

УДК 621.3.049.779

ОДНОКОНДЕНСАТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ДУПЛИКАТОРА БЕННЕТА

© 2021 г. В. П. Драгунов^а, *, Р. Е. Синицкий^а, **, Е. В. Драгунова^а

^аНовосибирский государственный технический университет, Пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073 Россия

*E-mail: drag@adm.nstu.ru

**E-mail: sinitsky.rodion@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.05.2020 г.

После доработки 04.09.2020 г.

Принята к публикации 28.09.2020 г.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований одноконденсаторного преобразователя энергии механических колебаний в электрическую на основе дубликатора Беннета с источником питания в цепи переменного конденсатора. Получены аналитические выражения для расчета его основных характеристик, позволяющие существенно упростить поиск параметров элементов преобразователя на этапе предварительного проектирования. Показано, что результаты теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет их использовать для оптимального выбора элементов преобразователя при разработке электромеханических микрогенераторов, активных датчиков вибраций и ускорений, а также пороговых устройств для регистрации превышения амплитуды колебаний конструкции допустимого критического значения. Достоинство исследуемой, по сравнению с базовой схемой дубликатора Беннета, состоит в том, что она является универсальной и позволяет преобразователю работать при действии механической силы, вызывающей глубину модуляции емкости конденсатора менее 2. В результате появляется возможность расширить диапазон используемых амплитуд внешних механических колебаний и номенклатуру используемых переменных конденсаторов.

DOI: 10.31857/S0544126921020046

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие область прикладной науки, изучающая микро- и наноэлектромеханические системы, превратилась в мощную ветвь современной электроники. Вот уже несколько десятилетий среднегодовой рост мирового рынка микроэлектромеханических систем (МЭМС), в которых реализуется и используется совокупность механических и электрических взаимодействий и связей опережает рост рынка электронных компонентов. МЭМС применяются в системах мониторинга состояния человека, конденсаторных матрицах устройств сенсорного и бесконтактного ввода информации, измерительных системах, инерциальных платформах и навигационных системах, микрогироскопах, микроакселерометрах, автономных микрогенераторах электрической энергии, (энергетических харвестеров), в различного рода охранных системах и пороговых устройствах, например, сигнализирующих о превышении допустимых уровней вибраций и ускорений или механических напряжений. Внимание к таким системам обусловлено их гибкостью, надежностью, простотой

реализации и малой ценой. Технологии МЭМС открывают новые возможности, способствующие повышению чувствительности, надежности и отказоустойчивости, снижению энергопотребления изделий на основе МЭМС. Области применения МЭМС продолжают неуклонно расширяться, а сами устройства улучшаться и становиться более сложными [1, 2].

Наличие в МЭМС электрических полей, движущихся механических узлов, а также заложенные принципы функционирования, определяют специфические проблемы и используемые методы их проектирования и изготовления. При этом большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих на этапе предварительного проектирования существенно упростить поиск параметров элементов системы, а также провести расчет и оптимизацию конструкции для достижения необходимых параметров МЭМС с достаточной для практических применений точностью.

В настоящее время наиболее перспективными среди микроэлектромеханических систем счита-

ются электростатические МЭМС, т.к. процессы их производства полностью совместимы с современной интегральной технологией. Принцип работы электростатических МЭМС основан на использовании переменных конденсаторов, чья емкость изменяется при помощи механического воздействия так, что механические силы выполняют определенную работу против электростатических сил притяжения разноименно заряженных пластин конденсатора. В результате, энергия механических колебаний преобразуется в электрическую энергию переменного конденсатора — первичного преобразователя.

Так как переменный конденсатор должен быть предварительно заряжен, требуется внешний источник заряда, такой как батарея [1–13], электрет [14–17], контактная разность потенциалов электродов [18–20] и т.п. Как правило, переменный конденсатор не может быть подключен непосредственно к оконечному устройству — потребителю, необходимо иметь некую схему сопряжения — вторичный преобразователь, представляющую собой интерфейс между потребляющим и генерирующим устройствами. Схема сопряжения должна вырабатывать необходимую выходную мощность, уровень напряжения или тока, требуемые потребляющим устройством. Кроме того, сама схема не должна потреблять много энергии, т.е. очень важно уменьшить потери энергии, вызванные элементами схемы сопряжения.

Одной из наиболее перспективных схем сопряжения в настоящее время представляется схема на основе дубликатора Беннета [7] и ее модификации [7–16]. Данная схема позволяет существенно увеличить энергию сигнала. Однако необходимость сообщения переменному конденсатору начального заряда, неконтролируемый рост напряжения, приводящий к пробоем элементов схемы, а также возможность функционирования только при глубине модуляции емкости переменного конденсатора $\eta = C_{\max}/C_{\min}$ больше 2, стимулируют поиск новых решений, лишенных данных недостатков.

В [15, 16] было показано, что схема преобразователя на основе дубликатора Беннета с источником питания в цепи основного переменного конденсатора сохраняет работоспособность и при $\eta < 2$, причем в этом случае реализуется режим автостабилизации напряжений и зарядов. Таким образом, на основе схемы, предложенной в [15], появилась возможность создавать преобразователи, работающие при малых амплитудах внешних механических колебаний, когда глубина модуляции емкости переменного конденсатора $\eta < 2$ [14–16].

В данной работе проводится детальный анализ работы преобразователя на основе модифицированной схемы дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Электрическая схема одноконденсаторного электростатического преобразователя колебательной энергии на основе модифицированного дубликатора Беннета [14] с источником питания в цепи переменного конденсатора C_{var} представлена на рис. 1. Схема содержит переменный конденсатор C_{var} , два постоянных конденсатора C_1 (накопительный конденсатор) и C_2 , три диода $D_1 - D_3$ и источник питания V_0 в цепи переменного конденсатора C_{var} . Преобразование механической энергии в электрическую происходит при периодическом изменении емкости переменного конденсатора под действием внешней механической силы.

Полный цикл преобразования энергии данной схемой включает две чередующиеся фазы — фазу заряда и фазу разряда переменного конденсатора C_{var} [14]. В дальнейшем фазу заряда C_{var} будем обозначать индексами $(n - 1)$ и $(n + 1)$, а фазу разряда C_{var} — индексом (n) .

В фазе заряда под действием внешней механической силы емкость C_{var} изменяется от $C_{\min}$ до $C_{\max}$. В фазе разряда емкость C_{var} изменяется от $C_{\max}$ до $C_{\min}$. После этого цикл преобразования повторяется.

Проведем анализ работы генератора, используя вместо диодов ключи, (отмечены пунктиром на рис. 1) сопротивления которых в разомкнутом состоянии равны бесконечности, а в замкнутом — несколькими десяткам Ом. Такое приближение позволит учесть основные особенности функционирования преобразователя и получить аналитические выражения, описывающие его работу. Предположим также, что постоянные времени процессов заряда и разряда конденсаторов много меньше длительности цикла преобразования.

В фазе заряда конденсатора C_{var} , когда его емкость увеличивается, размыкается ключ Sw_3 и, когда напряжение на C_{var} становится меньше напряжений $(V_{C_1} + V_0)$ и $(V_{C_2} + V_0)$, замыкаются ключи Sw_1 и Sw_2 (здесь V_{C_1} и V_{C_2} — напряжения на конденсаторах C_1 и C_2). В конце $(n - 1)$ -й фазы заряда C_{var} конденсаторы C_1 и C_2 оказываются включенными параллельно, а напряжение на переменном конденсаторе C_{var} принимает значение

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

где $V_{C_1}^{(n-1)}$ и $V_{C_2}^{(n-1)}$ — напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 в конце $(n - 1)$ -й фазы заряда C_{var} , когда $C_{\text{var}} = C_{\max}$.

В фазе разряда конденсатора C_{var} , когда его емкость уменьшается, ключи Sw_1 и Sw_2 размыкают-

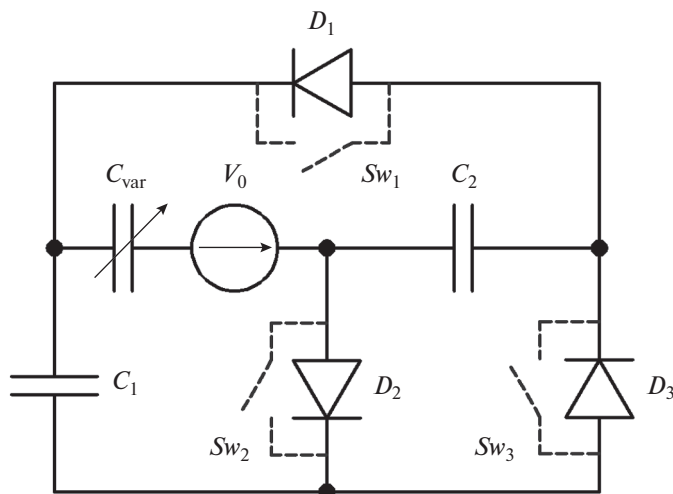


Рис. 1. Электрическая схема электростатического преобразователя на основе дубликатора Беннета с одним переменным конденсатором и источником питания в цепи C_{var} .

ся, и, когда напряжение на C_{var} становится больше напряжения $(V_{C_1} + V_{C_2} + V_0)$, замыкается ключ Sw_3 . В конце (n) -й фазы разряда C_{var} конденсаторы C_1 и C_2 оказываются включенными последовательно, а напряжение на переменном конденсаторе C_{var} достигает значения

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

здесь $V_{C_1}^{(n)}$ и $V_{C_2}^{(n)}$ — напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 в конце (n) -й фазы разряда C_{var} , когда $C_{\text{var}} = C_{\text{min}}$.

Анализ показывает [14], что в конце (n) -й фазы разряда C_{var} изменения зарядов на конденсаторах C_{var} , C_1 и C_2 за (n) -ю фазу будут равны между собой $|\Delta q_{C_{\text{var}}}^{(n)}| = |\Delta q_{C_1}^{(n)}| = |\Delta q_{C_2}^{(n)}| = \Delta q^{(n)}$ и равны:

$$\Delta q^{(n)} = \left(\frac{1}{C_{\text{min}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1} \left(\frac{q^{(n-1)}}{C_{\text{min}}} - \frac{q_{C_1}^{(n-1)}}{C_1} - \frac{q_{C_2}^{(n-1)}}{C_2} - V_0 \right), \quad (3)$$

где $q^{(n-1)}$, $q_{C_1}^{(n-1)}$ и $q_{C_2}^{(n-1)}$ — заряды на конденсаторах C_{var} , C_1 и C_2 в конце $(n-1)$ -й фазы заряда C_{var} .

Из (1)–(3) следует, что при подключении к схеме первичного источника напряжения V_0 за счет работы внешней механической силы заряды и напряжения на конденсаторах начинают возрастать. Однако рост зарядов и напряжений может происходить по-разному.

В первом случае приращения зарядов на конденсаторах C_{var} , C_1 и C_2 в каждом последующем цикле преобразования постепенно уменьшаются — происходит автостабилизация зарядов в схеме [14]. На рис. 2 (прямая 1) показана зависимость величины относительного приращения заряда на накопительном конденсаторе C_1 , нормированная на приращение заряда в первом цикле, от номера цикла, рассчитанная с использованием (3) при $C_0 = 101$ пФ, $C_{\text{max}} = 151$ пФ, $C_{\text{min}} = 76.1$ пФ, $C_1 = 0.5$ нФ, $\eta = 1.98$ и $V_0 = 10$ В. Здесь C_0 — емкость конденсатора C_{var} в отсутствии механиче-

ской силы, а $\eta = C_{\text{max}}/C_{\text{min}}$ — глубина модуляции емкости C_{var} . Первый цикл включает первую фазу разряда и вторую фазу заряда C_{var} , а нулевому циклу соответствует первая фаза заряда C_{var} после подключения V_0 .

В установившемся режиме автостабилизации изменения зарядов и протекание токов в схеме прекращаются, но напряжение на конденсаторе C_{var} продолжает изменяться в соответствии с изменениями его емкости. В результате при увеличении количества циклов преобразования площади, охватываемые Q – V диаграммами для C_{var} , уменьшаются и, в конце концов, эти Q – V диаграммы стягиваются в прямые, параллельные оси напряжений [14]. При этом в установившемся режиме изменения и зарядов и напряжений на постоянных конденсаторах C_1 и C_2 прекращаются, а соответствующие Q – V линии, в конце концов, стягиваются в точки.

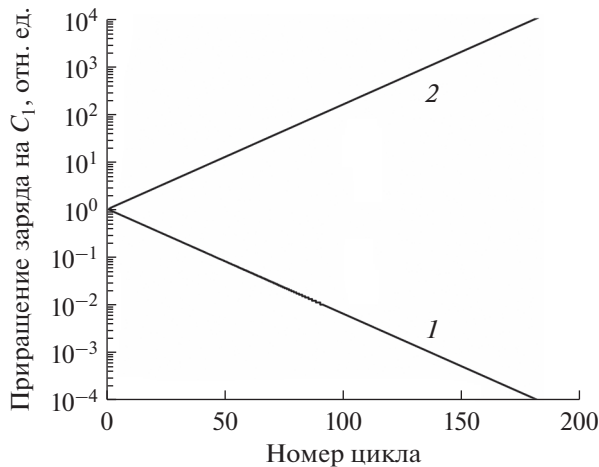


Рис. 2. Зависимость величины относительного приращения заряда на накопительном конденсаторе от номера цикла при изменении емкости конденсатора C_{var} . 1 — режим автостабилизации, 2 — режим неограниченного роста напряжения и заряда.

Во втором случае с каждым последующим циклом преобразования заряды и напряжения на конденсаторах все время монотонно растут — реализуется режим неограниченного роста напряжений и зарядов на конденсаторах. На рис. 2, (прямая 2) показана зависимость величины относительного приращения заряда на накопительном конденсаторе, нормированная на приращение заряда в первом цикле, от номера цикла, рассчитанная для второго случая при $C_0 = 101$ пФ, $C_{\text{max}} = 152.6$ пФ, $C_{\text{min}} = 75.6$ пФ, $C_1 = 0.5$ нФ, $\eta = 2.02$ и $V_0 = 10$ В.

В режиме неограниченного роста напряжения и заряда на конденсаторах площади, охватываемые Q – V диаграммами для C_{var} , при увеличении количества циклов преобразования все время монотонно увеличиваются, а соответствующие Q – V линии для C_1 и C_2 монотонно удлиняются [14].

Реализация того или иного режима зависит от конкретных параметров элементов схемы.

Анализ (1)–(3) и рис. 2 показывает, что изменение величины приращения заряда на накопительном конденсаторе C_1 происходит по геометрической прогрессии. При этом

$$\Delta q_{C_1,m} = \Delta q_{C_1,1} g^{m-1}, \quad (4)$$

где $m \geq 1$ — номер цикла, $\Delta q_{C_1,1}$ и $\Delta q_{C_1,m}$ — приращение зарядов на накопительном конденсаторе C_1 за время первого и m -го циклов соответственно, а g — знаменатель прогрессии. Режиму автостабилизации соответствует убывающая геометрическая прогрессия с $g < 1$. Режиму неограниченного роста напряжений и зарядов соответствует воз-

растающая геометрическая прогрессия с $g \geq 1$. Для данной схемы

$$\Delta q_{C_1,1} = \Delta q_1 \frac{\lambda}{\sigma + \lambda + \eta}, \quad (5)$$

$$\Delta q_1 = V_0 C_1 \frac{\eta + (\sigma + \lambda)(\eta - 1)}{(\sigma + \lambda + \eta)[(1 + \lambda) + \lambda/\sigma]}, \quad (6)$$

$$g = 1 + \frac{\lambda\sigma(\eta - 2)}{(\sigma + \lambda + \eta)[(\lambda + 1)\sigma + \lambda]}, \quad (7)$$

а $\lambda = C_1/C_{\text{min}}$, $\sigma = C_2/C_{\text{min}}$ и $\mu = C_{\text{max}}/(C_2 + C_1)$.

С учетом (4)–(7) заряд, накопленный на C_1 к концу m -го цикла ($m \geq 0$), составит

$$q_{C_1,m} = -V_0 C_1 \frac{\mu}{1 + \mu} + \Delta q_{C_1,1} \frac{1 - g^m}{1 - g}. \quad (8)$$

При этом напряжение на накопительном конденсаторе C_1 к концу m -го цикла будет равно

$$V_{C_1,m} = q_{C_1,m}/C_1.$$

В установившемся режиме автостабилизации заряд, накопленный на C_1 , достигнет максимума и составит

$$q_{C_1,\text{stab}} = -V_0 C_1 \frac{\mu}{1 + \mu} + \Delta q_{C_1,1} \frac{1}{1 - g}. \quad (9)$$

Согласно (7) режим автостабилизации реализуется, если $\eta < 2$. В противном случае реализуется режим неограниченного роста напряжений и зарядов. Критическому режиму перехода от режима автостабилизации к режиму неограниченного роста напряжений и зарядов соответствуют $g = 1$ и $\eta_{\text{cr}} = 2$.

Анализ (9) показывает, что в режиме автостабилизации выражение для оценки величины напряжения на накопительном конденсаторе C_1 может быть представлено в виде

$$V_{C_1,\text{stab}} = V_0 \frac{(\eta - 1)}{2 - \eta}, \quad (10)$$

т.е. напряжение $V_{C_1,\text{stab}}$ на накопительном конденсаторе C_1 в режиме автостабилизации определяется источником питания V_0 и глубиной модуляции емкости конденсатора C_{var} и не зависит от величин емкостей конденсаторов. Согласно (10) $V_{C_1,\text{stab}}$ будет больше V_0 при $\eta_{\text{cr}} > 1.5$. Чтобы при заданном V_0 получить как можно большую величину напряжения $V_{C_1,\text{stab}}$ необходимо выбирать значения η как можно ближе к критическому значению $\eta_{\text{cr}} = 2$.

Согласно (10) глубина модуляции емкости η связана с напряжением стабилизации $V_{C_1,stab}$ соотношением

$$\eta = \frac{2V_{C_1,stab} + V_0}{V_{C_1,stab} + V_0},$$

что позволяет использовать $V_{C_1,stab}$ для экспериментального определения глубины модуляции емкости переменных конденсаторов в динамическом режиме.

Отметим, что механизм насыщения напряжения в данном случае не связан с электромеханическими взаимодействиями, как в случае, описанном в [8, 9].

Одними из важнейших характеристик преобразователей являются: количество электрической энергии W_{C_1} , запасенной в накопительном конденсаторе, количество электрической энергии W_{V_0} , взятой из источника питания V_0 , и скорость накопления электрической энергии (мощность) в конденсаторе C_1 . Анализ показывает, что количество электрической энергии W_{C_1} , запасенной в накопительном конденсаторе C_1 к концу m -го цикла, составит

$$W_{C_1,m} = \frac{(QN_m - 1)^2 V_0^2 C_1}{2}, \quad (11)$$

где

$$QN_m = \frac{1}{2 - \eta} \left[1 - \frac{\mu + \eta - 1}{1 + \mu} g^m \right], \quad (12)$$

а количество электрической энергии W_{V_0} , взятой из источника питания V_0 , к концу m -го цикла

$$W_{V_0,m} = V_0^2 C_{max} QN_m. \quad (13)$$

На рис. 3 приведены зависимости W_{C_1} и W_{V_0} , а на рис. 4 отношения W_{C_1} к W_{V_0} от номера цикла преобразования, рассчитанные с использованием (11)–(13) и (8). В расчетах принимали, что $V_0 = 10$ В, $C_{max} = 121$ пФ, $C_1 = 470$ пФ и $\eta = 1.984$.

Видно, что данная схема позволяет накопить в конденсаторе C_1 значительно больше энергии, чем взято из источника питания, что делает ее перспективной для использования в преобразователях механической энергии в электрическую. Причем это различие возрастает с увеличением количества циклов.

В насыщении отношение W_{C_1} к W_{V_0} достигает максимума и равно

$$\kappa = \frac{1}{2} \frac{(\eta - 1)^2}{2 - \eta} \frac{C_1}{C_{max}}, \quad (14)$$

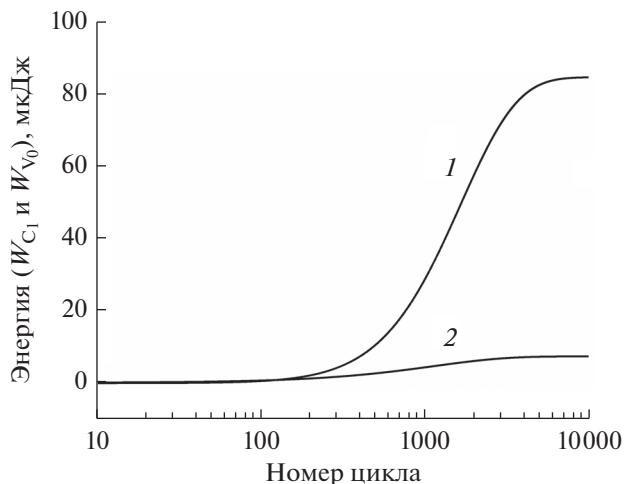


Рис. 3. Зависимости W_{C_1} (1) и W_{V_0} (увеличено в 10 раз) (2) от номера цикла преобразования m .

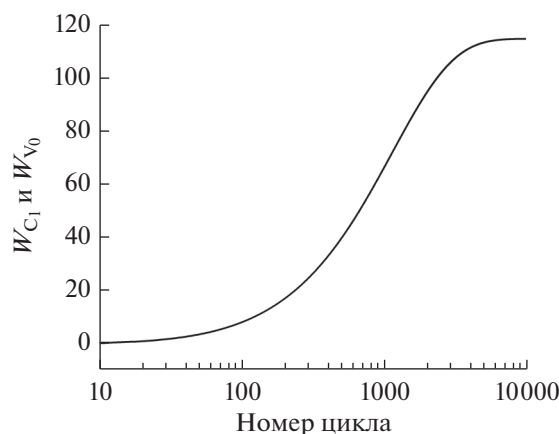


Рис. 4. Зависимость отношения W_{C_1} к W_{V_0} от номера цикла преобразования m .

т.е. определяется глубиной модуляции η и пропорционально отношению C_1 к C_{max} . Чтобы при заданном отношении C_1 к C_{max} получить как можно большую величину κ необходимо выбирать значение η как можно ближе к критическому значению. При этом, как и в случае с $V_{C_1,stab}$, глубина модуляции емкости конденсатора C_{var} должна оставаться меньше критической.

Согласно (11)–(14) количество электрической энергии W_{C_1} , запасенной в накопительном конденсаторе C_1 , будет превышать количество электрической энергии W_{V_0} , взятой из источника питания V_0 , если параметр $\rho = C_{max}/C_1$, характеризующий величину κ , будет меньше критического значения

$$\rho_{cr} = \left(\frac{C_{max}}{C_1} \right)_{cr} = \frac{(\eta - 1)^2}{2(2 - \eta)}.$$

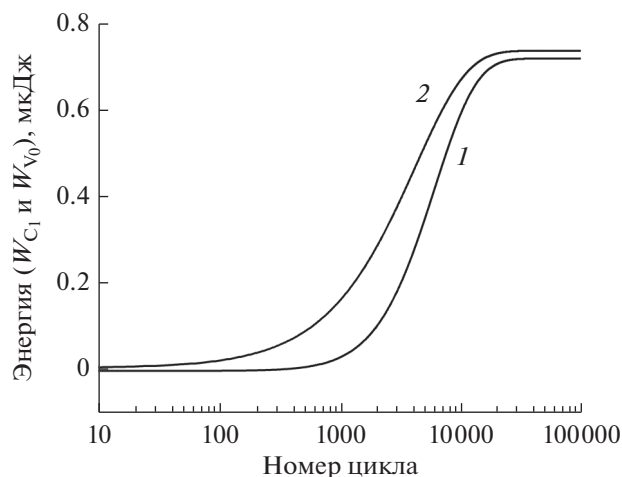


Рис. 5. Зависимости W_{C_1} (1) и W_{V_0} (2) от номера цикла преобразования m для $\rho > \rho_{cr}$.

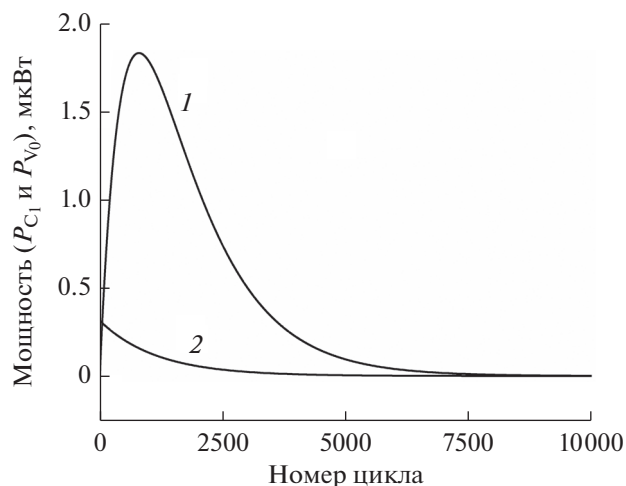


Рис. 6. Зависимости скорости накопления электрической энергии в конденсаторе C_1 (1) и скорости отдачи электрической энергии источником питания V_0 (увеличено в 10 раз) (2) от номера цикла преобразования m .

При этом накопленная в C_1 энергия W_{C_1} начинает превышать W_{V_0} не сразу, а лишь после нескольких

начальных циклов. Превышение начнется после $m_0 = [z] + 1$ цикла, где $[z]$ — целая часть z

$$z = \frac{1}{\ln(g)} \ln \left\{ \frac{1}{B} \left[1 - (2 - \eta)(\sqrt{\rho(2 + \rho)} + 1 + \rho) \right] \right\}, \quad B = (\mu + \eta - 1)/(1 + \mu). \quad (15)$$

Согласно (15) W_{C_1} будет превышать W_{V_0} , если z вещественное положительное число. Для рис. 3 и 4 $\rho_{cr} = 29.5$, а $\rho = 0.257$, т.е. $\rho < \rho_{cr}$. При этом, $z = 22.96$ и, согласно (15), энергия W_{C_1} , запасенная в накопительном конденсаторе C_1 , может превышать количество электрической энергии W_{V_0} , взятой из источника питания V_0 , что и показывают рис. 3 и 4. Если же, при сохранении значений остальных параметров, выбрать $C_1 = 4$ пФ, то ρ станет равняться 30.25 и, согласно (15), энергия

W_{C_1} , запасенная в накопительном конденсаторе C_1 , не может превышать количество электрической энергии W_{V_0} , взятой из источника питания V_0 , что и показывает рис. 5.

Полученные выражения позволяют рассчитать и зависимость скорости накопления электрической энергии (мощности) в конденсаторе C_1 от номера цикла. С учетом (4)–(8) средняя скорость накопления электрической энергии (мощность) в конденсаторе C_1 за m -й цикл преобразования равна

$$P_{C_1,m} = f \frac{\Delta q_1}{2C_1} \left(\frac{C_1}{C_1 + C_{max} + C_2} \right)^2 \left(\Delta q_1 \frac{2 - (1 + g)g^m}{1 - g} - 2V_0 C_{max} \right) g^m, \quad (16)$$

где f — частота изменения внешней силы.

Соответствующая зависимость $P_{C_1,m}$ от номера цикла преобразования, рассчитанная при $V_0 = 10$ В, $C_{max} = 121$ пФ, $C_1 = 470$ пФ и $\eta = 1.984$ приведена на рис. 6 (кривая 1). На этом же рисунке приведена зависимость скорости отдачи электрической энергии источником питания V_0 от номера цикла преобразования (кривая 2).

Из рис. 6 видно, что скорость накопления электрической энергии (мощность) в конденса-

торе C_1 достигает максимума не сразу, а по истечению нескольких циклов. В тоже время скорость отдачи электрической энергии источником питания V_0 монотонно уменьшается при увеличении числа циклов преобразования. Таким образом оптимизация параметров элементов схемы может существенно изменять эффективность преобразования энергии.

Анализ показывает, что максимальная скорость нарастания энергии (максимальная мощность) достигается в цикле с номером

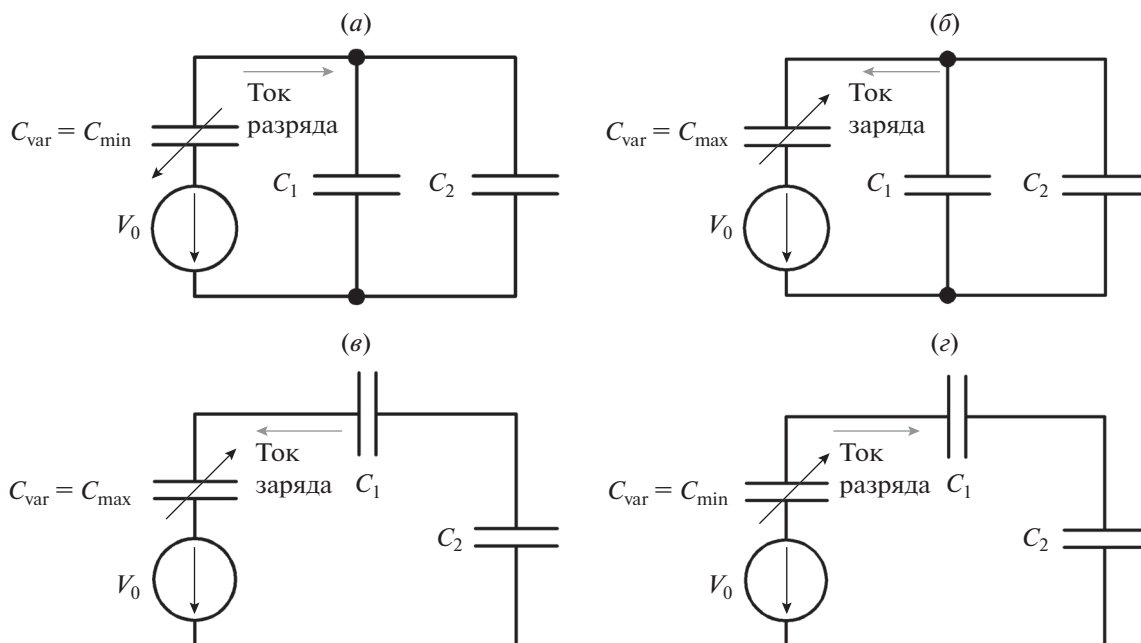


Рис. 7. Фазы работы электростатического преобразователя с идеальными ключами: (а) для первой фазы разряда C_{var} , (б) первой фазы заряда C_{var} , (в) для второй фазы заряда C_{var} и (г) второй фазы разряда конденсатора C_{var} .

$$m_{\max} = \left[\frac{1}{\ln(g)} \lg \left(\frac{1}{1+g} \frac{(\eta-1)(1+\mu)}{\mu+\eta-1} \right) \right].$$

Из общих соображений ясно, что для получения максимальной скорости нарастания энергии нужно использовать конденсатор C_{var} с глубиной модуляции емкости лишь немного меньшей критического значения.

Достоинство данной схемы, по сравнению с базовой схемой дубликатора Беннета [7], состоит в том, что она позволяет преобразователю работать при действии механической силы, вызывающей глубину модуляции емкости конденсаторов менее 2. В результате появляется возможность расширить номенклатуру используемых переменных конденсаторов и создавать электромеханические преобразователи, активные датчики вибраций и ускорений, а также пороговые устройства, работающие в широком диапазоне механических колебаний.

Для верификации моделей, использованных для анализа поведения схемы электростатического преобразователя на основе одноконденсаторного дубликатора Беннета с источником питания в ветви переменного конденсатора, были проведены соответствующие экспериментальные исследования.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментальных исследований была создана установка, соответствующая

схеме с ключами, показанной на рис. 1. Емкость переменного конденсатора C_{var} могла изменяться в пределах от 50 до 500 пФ.

В процессе исследования измерялись зависимости напряжения на накопительном конденсаторе C_1 от количества циклов преобразования при различной глубине модуляции емкости конденсатора C_{var} . Модуляция емкости осуществлялась с периодом в несколько секунд. Напряжение первичного источника питания V_0 составляло $V_0 = 1.26$ В. Для измерения напряжения на накопительном конденсаторе применялся повторитель напряжения на операционном усилителе AD549KHZ с ультранизким входным током (0.1 пА).

В отличие от модели, использованной в расчетах цикл преобразования в эксперименте включал не две, а четыре фазы преобразования; две фазы разряда и две фазы заряда конденсатора C_{var} . После нескольких начальных циклов преобразования работа схемы проходила следующим образом: после того, как емкость конденсатора C_{var} достигала минимального значения C_{min} замыкались ключи Sw_1 и Sw_2 , а ключ Sw_3 размыкался (рис. 7а), происходил первый разряд C_{var} — фаза 1. Затем, не меняя состояния ключей, емкость C_{var} увеличивали до C_{max} (рис. 7б) и происходил первый заряд C_{var} — фаза 2. После этого, не меняя емкостей конденсаторов, изменяли состояния ключей: ключи Sw_1 и Sw_2 размыкались, а ключ Sw_3 замыкался (рис. 7в). При этом происходил второй заряд

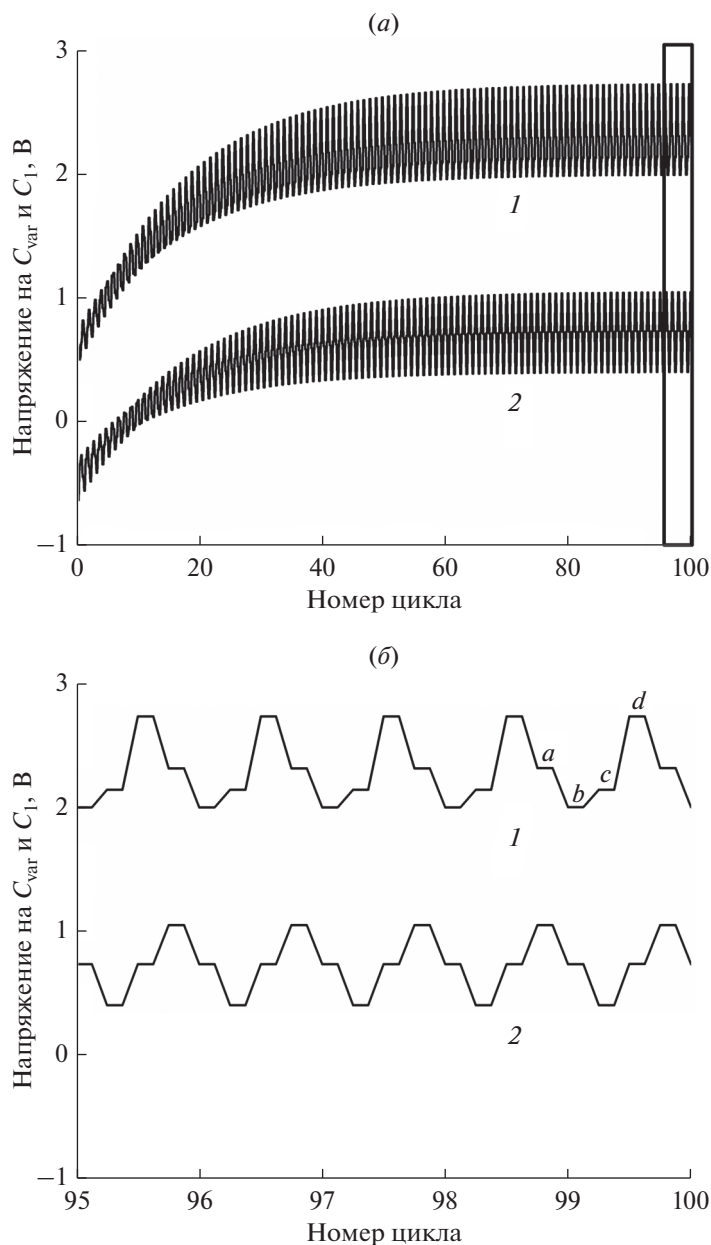


Рис. 8. Зависимости напряжения на конденсаторе C_{var} (1) и накопительном конденсаторе C_1 (2) в режиме автостабилизации, рассчитанные с использованием (5)–(8), от числа тактов преобразования: (а) – в диапазоне 0–400 тактов, (б) – более подробно в диапазоне 380–400 тактов.

C_{var} – фаза 3. И, наконец, в четвертой фазе, не меняя состояния ключей, емкость C_{var} уменьшали до C_{min} (рис. 7з) и происходил второй разряд C_{var} . Затем цикл преобразования повторялся.

В результате на зависимостях V_{C_1} и $V_{C_{var}}$ от числа тактов преобразования n (и от времени) появлялись четыре полочки (рис. 8), соответствующие окончаниям четырех фаз преобразования, отмеченные буквами a – фаза 1, b – фаза 2, c – фаза 3 и d – фаза 4.

На рис. 9 представлены зависимости напряжения на накопительном конденсаторе от времени, измеренные при двух значениях глубины модуляции емкости конденсатора C_{var} , $C_1 = 1193$ пФ и $C_2 = 1230$ пФ. В первом случае (кривая 1) при $C_{max} = 274$ пФ и $C_{min} = 196$ пФ ($\eta = 1.39$) был реализован режим автостабилизации, во втором (кривая 2) – при $C_{max} = 401$ и $C_{min} = 73.5$ пФ ($\eta = 5.46$) был реализован режим неограниченного роста зарядов и напряжений.

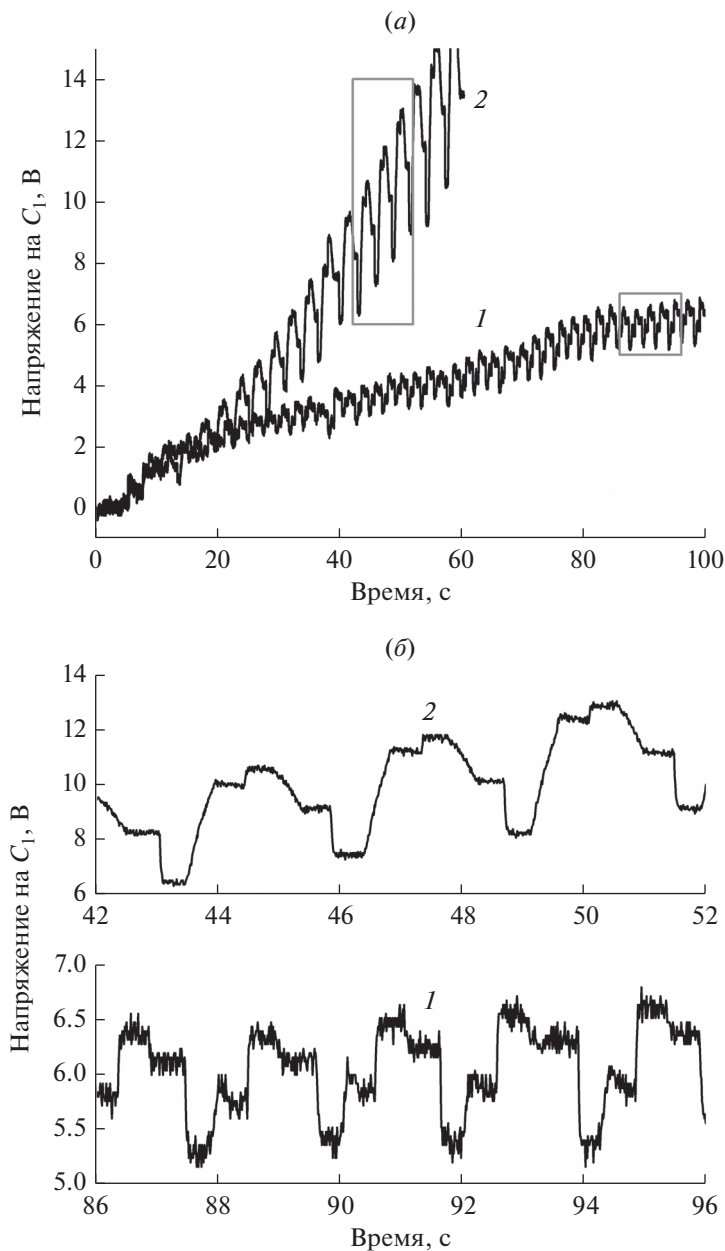


Рис. 9. Зависимости напряжения на накопительном конденсаторе C_1 , измеренные в режиме автостабилизации (1) и неограниченного роста зарядов и напряжений (2), от времени преобразования. (а) в диапазоне 0–100 с, (б) более подробно верхний график в диапазоне 42–52 с, нижний график в диапазоне 86–96 с.

Видно, что основные особенности теоретических результатов — четыре полочки (рис. 9б), тенденции к насыщению и неограниченному росту (рис. 9а) наблюдаются и в эксперименте.

Анализ показал, что зависимость напряжения на накопительном конденсаторе C_1 , соответствующего окончанию второй фазы (рис. 9б), от времени (и от числа циклов) хорошо описывается выражением $V_{C_{1,m}} = q_{C_{1,m}}/C_1$, где $q_{C_{1,m}}$ определяется с использованием (8).

На рис. 10 показаны зависимости величины относительного приращения заряда на накопительном конденсаторе C_1 , нормированные на приращение заряда в первом цикле, от номера цикла, построенные с использованием экспериментальных данных для этих же двух случаев: в режиме автостабилизации (прямая 1) и неограниченного роста зарядов и напряжений (прямая 2).

Расчеты показывают, что значения знаменателя прогрессии g , определенные теоретически и на основании экспериментальных данных, различа-

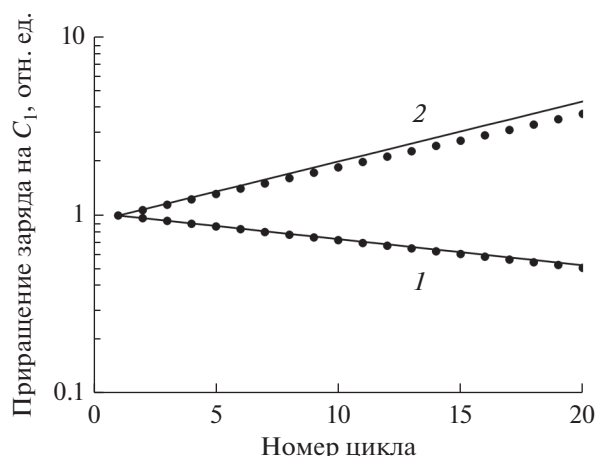


Рис. 10. Зависимости величины относительного приращения заряда на накопительном конденсаторе C_1 от номера цикла при изменении емкости конденсатора C_{var} . 1 — режим автостабилизации ($\eta = 1.39$), 2 — режим неограниченного роста напряжения и заряда ($\eta = 5.46$). Точки — эксперимент, сплошные линии — расчет.

ются не более, чем на 3%. Причем теоретические значения превышают, полученные на основе эксперимента. На наш взгляд это может быть следствием не учета в теоретических расчетах собственных емкостей ключей в разомкнутом состоянии. Измерения показали, что эти емкости могут составлять порядка 4–6 пФ.

В тоже время анализ показывает, что в целом результаты расчета и эксперимента достаточно хорошо согласуются между собой и без учета паразитных емкостей, а получаемые теоретические оценки напряжений нужно рассматривать как предельно достижимые.

Кроме того следует отметить, что экспериментальные зависимости напряжения на накопительном конденсаторе C_1 от времени (или от числа циклов), полученные в результате четырехфазного эксперимента, в отличие от двухфазной модели в режиме автостабилизации не выходят на насыщение. Наблюдается лишь стабилизация напряжений. Предсказываемое же (10) значение напряжения насыщения $V_{C_1,stab}$ соответствует напряжению в конце второй фазы четырехфазного эксперимента.

Отметим, что при использовании четырехфазного цикла на соответствующих Q – V диаграммах при увеличении количества циклов наблюдается смена направления движения отображающей точки. На рис. 11 показаны Q – V диаграммы для разных циклов четырехфазного цикла. На рис. 11а для трех циклов, такты с 7 по 18, на рис. 11б — для семи циклов, такты с 20 по 50, на рис. 11в — для одного цикла, такты с 418 по 422. Стрелки на рис. указывают направление движения отображающей точки.

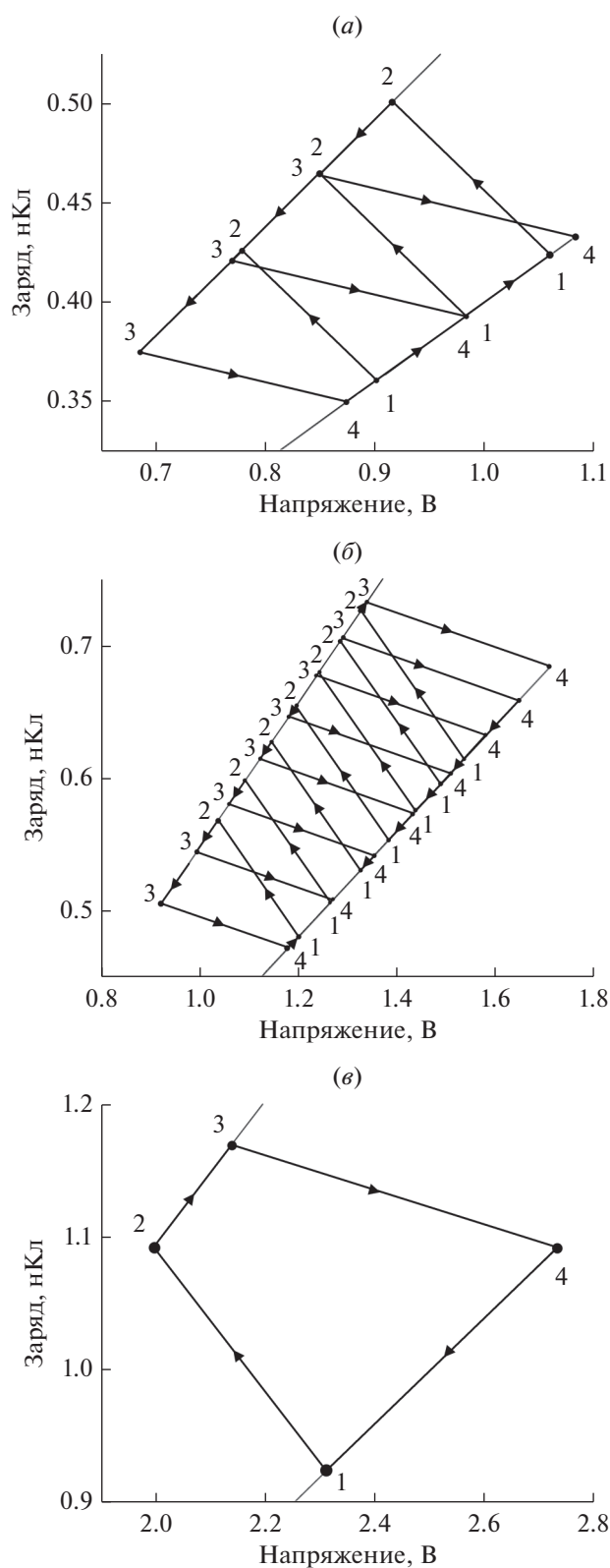


Рис. 11. Q – V диаграммы для C_{var} . Цифры — номер фазы, точки — положение отображающей точки в конце соответствующей фазы преобразования.

ки при изменении фазы преобразования. Видно, что на рис. 11а и рис. 11в направления движения отображающей точки противоположные. Согласно рис. 11б смена направления движения отображающей точки происходит между 30-м и 48-м тактами. Изменение направления движения отображающей точки связано с изменением полярности напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 при увеличении количества циклов преобразования (см. рис. 8). При этом отрицательные напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 в начальных циклах приводили к заряду C_{var} в первой и второй фазах преобразования и разряду C_{var} в третьей и четвертой фазах.

Отметим также, что при дальнейшем увеличении количества циклов после цикла, соответствующего тактам с 418 по 422 (рис. 11в), Q – V диаграммы для разных циклов будут накладываться друг на друга, т.е. данные Q – V диаграммы в установившемся режиме автостабилизации не стягиваются в прямую параллельную оси напряжений (как при двухфазной модели), а наблюдается лишь стабилизация напряжений и зарядов на конденсаторах в соответствующих фазах. При этом в установившемся режиме изменения зарядов и напряжений на постоянных конденсаторах C_1 и C_2 также не прекращаются, а соответствующие Q – V линии, в конце концов, не стягиваются в точку, а только стабилизируются.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект FSUN-2020-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khan F., Qadir M. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting // J. Micromech. Microeng. 2016. V. 26. P. 103001. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/10/103001>
2. Pozo B., Garate J.I., Araujo J.A., Susana F. Energy Harvesting Technologies and Equivalent Electronic Structural Models – Review // Electronics. 2019. V. 8. № 486. P. 31. <https://doi.org/10.3390/electronics8050486>
3. Wei J., Lefeuvre E., Mathias H., Costa F. Interface Circuit for Vibration Energy Harvesting with Adjustable Bias Voltage // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 660. P. 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/660/1/012016>
4. Драгунов В.П. Микромеханический электростатический преобразователь // Докл. акад. наук высш. шк. РФ. 2007. № 1(8). С. 56–66.
5. Lefeuvre E., Risquez S., Wei J., Woytasik M., Parrain F. Self-Biased Inductor-less Interface Circuit for Electret-Free Electrostatic Energy Harvesters // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 557. P. 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/557/1/012052>
6. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Архитектура и анализ схем МЭМ рекуператоров электрической энергии // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 4(129). С. 49–54.
7. de Queiroz A.C.M. Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler // Proc. IEEE Int. Midwest Symp. Circuits Syst. 2010. P. 404–407.
8. 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. V. 36. № 2. P. 183–185. <https://doi.org/10.1109/LED.2014.2387213>
9. Dorzhiev V., Karami A., Basset P., Dragunov V., Galayko D. MEMS electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 557. № 1. P. 012126 (5 p.). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/557/1/012126>
10. de Queiroz A.C.M. Electrostatic energy harvesting using capacitive generators without control circuits // Analog Integr Circ Sig Process. 2015. № 85. P. 57–64. <https://doi.org/10.1007/s10470-015-0577-0>
11. de Queiroz A.C.M., de Menezes N.A.T. Energy harvesting with pairs of variable capacitors without control circuits // Analog Integr. Circ. Sig. Process. 2018. № 97. P. 533–544. <https://doi.org/10.1007/s10470-018-1253-y>
12. Драгунов В.П., Доржиев В.Ю. Микроэлектромеханический генератор на основе дубликатора Беннета // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11(148). С. 39–42.
13. de Queiroz A.C.M. Biased capacitive divider electrostatic generators for energy harvesting // 2017 IEEE 8th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS). 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/LASCAS.2017.7948045>
14. Dragunov V.P., Ostertak D.I., Sinititskiy R.E. New modifications of a Bennet doubler circuit-based electrostatic vibrational energy harvester // Sensors and Actuators. A: Physical. 2020. V. 302. Art. 111812 (14 p.). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111812>
15. Karami A., Basset P., Galayko D. Electrostatic vibration energy harvester using an electret-charged MEMS transducer with an unstable auto-synchronous conditioning circuit // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 660. № 1. P. 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/660/1/012025>
16. Dragunov V.P., Dorzhiev V.Y., Ostertak D.I., Atuchin V.V. A new autostabilization mechanism in the Bennet doubler circuit-based electrostatic vibrational energy harvester // Sensors and Actuators. A: Physical. 2018. V. 272. P. 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.053>
17. Lagomarsini C., Jean-Mistral C., Monfray S., Sylvestre A. Optimization of an electret-based soft hybrid generator for human body applications // Smart Materials and Structures. 2019. V. 28. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab3906>
18. Kuehne I., Frey A., Marinkovic D., Eckstein G., Seidel H. Power MEMS—A capacitive vibration-to-electrical energy converter with built-in voltage // Sensors and Actuators A: Physical. 2008. V. 142. P. 263–269.
19. Varpula A., Laakso S.J., Havia T., Kyynäräinen J., Prunnila M. Contacting mode operation of work function energy harvester // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 557. P. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/557/1/012010>
20. Dragunov V.P., Lyutaeva M.N. Parameters Estimation of the MEM Transducer with Electrodes Produced from Different Materials // 2009 Int. School and Seminar INTERNANO 2009. 2009. P. 93–96.