 2, pp. 183–185. doi: 10.1109/LED.2014.2387213
13. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 557, iss. 1, pp. 012126/1–012126/5. doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126
14. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Analiz vliyaniya pull-in effekta na parametry trekh-elektroodnykh MEMS [Analysis of pull-in effect influence on three-electrode MEMS parameters]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2 (21), pp. 87–97.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Драгунов Валерий Павлович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 130 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: drag@adm.nstu.ru).

Dragunov Valery Pavlovich (b. 1947) – Doctor of Science, Professor, department of semiconductor devices and microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, physics of low-dimensional structures, nano- and microsystem technology. He is author of more than 130 scientific papers. (Address: 20, Prospekt Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: drag@adm.nstu.ru).



Доржиев Виталий Юрьевич – родился в 1988 году, аспирант кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Email: dorzhiev@corp.nstu.ru).

Dorzhiev Vitaly Yuryevich (b. 1988) – PhD student, department of semiconductor devices and microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. He is author of more than 15 scientific papers. (Address: 20, Prospekt Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: dorzhiev@corp.nstu.ru).

Статья поступила 02 июня 2015 г.
Received June 02, 2015

To Reference:

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Vliyanie parametrov diodov na rabotu skhemy EMG na osnove duplikatora Benneta [Influence of diodes parameters on the operation of e-VEH circuit based on Bennet's doubler]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 2 (27), pp. 57–68. doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-57-68