

УДК 621.3.049.77.002.5

**МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ
МОДИФИЦИРОВАННОЙ СХЕМЫ ДУПЛИКАТОРА БЕННЕТА****В.П. Драгунов, Р.Е. Сеницкий, Д.И. Остертак***Новосибирский государственный технический университет*

Ввиду активного развития беспроводных сенсорных сетей, имеющих широкое применение, возникает проблема организации их электропитания. Использование традиционных батарей и аккумуляторов требует периодического обслуживания, что не всегда осуществимо. Поэтому разрабатываются и исследуются новые виды автономных источников питания, преобразующих энергию окружающей среды в электрическую энергию. Вследствие доступности и сравнительно высокой удельной мощности окружающих механических колебаний, а также совместимости с интегральной технологией наиболее перспективными представляются электростатические микроэлектромеханические преобразователи (МЭМП) механической энергии в электрическую. Для использования преобразованной электрической энергии необходима схема сопряжения (включения) преобразователя с потребляющим устройством. Одной из наиболее перспективных схем сопряжения (включения) электростатических МЭМП является схема дубликатора Беннета, двумя основными недостатками которой являются неконтролируемый рост напряжения, приводящий к пробое элементов схемы, и возможность функционирования только с переменными конденсаторами, имеющими глубину модуляции емкости больше 2 (для одноконденсаторного преобразователя). В данной работе предлагается и исследуется новая модификация схемы дубликатора Беннета, лишенная указанных недостатков. Разработаны математические модели, позволяющие оценить основные параметры данной схемы: эффективные напряжения и заряды на элементах схемы и средние токи подзаряда первичных источников питания для различных режимов работы схемы. Установлено, что в зависимости от глубины модуляции емкости η переменного конденсатора работа схемы возможна в двух режимах: при $\eta < 2$ – наблюдается насыщение напряжения и заряда на накопительном конденсаторе (автостабилизация), а при $\eta \geq 2$ – наблюдается монотонный рост напряжения и заряда на накопительном конденсаторе. Показано, что введение в схему второго переменного конденсатора позволяет уменьшить значение η , при котором наблюдается смена режимов работы, с $\eta = 2$ до $\eta = 1,618$.

Ключевые слова: МЭМП, микрогенератор, механические колебания, переменный конденсатор, дубликатор Беннета, автостабилизация.

DOI 10.17212/1727-2769-2017-3-39-51

Введение

Современные достижения в энергосберегающей электронике, радиотехнике и микросистемной технике привели к интенсивному развитию беспроводных сенсорных сетей (БСС), представляющих собой совокупность автономных сенсоров, например, газоанализаторов, микрофонов, датчиков вибрации и т.п., объединенных посредством радиоканала в беспроводную сеть. БСС могут быть использованы, например, для мониторинга окружающей среды, промышленных объектов, для контроля за состоянием пациентов в медицинских учреждениях. Области

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, шифр проекта 8.6847.2017/БЧ, тема проекта: «Разработка теоретических основ построения измерительного оборудования для телекоммуникационных систем, содержащего мощные СВЧ аттенуаторы, полосовые фильтры с заданными частотами режекции и микрополосковые печатные антенны».

применения БСС непрерывно расширяются, а сами устройства и сети на их основе совершенствуются и усложняются [1].

В настоящее время наиболее часто используемыми источниками питания для элементов БСС являются традиционные батареи и аккумуляторы, требующие периодической замены или заряда, что не всегда возможно. Для решения данной проблемы активно исследуются пути увеличения энергоемкости традиционных источников [2], а также разрабатываются и исследуются новые виды автономных источников питания, преобразующих энергию окружающей среды в электрическую энергию непосредственно на месте размещения узла БСС [3, 4].

Наиболее распространенные источники энергии в окружающей среде – это солнечный свет, градиенты температур, потоки жидкостей и газов, электромагнитные волны, механические колебания и вибрации. Вследствие доступности и сравнительно высокой удельной мощности весьма перспективным является использование энергии механических колебаний и вибраций [5].

Преобразование механической энергии в электрическую может быть осуществлено с помощью пьезоэлектрических, электромагнитных и электростатических преобразователей. Вследствие совместимости с интегральной технологией наиболее перспективными представляются электростатические МЭМП [6].

Преобразование энергии электростатическими преобразователями осуществляется за счет совершения работы внешней механической силой против силы притяжения электродов заряженного переменного конденсатора. Чтобы передать полученную электрическую энергию в нагрузку, электростатический МЭМП (электромеханический конденсатор переменной емкости) включают в состав соответствующих электрических схем (схем сопряжения) [7–10]. Такая система в целом представляет собой своеобразный микрогенератор (МГ) [6].

Выбор электрической схемы на этапе проектирования МГ является важнейшей задачей. От этого зависят номинальная вырабатываемая мощность МГ, время накопления необходимого заряда, а также эффективность преобразования энергии.

Одной из наиболее перспективных схем сопряжения для электростатических МГ на данный момент является схема дубликатора Беннета [11–20]. Отличительным достоинством данной схемы является то, что в каждом цикле преобразования заряд, возвращаемый в накопительный конденсатор или первичный источник питания, превосходит заряд, взятый из него, т. е. эта схема относится к схемам с увеличением заряда.

Двумя основными недостатками базовой схемы дубликатора Беннета являются неконтролируемый рост напряжения, приводящий к пробоем элементов схемы, и возможность функционирования только с переменными конденсаторами, имеющими глубину модуляции емкости больше 2 (для одноконденсаторного преобразователя). В связи с этим возникает необходимость усовершенствования базовой схемы.

Ряд работ был посвящен способам контроля роста напряжения [13, 19]. Однако данные методы не позволяют регулировать напряжение или приводят к появлению дополнительных схем управления переключателем, потребляющих энергию. В работах [15, 20] был описан эффект автостабилизации из-за проявления эффекта электростатического размягчения. Однако в этом случае схема может эффективно функционировать только в окрестности механического резонанса МЭМП. Возможность работы схемы при глубине модуляции емкости меньше 2 исследовалась в [16], однако предложенное использование дополнительных схем удвоения напряжения приводит к существенному увеличению роли обратных токов диодов и уменьшению эффективности МГ.

В [18] была предложена модификация схемы на основе дубликатора Беннета с электретным преобразователем, где первичный источник напряжения находился в цепи переменного конденсатора. В работе была показана возможность работы такого генератора при пониженных напряжениях первичного источника. Данная схема, однако, имеет, по меньшей мере, два существенных недостатка: подключе-

ние нагрузки к накопительному конденсатору, что приводит к необходимости применения схемы согласования уровней напряжения на накопительном конденсаторе и напряжения, необходимого для работы нагрузки, а также невозможность работы нагрузки в отсутствие механических колебаний.

В данной работе предлагается новая модификация схемы дубликатора Беннета [18], лишенная вышеуказанных недостатков за счет использования дополнительного источника питания.

1. Анализ работы схемы МГ

Модифицированная электрическая схема МГ энергии на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором, источником питания в цепи переменного конденсатора и дополнительным источником питания в цепи накопительного конденсатора представлена на рис. 1. Она содержит переменный конденсатор C_{var} – МЭМП, емкость которого под действием механических сил изменяется от минимальной C_{min} до максимальной C_{max} , два постоянных конденсатора C_1 и C_2 , первичные источники питания V_0 и V_1 , а также три ключа $Sw_{1,2,3}$. Сопротивление нагрузки R может быть подключено параллельно источнику питания V_0 или V_1 , в данной работе его не будем учитывать.

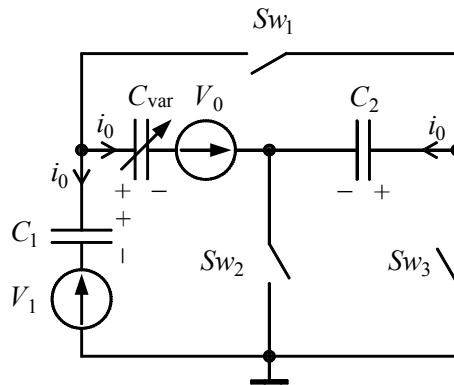


Рис. 1 – Электрическая схема МГ
Fig. 1 – Microgenerator electrical circuit

Полный цикл преобразования энергии данной схемы представляют две чередующиеся фазы: заряда и разряда переменного конденсатора C_{var} . Будем обозначать фазу разряда переменного конденсатора индексом (n) , а фазы заряда – индексами $(n-1)$ и $(n+1)$. Упрощенные электрические схемы в конце фаз разряда и заряда представлены на рис. 2, *a* и *б* соответственно. Для оценки тока, передаваемого в нагрузку, и напряжений на конденсаторах проведем анализ работы схемы в каждой фазе.

В фазе $(n-1)$ заряда конденсатора C_{var} , когда его емкость максимальна и равна C_{max} , ключи Sw_1 и Sw_2 замыкаются (рис. 1), и по цепям $V_0 \rightarrow C_2 \rightarrow Sw_1 \rightarrow C_{var}$ и $V_0 \rightarrow Sw_2 \rightarrow V_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_{var}$ протекают токи, заряжающие C_{var} и разряжающие C_1 и C_2 (рис. 2, *a*).

Напряжение на переменном конденсаторе C_{var} в конце фазы заряда достигнет некоторого минимального значения V_{min} :

$$V_{\min} = V_0 + V_1 + V_{C_1}^{(n-1)} = V_0 + V_{C_2}^{(n-1)}, \quad (1)$$

где $V_{C_i}^{(n-1)}$ – напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 в конце фазы заряда C_{var} .

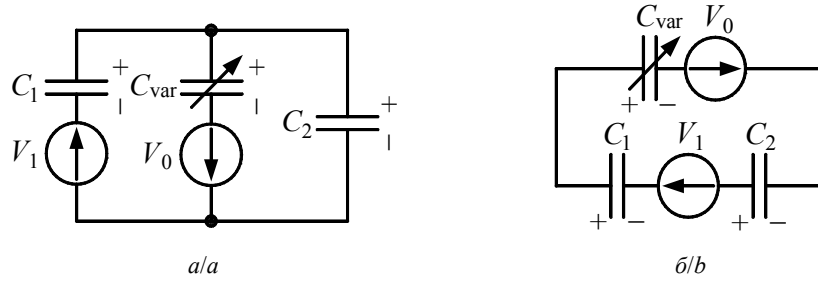


Рис. 2 – Упрощенная электрическая схема МГ:

a – фаза заряда C_{var} ; b – фаза разряда C_{var}

Fig. 2 – Simplified electrical circuit of the microgenerator:

a – charge stage of C_{var} ; b – discharge stage of C_{var}

В фазе (n) разряда конденсатора C_{var} , когда его емкость минимальна C_{\min} , ключи Sw_1 и Sw_2 размыкаются, ключ Sw_3 замыкается, и по цепи $C_{\text{var}} \rightarrow C_1 \rightarrow V_1 \rightarrow Sw_3 \rightarrow C_2 \rightarrow V_0$ протекает ток, разряжающий C_{var} и заряжающий C_1 и C_2 (рис. 2, б).

Напряжение на переменном конденсаторе C_{var} в конце фазы разряда достигнет некоторого максимального значения V_{\max} :

$$V_{\max} = V_0 + V_1 + V_{C_1}^{(n)} + V_{C_2}^{(n)}, \quad (2)$$

где $V_{C_i}^{(n)}$ – напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 в конце фазы разряда C_{var} .

Для определения величины тока, заряжающего V_0 и V_1 , составим уравнение, описывающее изменение напряжений на элементах схемы для фазы разряда C_{var} . Согласно рис. 2, б:

$$V_{C_{\text{var}}}^{(n)} = V_{C_{\text{var}}}^{(n-1)} - \Delta V_{C_{\text{var}}}^{(n)} = V_{C_1}^{(n-1)} + \Delta V_{C_1}^{(n)} + V_1 + V_{C_2}^{(n-1)} + \Delta V_{C_2}^{(n)} + V_0, \quad (3)$$

где $V_{C_i}^{(j)}$ – напряжения на конденсаторах C_1 , C_2 и C_{var} , а $\Delta V_{C_i}^{(j)}$ – изменения напряжений на конденсаторах схемы в конце фаз заряда и разряда C_{var} .

Анализ (3) позволяет оценить величину изменения заряда $\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)}$ на переменном конденсаторе C_{var} в конце фазы его разряда:

$$\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)} = \frac{\frac{q_{C_{\text{var}}}^{(n-1)}}{C_{\min}} - \frac{q_{C_1}^{(n-1)}}{C_1} - \frac{q_{C_2}^{(n-1)}}{C_2} - V_0 - V_1}{C_{\min}^{-1} + C_1^{-1} + C_2^{-1}}, \quad (4)$$

где $q_{C_i}^{(j)}$ – величины зарядов на конденсаторах схемы в конце фаз заряда C_{var} .

Отметим, что в конце фазы разряда C_{var} изменения зарядов на конденсаторах C_{var} , C_1 и C_2 будут равны между собой: $\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)} = \Delta q_{C_1}^{(n)} = \Delta q_{C_2}^{(n)} = \Delta q^{(n)}$.

Система уравнений, описывающая изменения напряжений на элементах схемы для фазы заряда C_{var} согласно рис. 2, а,

$$\begin{cases} V_{C_{\text{var}}}^{(n+1)} = V_{C_{\text{var}}}^{(n)} + \Delta V_{C_{\text{var}}}^{(n+1)} = V_{C_1}^{(n)} - \Delta V_{C_1}^{(n+1)} + V_1 + V_0, \\ V_{C_{\text{var}}}^{(n+1)} = V_{C_{\text{var}}}^{(n)} + \Delta V_{C_{\text{var}}}^{(n+1)} = V_{C_2}^{(n)} - \Delta V_{C_2}^{(n+1)} + V_0. \end{cases} \quad (5)$$

Решение системы уравнений (5) позволяет получить выражения для оценки величины изменения заряда на накопительных конденсаторах C_1 (6) и C_2 (7).

$$\Delta q_{C_1}^{(n+1)} = \frac{\left(V_0 + V_1 + \frac{q_{C_1}^{(n)}}{C_1} - \frac{q_{C_{\text{var}}}^{(n)}}{C_{\text{max}}} \right) C_{\text{max}} - \left(\frac{q_{C_2}^{(n)}}{C_2} - V_1 - \frac{q_{C_1}^{(n)}}{C_1} \right) C_2}{C_{\text{max}} + C_1 + C_2} C_1, \quad (6)$$

$$\Delta q_{C_2}^{(n+1)} = \left(\frac{q_{C_2}^{(n)}}{C_2} - V_1 - \frac{q_{C_1}^{(n)}}{C_1} + \frac{\Delta q_{C_1}^{(n+1)}}{C_1} \right) C_2. \quad (7)$$

Одним из важных параметров МГ является ток подзаряда первичных источников питания. Используя (4), (6) и (7), получим выражения для оценки среднего тока, протекающего через V_1 и V_0 за период модуляции емкости C_{var} :

$$\overline{i_{V_1}} = \left(\Delta q^{(n)} - \Delta q_{C_1}^{(n+1)} \right) f, \quad (8)$$

$$\overline{i_{V_0}} = \left(\Delta q^{(n)} - \Delta q_{C_1}^{(n+1)} - \Delta q_{C_2}^{(n+1)} \right) f, \quad (9)$$

где f – частота модуляции емкости C_{var} .

Полученные выражения (4), (6)–(9) позволяют связать токи, протекающие через первичные источники питания V_1 и V_0 с параметрами элементов схемы ($C_1, C_2, C_{\text{min}}, V_1$ и V_0).

Анализ (4) с учетом (1) и (2) показывает, что изменение заряда на C_{var} в фазе его разряда в данной схеме будет определяться выражением

$$\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)} = \frac{V_{\text{min}}^{(n-1)}(\eta - 2) + V_0}{C_{\text{min}}^{-1} + C_1^{-1} + C_2^{-1}}, \quad (10)$$

где $\eta = C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$.

Из (10) следует, что на начальном этапе работа механической силы всегда вызывает увеличение напряжения и заряда конденсаторов, однако процесс роста напряжения и заряда конденсаторов возможен в двух различных режимах – при глубине модуляции емкости $\eta < 2$ и $\eta \geq 2$.

В первом режиме, при $\eta < 2$, действие механической силы хоть и вызывает увеличение заряда и напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 , но приращение заряда

переменного конденсатора $\Delta q_{C_{\text{var}}}$ в каждом последующем цикле преобразования постепенно уменьшается, что в конечном счете прекращает увеличение заряда и напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 – происходит автостабилизация напряжения (насыщение).

Во втором режиме, при $\eta \geq 2$, действие механической силы также вызывает увеличение заряда и напряжения на конденсаторах C_{var} , C_1 и C_2 . Однако изменение заряда переменного конденсатора $\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n+1)}$ в фазе заряда C_{var} всегда будет преобладать над изменением заряда $\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)}$ в фазе разряда C_{var} , что приводит к монотонному увеличению заряда на конденсаторах, и, следовательно, росту напряжения на них в каждом последующем цикле преобразования – реализуется режим неограниченного роста напряжения и заряда на конденсаторах.

Достоинство данной схемы, в отличие от базовой схемы дубликатора Беннета, заключается в том, что при действии механической силы небольшой величины, вызывающей модуляцию емкости C_{var} менее 2, работа преобразователя энергии продолжается, и осуществляется протекание тока, заряжающего C_1 и V_1 , соответственно дополнительная электрическая энергия может передаваться в нагрузку.

В случае сильного внешнего воздействия, вызывающего модуляцию емкости C_{var} больше 2, характер изменения напряжения и заряда на конденсаторах не отличается от базовой схемы дубликатора Беннета и требует средств ограничения процесса. Для ограничения роста напряжения на конденсаторах можно использовать параллельное включение стабилитрона и конденсатора C_1 или C_2 , а также параллельное включение постоянного конденсатора и переменного конденсатора C_{var} . Во втором случае уменьшается эффективная глубина модуляции, в результате преобразователь переходит в режим автостабилизации.

2. Результаты расчетов

Зависимости напряжения на C_1 , а также заряда и напряжения на C_{var} от времени в различных режимах работы МГ, рассчитанные с использованием математических моделей (3) и (5) с учетом (4), (6) и (7), изображены на рис. 3, 4 и 5. В расчетах принимали $C_{\text{min}} = 25$ пФ, $C_1 = 1$ нФ, $C_2 = 1$ нФ, $V_0 = 5$ В и $f = 40$ Гц.

Напряжение на конденсаторе C_1 в режиме автостабилизации может быть оценено с помощью выражения

$$V_{\text{stab},C_1} = V_{\text{min}}(\eta - 1) - V_1, \quad (11)$$

где $V_{\text{min}} = V_0 / (2 - \eta)$ – минимальное напряжение на C_{var} в режиме стабилизации напряжения на постоянных конденсаторах.

Напряжение на конденсаторе C_2 в режиме автостабилизации определяется как $V_{\text{stab},C_2} = V_{\text{min}}(\eta - 1)$.

Анализ показывает, что скорость нарастания напряжения и заряда на конденсаторах тем больше, чем больше η и V_0 .

В данной схеме преобразователя энергии вместо постоянного конденсатора C_2 можно использовать второй переменный конденсатор, аналогичный C_{var} , но работающий с ним в противофазе.

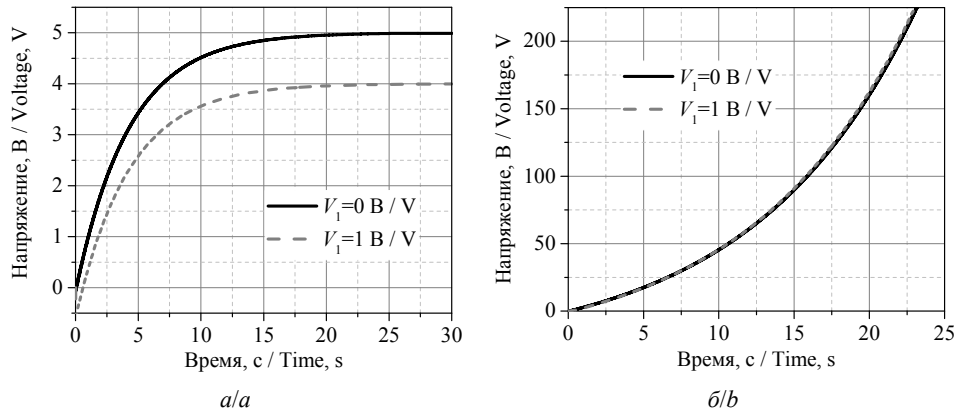


Рис. 3 – Зависимости напряжения на конденсаторе C_1 от времени:
 $a - \eta = 1,5$; $b - \eta = 2,2$
 Fig. 3 – Time dependences of the capacitor C_1 voltage:
 $a - \eta = 1,5$; $b - \eta = 2,2$

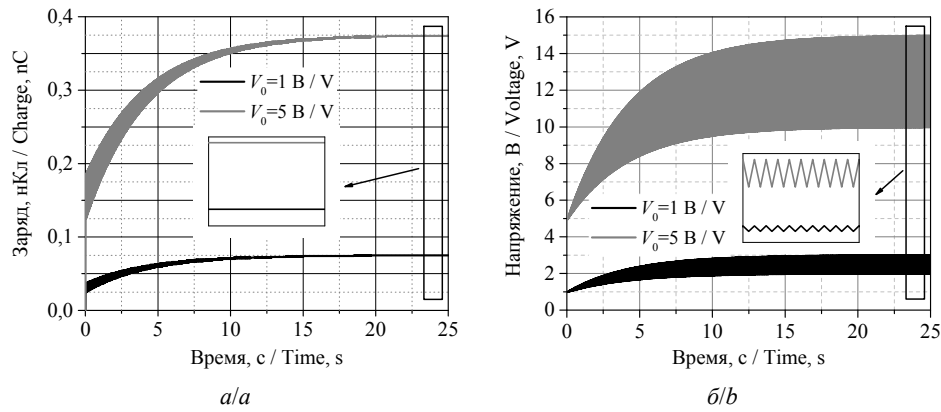


Рис. 4 – Зависимости заряда (a) и напряжения (б) на конденсаторе C_{var} от времени при $\eta = 1,5$
 Fig. 4 – Time dependences of the capacitor C_{var} charge (a) and voltage (b) at $\eta = 1,5$

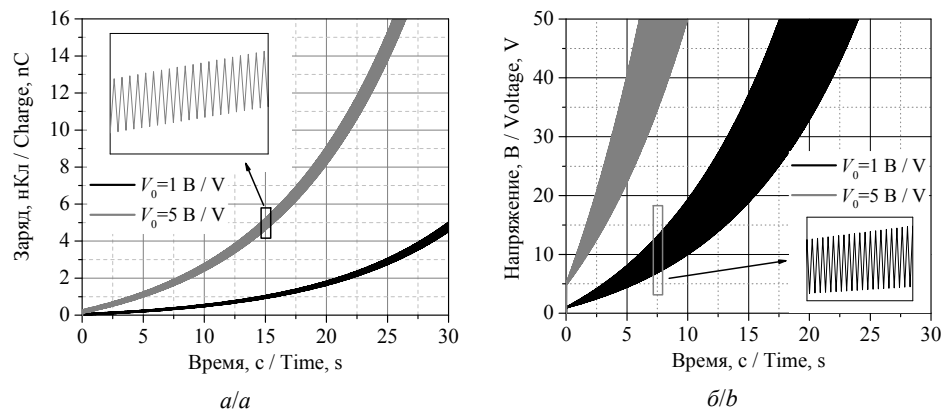


Рис. 5 – Зависимости заряда (a) и напряжения (б) на конденсаторе C_{var} от времени при $\eta = 2,2$
 Fig. 5 – Time dependences of the capacitor C_{var} charge (a) and voltage (b) at $\eta = 2,2$

Изменение заряда на переменном конденсаторе C_{var} в фазе его разряда, при условии совпадения глубин модуляции емкостей переменных конденсаторов, в этом случае будет определяться выражением

$$\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)} = \frac{V_{\min}^{(n-1)}(\eta - 1 - 1/\eta) + V_0/\eta}{C_{\min}^{-1} + C_{\max}^{-1} + C_1^{-1}}. \quad (12)$$

Анализ (12) показывает, что смена режимов теперь будет происходить уже при $\eta \geq 1,618$, а не при $\eta \geq 2$. Соответственно напряжение на переменном конденсаторе C_{var} , при $\eta < 1,618$, будет периодически изменяться от

$$V_{\min} = \frac{V_0}{1 + \eta - \eta^2} \quad (13)$$

до $V_{\max} = \eta V_{\min}$, в соответствии с модуляцией емкости C_{var} от C_{\max} до C_{\min} .

Достоинство такой двухконденсаторной схемы перед одноконденсаторной заключается в том, что смена режимов будет происходить при меньшей величине действующей механической силы.

Использование двухконденсаторной схемы, однако, связано с трудностями изготовления соответствующей трехэлектродной конструкции и особенностями электромеханических взаимодействий в ней [21–24]. В случае же использования двух отдельных конденсаторов проблемы связаны с разбросом характеристик готовых МЭМП, а также с необходимостью синхронизации фаз между ними.

На рис. 6 представлены зависимости среднего тока за период модуляции емкости C_{var} , протекающего через источники питания V_1 и V_0 , рассчитанные с использованием (8) и (9) при $\eta = 1,5$ и $\eta = 2,2$. В расчетах принимали $C_{\min} = 25$ пФ, $C_1 = 1$ нФ, $C_2 = 1$ нФ, $f = 40$ Гц, $V_0 = 5$ В, $V_1 = 1$ В.

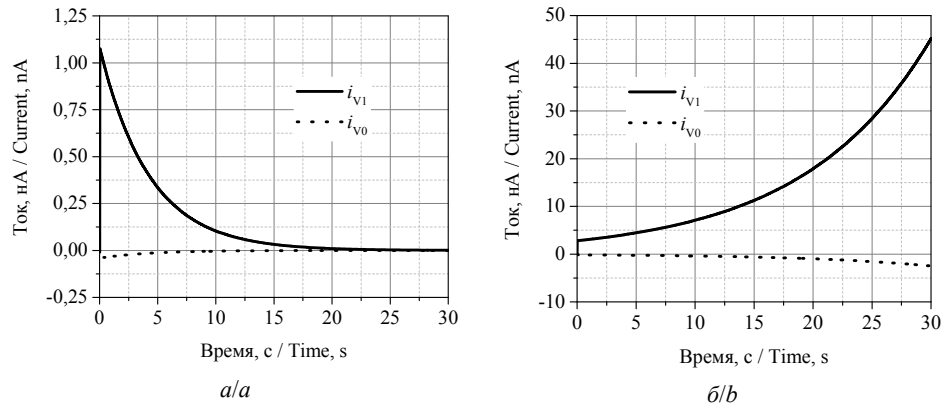


Рис. 6 – Зависимости среднего тока через V_1 и V_0 от времени:

$a - \eta = 1,5$; $б - \eta = 2,2$

Fig. 6 – Time dependences of the average current through V_1 and V_0 :

$a - \eta = 1,5$; $b - \eta = 2,2$

Из рис 6, a и $б$ видно, что средний ток через V_0 за период модуляции емкости будет отрицательным как при $\eta < 2$, так и при $\eta \geq 2$. Это говорит о том, что

источник V_0 всегда разряжается. Однако при $\eta < 2$ процесс разряда V_0 прекращается, а при $\eta \geq 2$ интенсивность разряда увеличивается. Таким образом, в данной схеме необходимо использование V_0 как можно большей емкости. Использование же V_0 в качестве источника питания для нагрузки нецелесообразно.

В свою очередь, ток заряда I_1 преобладает над током разряда в обоих режимах работы преобразователя. Средний ток через I_1 за период модуляции емкости положителен. При $\eta < 2$ средний ток через I_1 уменьшается со временем, и в конце концов процесс заряда I_1 прекращается, а при $\eta \geq 2$ – монотонно и неограниченно увеличивается. Таким образом, в данной схеме в качестве I_1 можно использовать источник питания небольшой емкости.

Заключение

В данной работе предложена модифицированная схема микрогенератора на основе дубликатора Беннета с увеличенным током подзаряда дополнительного первичного источника питания, не требующая согласования уровней напряжения на накопительном конденсаторе и напряжения, необходимого для работы нагрузки, а также сохраняющая питание нагрузки в отсутствие механических колебаний.

Разработаны математические модели, позволяющие оценить основные параметры данной схемы: эффективные напряжения и заряды на элементах схемы и средние токи подзаряда первичных источников питания для различных режимов работы схемы.

Установлено, что в зависимости от глубины модуляции емкости η переменного конденсатора работа схемы возможна в двух различных режимах. При $\eta < 2$ наблюдается насыщение напряжения и заряда на накопительном конденсаторе (автостабилизация), а при $\eta \geq 2$ наблюдается монотонный рост напряжения и заряда на накопительном конденсаторе.

Показано, что введение в схему второго переменного конденсатора позволяет уменьшить значение η , при котором наблюдается смена режимов работы с $\eta = 2$ до $\eta = 1,618$.

Необходимо отметить, что исследуемая схема в двух рассмотренных режимах может применяться и для электретных микрогенераторов, и для микрогенераторов, использующих электроды из материалов с разными работами выхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Khan S., Pathan A.-S.K., Alrajeh N.A.** Wireless sensor networks: current status and future trends. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 546 p.
2. **Oudenhoven J.F.M., Vullers R.J.M., Schaijk R.** A review of the present situation and future developments of micro-batteries for wireless autonomous sensor systems // International Journal of Energy Research. – 2012. – Vol. 36, N 12. – P. 1139–1150. – doi: 10.1002/er.2949.
3. Micro and nano energy harvesting technologies / B. Yang, H. Liu, J. Liu, C. Lee. – Boston: Artech House, 2014. – 291 p.
4. Micropower energy harvesting / R.J.M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, R. Mertens // Solid-State Electron. – 2009. – N 53. – P. 684–693. – doi: 10.1016/j.sse.2008.12.011.
5. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices / P.D. Mitcheson, E.M. Yeatman, G.K. Rao, A.S. Holmes, T.C. Green // Proceedings of the IEEE. – 2008. – Vol. 96, N 9. – P. 1457–1486. – doi: 10.1109/JPROC.2008.927494.
6. **Khan F.U., Qadir M.U.** State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2015. – Vol. 26, N 10. – Art. 103001. – doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.

7. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Архитектура и анализ схем МЭМ рекуператоров электрической энергии // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 4 (129). – С. 49–54.
8. 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.
9. Kwon D., Rincon-Mora G.A., Torres E.O. Harvesting ambient kinetic energy with switched-inductor converters // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2011. – Vol. 58, N 7. – P. 1551–1560. – doi: 10.1109/TCSI.2011.2142731.
10. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Микроэлектромеханические преобразователи // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41, № 2. – С. 120–135.
11. Queiroz A.C.M. de, Domingues M. The doubler of electricity used as battery charger // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2011. – Vol. 58, N 12. – P. 797–801. – doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963.
12. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 11. – С. 39–42.
13. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – Vol. 476, N 1. – P. 012115/1–012115/5. – doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115.
14. 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.
15. 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, N 1. – P. 012126/1–012126/5. – doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.
16. Self-biased inductor-less interface circuit for electret-free electrostatic energy harvesters / E. Lefeuvre, S. Risquez, J. Wei, M. Woytasik, F. Parrain // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 557, N 1. – P. 012052/1–012052/5. – doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012052.
17. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Влияние параметров диодов на работу схемы ЭМГ на основе дубликатора Беннета // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 2 (27). – С. 57–68. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-2-57-68.
18. Karami A., Basset P., Galayko D. Electrostatic vibration energy harvester using an electret-charged MEMS transducer with an unstable auto-synchronous conditioning circuit // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 660, N 1. – P. 012025/1–012025/5. – doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012025.
19. Interface circuit for vibration energy harvesting with adjustable bias voltage / J. Wei, E. Lefeuvre, H. Mathias, F. Costa // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 660, N 1. – P. 012016/1–012016/5. – doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012016.
20. 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, N 2. – P. 183–185. – doi: 10.1109/LED.2014.2387213.
21. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Анализ электромеханических процессов в МЭМП с изменяющейся площадью перекрытия электродов // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 2 (35). – С. 115–127.
22. Драгунов В.П., Синицкий Р.Е., Киселев Д.Е. Влияние непараллельных электродов на характеристики МЭМС в режиме с контролируемым зарядом // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 1 (34). – С. 58–71. – doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71.
23. Драгунов В.П., Киселев Д.Е., Синицкий Р.Е. Особенности электромеханических взаимодействий в МЭМС с непараллельными электродами // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – № 6. – С. 360–369. – doi: 10.17587/nmst.19.360-369.
24. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю., Лойко Д.И. Влияние непараллельности электродов на характеристики микромеханических конденсаторов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 3 (32). – С. 54–64. – doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64.

A MICROELECTROMECHANICAL GENERATOR BASED ON THE BENNET DOUBLER MODIFIED CIRCUIT

Dragunov V.P., Sinitskiy R.E., Ostertak D.I.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Due to the rapid development of wireless sensor networks having different applications the problem of their power supply has arisen. The use of conventional batteries and accumulators needs periodical maintenance, which is not always feasible. Therefore, new types of self-contained power sources converting ambient energy to electrical energy are under study. Due to the availability and comparatively high power density of surrounding mechanical vibrations as well as compatibility with integrated circuit technology the most promising trend is to use electrostatic microelectromechanical (MEM) mechanical-to-electrical energy converters. In order to use the converted electrical energy it is necessary to have a conditioning (interface) circuit with a consumer device. One of the most advanced MEM converter conditioning circuits is the Bennet doubler circuit. However, it has two main drawbacks, namely, an uncontrolled voltage growth causing an electric breakdown of the circuit elements and the ability to operate only if the capacitance modulation depth is more than 2 (in the case of a single capacitor converter). In this paper a new modification of the Bennet doubler circuit without the above mentioned drawbacks is suggested and studied. Mathematical models that make it possible to evaluate the main parameters of the circuit in different modes are developed. It is established that depending on the capacitance modulation depth η of the variable capacitor the circuit can operate in two modes, i.e. when $\eta < 2$ one can observe the saturation of the storage capacitor voltage and charge (autostabilization), but when $\eta \geq 2$ a continuous growth of the variable capacitor voltage and charge is observed. An introduction of the second variable capacitor to the circuit enables decreasing the value η , which results in changing operating modes from $\eta = 2$ to $\eta = 1,618$.

Keywords: MEM converter, microgenerator, mechanical vibrations, variable capacitor, Bennet doubler, autostabilization.

DOI: 10.17212/1727-2769-2017-3-39-51

REFERENCES

1. Khan S., Pathan A.-S.K., Alrajeh N.A. *Wireless sensor networks: current status and future trends*. Boca Raton, CRC Press, 2016. 546 p.
2. Oudenhoven J.F.M., Vullers R.J.M., Schaijk R. A review of the present situation and future developments of micro-batteries for wireless autonomous sensor systems. *International Journal of Energy Research*, 2012, vol. 36, no. 12, pp. 1139–1150. doi: 10.1002/er.2949.
3. Yang B., Liu H., Liu J., Lee C. *Micro and nano energy harvesting technologies*. Boston, Artech House, 2014. 291 p.
4. Vullers R.J.M., Schaijk R. van, Doms I., Van Hoof C., Mertens R. Micropower energy harvesting. *Solid-State Electron*, 2009, no. 53, pp. 684–693. doi: 10.1016/j.sse.2008.12.011.
5. Mitcheson P.D., Yeatman E.M., Rao G.K., Holmes A.S., Green T.C. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 2008, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486. doi: 10.1109/JPROC.2008.927494.
6. Khan F.U., Qadir M.U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, vol. 26, no. 10, art. 103001. doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
7. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Arkhitektura i analiz skhem MEM rekuperatorov elektricheskoi energii [Architecture and analysis of circuits of microelectromechanical electrical energy recuperators]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2011, no. 4 (129), pp. 49–54.
8. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. MEM rekuperatory bez razryva tsepi, sodержashchei induktivnyi element [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.
9. Kwon D., Rincon-Mora G.A., Torres E.O. Harvesting ambient kinetic energy with switched-inductor converters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2011, vol. 58, no. 7, pp. 1551–1560. doi: 10.1109/TCSI.2011.2142731.

10. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Mikroelektromekhanicheskie preobrazovateli [Microelectromechanical converters]. *Mikroelektronika – Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, no. 2, pp. 120–135. (In Russian).
11. Queiroz A.C.M. de, Domingues M. The doubler of electricity used as battery charger. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2011, vol. 58, no. 12, pp. 797–801. doi: 10.1109/TCSII.2011.2173963.
12. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Mikroelektromekhanicheskii generator na osnove duplikatora Benneta [Microelectromechanical generator based on Bennet's doubler]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2012, no. 11, pp. 39–42.
13. Dragunov V., Dorzhiev V. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 476, no. 1, pp. 012115/1–012115/5. doi: 10.1088/1742-6596/476/1/012115.
14. Dragunov V.P., Galaiko D.Yu., Dorzhiev V.Yu., Basset 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.
15. 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, no. 1, pp. 012126/1–012126/5. doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012126.
16. Lefeuvre E., Risquez S., Wei J., Woytasik M., Parrain F. Self-biased inductor-less interface circuit for electret-free electrostatic energy harvesters. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 557, no. 1, pp. 012052/1–012052/5. doi: 10.1088/1742-6596/557/1/012052.
17. 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.
18. Karami A., Basset P., Galayko D. Electrostatic vibration energy harvester using an electret-charged MEMS transducer with an unstable auto-synchronous conditioning circuit. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 660, no. 1, pp. 012025/1–012025/5. doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012025.
19. Wei J., Lefeuvre E., Mathias H., Costa F. Interface circuit for vibration energy harvesting with adjustable bias voltage. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 660, no. 1, pp. 012016/1–012016/5. doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012016.
20. 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 Lett*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 183–185. doi: 10.1109/LED.2014.2387213.
21. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Analiz elektromekhanicheskikh protsessov v MEMS s izmenyayushcheysya ploshchad'yu perekrytiya elektrodov [The analysis of electromechanical operation of in-plane overlap MEMS converter]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 2 (35), pp. 115–127.
22. Dragunov V.P., Sinitskii R.E., Kiselev D.E. Vliyanie neparallel'nykh elektrodov na kharakteristiki MEMS v rezhime s kontroliruemym zaryadom [Influence of electrode nonparallelism on MEMS characteristics in a controlled charge mode]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 1 (34), pp. 58–71. doi: 10.17212/1727-2769-2017-1-58-71.
23. Dragunov V.P., Kiselev D.E., Sinitskii R.E. Osobennosti elektromekhanicheskikh vzaimodeistvii v MEMS s neparallel'nymi elektrodami [Specific features of the electromechanical interactions in MEMS with nonparallel electrodes]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of Nano- and Microsystem Technique*, 2017, no. 6, pp. 360–369. doi: 10.17587/nmst.19.360-369.
24. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu., Loiko D.I. Vliyanie neparallel'nosti elektrodov na kharakteristiki mikromekhanicheskikh kondensatorov [Influence of electrodes nonparallelism on micromechanical capacitor characteristics]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 3 (32), pp. 54–64. doi: 10.17212/1727-2769-2016-3-54-64.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Драгунов Валерий Павлович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: наноэлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 140 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: drag@adm.nstu.ru).

Dragunov Valery Pavlovich (b. 1947) – Doctor of Science (Eng.), associate professor, professor at the 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 engineering. He is the author of more than 140 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: drag@adm.nstu.ru).



Синицкий Родион Евгеньевич – родился в 1994 году, студент Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано 2 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sinitskiy.rodion@yandex.ru).

Sinitskiy Rodion Evgenyevich (b. 1994) – student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem engineering. He is the author of 2 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sinitskiy.rodion@yandex.ru).



Остертак Дмитрий Иванович – родился в 1983 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса 20, корп. 4. E-mail: ostertak@ngs.ru, ostertak@corp.nstu.ru).

Ostertak Dmitriy Ivanovich (b. 1983) – PhD (Eng.), associate professor at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem engineering. He is the author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ostertak@ngs.ru, ostertak@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 25 марта 2017 г.
Received March 25, 2017*

To Reference:

Dragunov V.P., Sinitskiy R.E., Ostertak D.I. Mikroelektromekhanicheskii generator na osnove modifitsirovannoi skhemy duplikatora Benneta [A microelectromechanical generator based on the Bennet doubler modified circuit]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2017, no. 3 (36), pp. 39–51. doi: 10.17212/1727-2769-2017-3-39-51