

УДК 621.313.12 + 519.876.5 + 537.226.4

И. Л. Багинский, Э. Г. Косцов

(Новосибирск)

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГИИ

Предложен метод преобразования энергии механических колебаний малой амплитуды (2–20 мкм) в электрическую энергию. Это преобразование осуществляется в схеме двухъёмкостного электростатического генератора, представляющего собой совокупность металлических полосок с нанесенной поверх них пленкой сегнетоэлектрика, созданную с помощью технологии микроэлектроники. Проанализирована работа генератора с учетом потерь заряда и их компенсации от источника тока. Показано, что использование сегнетоэлектрика позволяет получить высокую эффективность и удельную мощность генератора, которая может достигать значений 4–40 кВт/м². Установлено, что увеличение амплитуды колебаний решетки, вызывающее перекрытие n линеек решетки, приводит к увеличению мощности генератора в $2n$ раз по сравнению с модуляцией емкости при перекрытии только одной линейки. Энергию, полученную от совокупности микрогенераторов, возможно суммировать на общей нагрузке независимо от фазы колебаний решетки.

Введение. Колебательные движения широко распространены в природе и технике. Существует большое число способов преобразования разных типов энергии в механические колебания.

Данная работа посвящена исследованию возможности преобразования энергии механических колебаний с амплитудой порядка нескольких микрон (независимо от источника их возникновения) в электрическую энергию с помощью ёмкостного электростатического генератора, создаваемого с помощью технологии микроэлектроники.

Электростатические генераторы известны достаточно давно. Принцип их действия основан на работе механических сил против электростатических сил притяжения разноименных зарядов [1]. В ёмкостной машине Теплера [1, 2] механическая работа совершается при сдвиге заряженных обкладок конденсатора относительно друг друга против действия сил электрического поля. Эта машина является одной из разновидностей подобных генераторов и подробнее описывается ниже.

Эквивалентная схема такой машины приведена на рис. 1, а. Конденсатор $C(t)$ первоначально заряжен до потенциала V . Заряд на конденсаторе $Q_0 = C_{\max} V$, где C_{\max} – начальное (максимальное) значение емкости конденсатора; ключ $K1$ установлен в положение 2. Если теперь уменьшить емкость конденсатора, механически раздвигая его пластины и совершая таким образом работу против действия сил электрического поля, то энергия электростатического поля возрастет с $W_1 = C_{\max} V^2 / 2$ до $W_2 = C_{\min} \Phi_{\max}^2 / 2$ (Φ_{\max} – макси-

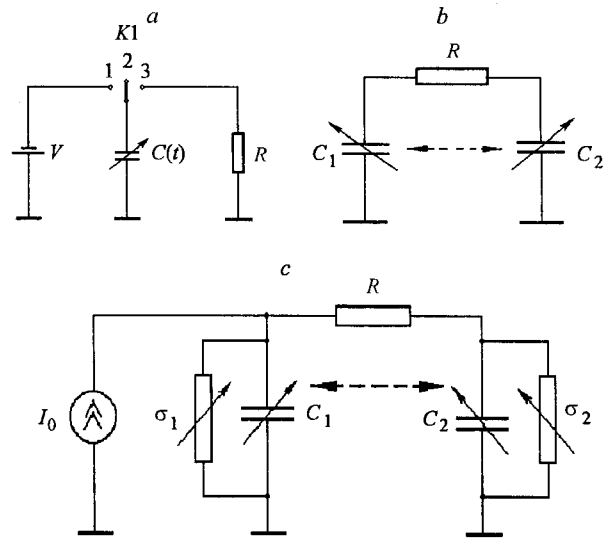


Рис. 1. Различные варианты электрических схем электростатических емкостных генераторов: схема идеального емкостного генератора (машина Теплера) (а); схема идеального двухъемкостного генератора (b); схема двухъемкостного генератора с учетом утечек (σ_1) и с компенсацией потерь (с)

мальное напряжение на конденсаторе), но заряд при этом не изменится: $Q_0 = C_{\max} V = C_{\min} \Phi_{\max}$ (C_{\min} – минимальное значение емкости конденсатора), ИЛИ

$$\Phi_{\max} = VC_{\max}/C_{\min}, \tag{1}$$

тогда

$$W_2 = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} W_1 = \frac{Q_0^2}{2C_{\min}}. \tag{2}$$

Полученная электрическая энергия передается в нагрузку R переключением $K1$ в положение 3. Далее пластины конденсатора возвращаются в исходное положение, заряжаются от источника напряжения (ключ $K1$ установлен в положение 1) и процесс преобразования энергии повторяется. Развиваемая таким генератором мощность

$$P = W_2 f, \tag{2a}$$

где f – частота повторения циклов преобразования.

Определим эффективность преобразования энергии E как отношение энергии, вырабатываемой генератором, к потерям электрической энергии за период преобразования. Эффективность связана с КПД преобразования к следующим образом: $\kappa = 1 - 1/E$.

В данном случае в каждом цикле теряется энергия, равная W_1 , поскольку конденсатор в конце цикла разряжается, а в начале следующего цикла необходимо затратить энергию W_1 от источника напряжения V для поддержания заряда на конденсаторе Q_0 . Тогда

$$E = W_2/W_1 = C_{\max}/C_{\min}. \tag{3}$$

Недостатки такого емкостного генератора заключаются в следующем.

1. Поскольку величина $C(t)$ мала, то для увеличения энергоемкости генератора до практически значимых параметров необходимо максимально повышать рабочие напряжения V , что приводит к росту Φ_{\max} , вплоть до напряжений, близких к напряжению пробоя воздушного зазора.

2. Необходимо использовать ключ $K1$ как для съема электрической энергии на нагрузку R , так и для подзарядки емкости $C(t)$ в процессе преобразования энергии. Отметим, что при напряжениях 10^3-10^5 В и более изготовление такого ключа – достаточно трудная техническая задача.

В связи с перечисленными недостатками схема, приведенная на рис. 1, *a*, нашла ограниченное применение – только для генерации высоких напряжений (до нескольких сотен киловольт) при решении специальных технических задач.

Более полезный практически вариант применения емкостного метода преобразования механической энергии в электрическую описан в [3], его схема приведена на рис. 1, *b*. Механическая сила может преобразовываться в электрическую энергию за счет изменения во времени емкости двух конденсаторов $C_i(t)$, $i=1,2$. Они первоначально заряжены до потенциала V и механически связаны таким способом, при котором величины емкостей всегда находятся в противофазе (C_1 максимальна в тот момент времени, когда C_2 минимальна, и наоборот). При этом отпадает необходимость использования ключа $K1$. Электрическая энергия в виде переменного тока $I(t)$ выделяется на нагрузке R . Если в схеме есть первоначальный заряд $Q_0 = (C_1 + C_2)U$, распределенный между емкостями C_1 и C_2 , то в идеальном случае при отсутствии утечек заряда система будет работать неограниченно долго, периодически перекачивая часть заряда с одной емкости на другую и обратно. Необходимо отметить, что в этой схеме при раздвижении пластин конденсатора (когда происходит выработка энергии) напряжение на нем максимально, а при сближении пластин напряжение на конденсаторе минимально, поэтому потери энергии на перезарядку конденсаторов малы. Отметим, что в работе [3] использовались воздушные конденсаторы, поэтому вопрос о низкой удельной энергоемкости оставался нерешенным.

Ранее нами был разработан новый принцип электромеханического преобразования энергии. Он основан на эффекте электростатического наката тонких металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрика [4, 5]. На базе такого способа преобразования энергии с помощью технологии микроэлектроники создан ряд электростатических микродвигателей. Отличие этих микродвигателей от известных аналогов заключается в возможности получения значительно более высокой энергоемкости (свыше $0,3-1$ Дж/мм² при напряжениях 20–50 В) за счет использования сегнетоэлектрических пленок с высокими значениями диэлектрической проницаемости ϵ (2000–4000 и более). Экспериментальные исследования основных закономерностей работы указанных микродвигателей показывают, что под действием электростатических сил возможно изменение емкости системы (свободная, не закрепленная на подложке по всей поверхности, металлическая пленка – сегнетоэлектрик – электрод) в 100–1000 раз при величине удельной емкости системы 200–1000 пФ/мм².

В указанных микродвигателях осуществляется преобразование электрической энергии в механическую. Из общих соображений ясно, что при использовании таких микроэлектронных конструкций возможен и обратный

эффект – преобразование механической энергии в электрическую. В этом случае под действием механических сил происходит отрыв металлических пленок от поверхности сегнетоэлектрика в присутствии напряжения между электродами и емкость структуры значительно уменьшается (в 100 раз и более).

Возможно преобразование энергии и с помощью другой тонкопленочной конструкции, представленной на рис. 2. Она выполнена в виде решеток из металлических полосок 4, расположенных на двух подложках 1а, 1b. Совокупность полосок на одной из подложек (например, верхней на рис. 2, а), соединенных электрически между собой, и соответствующая совокупность полосок на другой подложке, тоже соединенных между собой (схематически показано линиями б), образуют один из переменных конденсаторов C_1 . Другой конденсатор C_2 образован также совокупностью полосок на верхней подложке, но пространственно сдвинутых относительно группы полосок на нижней подложке, перекрывающей оба верхних поля полосок на полпериода решетки, рис. 2, б. Верхняя подложка колеблется в направлениях, показанных стрелками (см. рис. 2, а). Нижняя подложка с осажденной поверх металлических полосок пленкой сегнетоэлектрика 3 неподвижна. Изолятор 5 используется для выравнивания топологии поверхностей с целью уменьшения трения. Зазор 2 между подложками заполнен жидкой средой с высокой ди-

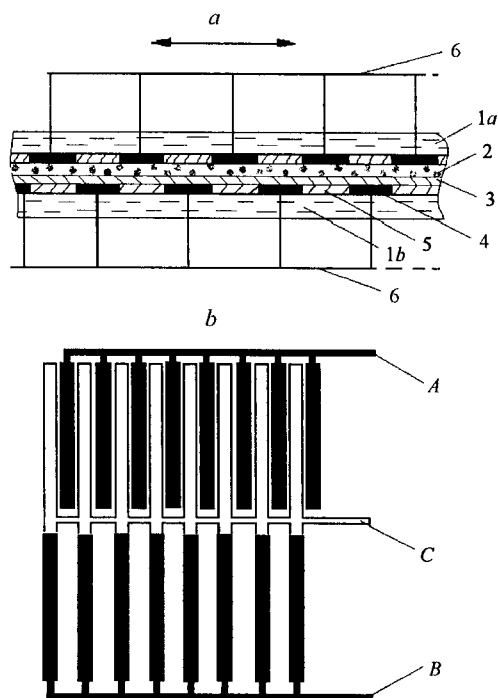


Рис. 2. Пример топологической реализации двухемкостного генератора: а – ячейка преобразования колебательной механической энергии в электрическую (конденсатор C_1). Стрелками показано направление движения; б – схематическое представление топологии двухемкостного генератора (показаны только металлические полоски: полоски, расположенные на верхней подложке, обозначены черным цветом, на нижней – белым). А – шина C_1 , В – шина C_2 , С – общая шина

электрической проницаемостью ϵ порядка 50–200. Величина зазора может составлять несколько микрон, и накапливаемая в структуре удельная плотность электрической энергии достаточно велика. Слой сегнетоэлектрика дает возможность достигать высоких значений удельной емкости и, кроме того, играет роль электрической изоляции, предохраняющей ячейку от электрического пробоя.

1. Математическая формулировка и анализ задачи работы электрической схемы двухемкостного генератора. В качестве первого приближения проанализируем работу схемы идеального генератора без учета утечек заряда в конденсаторах C_i (см. рис. 1, *b*). Она описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{d(\varphi_1^p(t)C_1^p(t))}{dt}; \\ I(t) &= -\frac{d(\varphi_2^p(t)C_2^p(t))}{dt}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$I(t) = \frac{\varphi_2^p(t) - \varphi_1^p(t)}{R},$$

где

$$C_1^p(t) + C_2^p(t) = C_0; \quad (5)$$

индексом p отмечено, что данная величина размерная; φ_i – потенциалы на емкостях C_i ; $I(t)$ – ток, вырабатываемый генератором и проходящий через нагрузку R .

Система уравнений (4) решалась с условием

$$\varphi_1^p C_1^p + \varphi_2^p C_2^p = Q_0, \quad (6)$$

означающим сохранность заряда системы. В этом случае система уравнений (4) упрощается и записывается в виде одного дифференциального уравнения для $h_1(x) = \varphi_1(x)/V$:

$$\frac{dh_1(x)}{dx} + h_1 \left(\frac{1}{C_1} \frac{dC_1(x)}{dx} + \frac{b_1}{C_1(x)C_2(x)} \right) = \frac{b_1}{C_1(x)C_2(x)} \quad (7)$$

с начальным условием $h_1(0) = 1$ и условием сохранения заряда

$$h_1(x)C_1(x) + h_2(x)C_2(x) = 1. \quad (8)$$

Такой случай был качественно рассмотрен в [3]. В данной работе проведен более подробный его анализ в условиях модуляции величин емкостей по синусоидальному закону:

$$C_1(x) = \frac{\cos(x) + 1 + \alpha}{2(1 + \alpha)}; \quad (9)$$

$$C_2(x) = 1 - C_1(x). \quad (10)$$

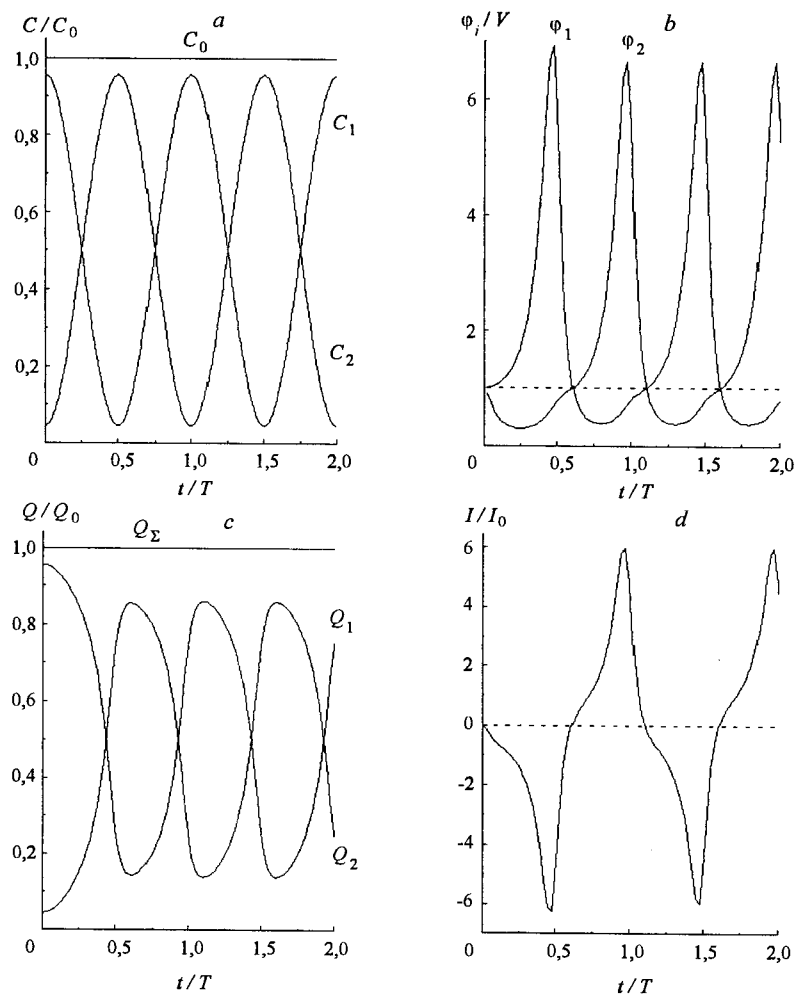


Рис. 3. Изменение во времени величин емкостей (а), потенциалов на емкостях (б), зарядов (с), тока через нагрузку (д). Случай идеального (без утечек) двухемкостного генератора (схема на рис. 1, б), $\alpha = 0,1$, $b_1 = 0,1$

Пример численного решения уравнения (7), иллюстрирующего работу генератора при совокупности параметров, соответствующих пику его мощности, приведен на рис. 3.

Синусоидальные колебания в противофазе емкостей C_1 и C_2 , например, в соответствии с законом (9), (10), приводят к ангармоническим колебаниям величин заряда Q_i и потенциала φ , а также тока I , протекающего в цепи нагрузки R . Чем выше выходная мощность генератора либо ее нормированная величина P_1 , определяемая как отношение величины энергии, вырабатываемой генератором за период колебаний W , к величине начальной энергии, накопленной на конденсаторах W_0 , тем больше амплитуда колебаний величин φ_i , Q_i , I . Здесь

$$P_1 = W/W_0, \quad (11)$$

где $W_0 = C_0 V^2 / 2$;

$$W = \int_{t_1}^{t_1 + T} I^2(t) R dt. \quad (12)$$

Отметим, что в схеме, представленной на рис. 1, *b*, потери заряда при генерации энергии отсутствуют. Для одноконденсаторного же генератора (см. рис. 1, *a*) характерен полный сброс всего заряда, накопленного на конденсаторе при каждом цикле преобразования энергии, и последующее его восстановление от внешнего источника в момент начала следующего цикла. Очевидным преимуществом схемы двухъёмкостного генератора и является отсутствие необходимости использования ключей для передачи электрической энергии в нагрузку.

Из зависимости генерируемой мощности от ωRC_0 , представленной на рис. 4, следует, что существует оптимум (максимум) генерируемой мощности в зависимости от величины нагрузки, рабочей частоты и ёмкости конденсаторов. При увеличении глубины модуляции ёмкости η возрастает мощность генератора P_1 , а максимум P_1 сдвигается в сторону более высоких частот (см. вставку на рис. 4).

Анализ совокупности полученных данных показывает, что в области указанного максимума мощности соблюдаются такие же соотношения:

$$\varphi_{i, \max} / \varphi_{i, \min} \approx \eta = C_{\max} / C_{\min}, \quad W_{i, \max} / W_{i, \min} \approx 2\eta,$$

где $W_i(t) = C_i(t)(\varphi_i(t))^2 / 2$, как и для идеального одноконденсаторного генератора (см. формулы (1)–(3)). Коэффициент 2 в последнем выражении отра-

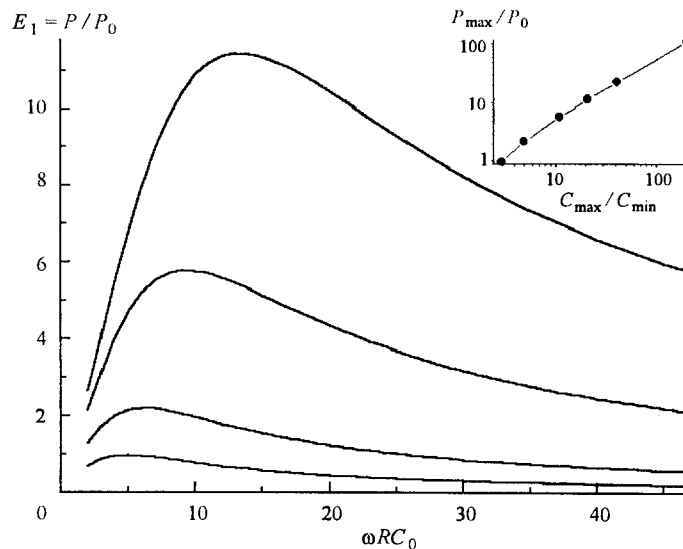


Рис. 4. Зависимость выходной мощности идеального генератора (схема на рис. 1, *b*) от эффективной величины нагрузки. $P_0 = C_0 V^2 / 2$, глубина модуляции ёмкости $\eta = C_{\max} / C_{\min} = 3, 5, 11, 21$ (снизу вверх). На вставке приведена зависимость максимальной выходной мощности от глубины модуляции ёмкости

жует то, что в преобразовании энергии участвуют две емкости и происходит перекачка энергии из одной емкости в другую. В данном случае

$$\kappa_{\max} = W_{\max}/W_0 = P_{\max}/P_0 \approx \frac{\eta}{2}. \quad (13)$$

Выше описаны основные закономерности процесса преобразования энергии в идеальном двухемкостном генераторе. Для описания более реальной ситуации необходимо учитывать проводимости в самих конденсаторах C_1 и C_2 , величины которых в общем случае также могут быть модулированы во времени.

Рассмотрим работу такого двухемкостного генератора с учетом потерь заряда вследствие утечки токов и его компенсации из внешнего источника тока. На эквивалентной схеме рис. 1, с потери учитываются как проводимости $\sigma_i(t)$, подключенные параллельно конденсаторам $C_i(t)$. Для компенсации этих потерь используется источник постоянного тока I_0 .

Работа такого генератора описывается системой дифференциальных уравнений:

$$I(t) = \frac{\varphi_2(t) - \varphi_1(t)}{R};$$

$$I(t) = -I_0 + \frac{d(\varphi_1(t)C_1^P(t))}{dt} + \sigma_1^P(t)\varphi_1(t); \quad (14)$$

$$I(t) = -\frac{d(\varphi_2(t)C_2^P(t))}{dt} - \sigma_2^P(t)\varphi_2(t),$$

где

$$\sigma_1^P(t) + \sigma_2^P(t) = \sigma_0. \quad (15)$$

Исключая $I(t)$ из системы уравнений (14), получаем в безразмерном виде

$$\frac{dy(x)}{dx} = -\frac{y(x)}{C_1(x)} \left(\frac{dC_1(x)}{dx} + b_1 + b_2\sigma_1(x) \right) + z(x) \frac{b_1}{C_1(x)} + \frac{1}{C_1(x)}; \quad (16)$$

$$\frac{dz(x)}{dx} = -\frac{z(x)}{C_2(x)} \left(\frac{dC_2(x)}{dx} + b_1 + b_2\sigma_2(x) \right) + y(x) \frac{b_1}{C_2(x)}, \quad (17)$$

где $x = \omega t$, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, f – частота; $y(x) = \varphi_1/(I_0/\omega C_0)$; $z(x) = \varphi_2(x)/(I_0/\omega C_0)$; $b_1 = 1/\omega RC_0$; $b_2 = \sigma_0/\omega C_0$; $C_1 = C_1^P/C_0$; $C_2 = C_2^P/C_0$; $\sigma_1 = \sigma_1^P/\sigma_0$; $\sigma_2 = \sigma_2^P/\sigma_0$.

Система уравнений (6), (7) с начальными условиями

$$\left. \frac{dy(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{dz(x)}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad (18)$$

или

$$y(0) = \frac{b_1 + b_2 \sigma_2(0)}{b_2(b_1 + b_2 \sigma_1(0) \sigma_2(0))}; \quad z(0) = \frac{b_1}{b_2(b_1 + b_2 \sigma_1(0) \sigma_2(0))}, \quad (18a)$$

решалась численно относительно величин безразмерных потенциалов $y(x)$ и $z(x)$. В результате решения определялись величины тока $I(t)$, проходящего через нагрузку R ; мощность, выделяемая в нагрузке: $P = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t I^2(t) R dt$, где

T – период колебаний решетки; потенциалы на емкостях C_1 и C_2 ; заряды этих емкостей Q_1 и Q_2 ; суммарный заряд Q_Σ . Эффективность преобразования энергии E в соответствии с приведенным выше определением равна отношению электрической мощности, выделяемой в нагрузке P , к потерям мощности из-за токов утечки $P_L = I_0^2 R_\Sigma \left(R_\Sigma = \frac{(r_0 + R)r_0}{2r_0 + R} \right)$; $E(t) = P(t)/P_L$.

В реальных устройствах наибольший интерес могут представлять три случая модуляции величин $C_i(x)$ и $\sigma_i(x)$ (в вышепринятых нормировках $C_1 + C_2 = 1$, $\sigma_1 + \sigma_2 = 1$).

I. Проводимости постоянны, величины емкостей $C_1(t)$ и $C_2(t)$ модулированы за счет механических колебаний решетки по синусоидальному закону (9), (10):

$$\sigma_1(x) = \sigma_2(x) = \frac{1}{2} = \text{const}, \quad (19)$$

где α – константа модуляции. Глубина модуляции емкости η связана с α следующим образом:

$$\eta = C_{\max}/C_{\min} = (2 + \alpha)/\alpha. \quad (20)$$

Такая модуляция емкости характерна для малой амплитуды колебаний решетки, когда сдвиг решетки осуществляется только на один ее период. Если проводимости вне решетки (например, проводимость по поверхности) превышают токи утечки непосредственно в решетке, которые в общем случае пропорциональны площади перекрытия линеек, то можно полагать, что проводимость постоянна во времени.

II. Величины σ_1 и σ_2 , а также $C_1(t)$ и $C_2(t)$ модулированы по одинаковому синусоидальному закону (9), (10):

$$\sigma_1(x) = C_1(x); \quad \sigma_2(x) = C_2(x). \quad (21)$$

В этом случае все указанные величины пропорциональны площади перекрытия полосок и определяются только поперечной проводимостью решетки.

III. Случай перекрытия нескольких линеек решетки за один период механических колебаний, характерный для большой амплитуды колебаний решетки, что эквивалентно частотной модуляции основного периода колебаний емкости:

$$C_1(x) = \frac{\cos[w(1 - \cos x)] + 1 + \alpha}{2(1 + \alpha)}; \quad C_2(x) = 1 - C_1(x), \quad (22)$$

где $w = n\pi$, n – число перекрываемых линеек (если n – дробное число, то линейка перекрывается не полностью). Здесь $\omega' = 2n\omega = 2\frac{w}{\pi}\omega$ – угловая частота модуляции.

В качестве первого приближения проведем анализ системы уравнений (16)–(18) в условиях постоянных утечек, которые компенсируются за счет подключения источника постоянного тока I_0 (случай I); сопротивления утечки, подключенные параллельно емкостям C_i , равны $r_0 = 1/\sigma_i^p$. Система уравнений решалась численно с условиями (9), (10) и (19).

Качественным отличием полученных решений от идеализированного случая является первоначальный спад суммарного заряда $Q_\Sigma = C_1\varphi_1 + C_2\varphi_2$ (где φ_i – напряжения на емкостях C_i) во времени и его колебания в соответствии с периодом изменения емкостей C_i : $T = 2\pi/\omega$. Этот эффект объясняется тем, что в каждом периоде в связи с ростом потенциалов φ_i на емкостях возрастают и токи утечки, что приводит к некоторому уменьшению зарядов Q_i (далее, в моменты перехода потенциалов φ_i через минимумы заряды Q_i вновь подрастают за счет подзарядки от источника I_0). Этот эффект в конечном итоге приводит к спаду Q_Σ на протяжении первых нескольких периодов колебаний.

Зависимость эффективности преобразования энергии E от $R\omega C_0$ качественно аналогична подобной зависимости мощности идеального генератора с тем отличием, что она дополнительно зависит и от токов утечек (параметр $1/b_2 = r_0\omega C_0$): эффективность растет линейно с уменьшением утечек (рис. 5, *a*). Как и в случае идеального генератора, наблюдается рост E с увеличением глубины модуляции емкости η с выходом на «плато» (рис. 5, *b*). Однако частотная зависимость E качественно отличается от частотной зависимости P_1 для идеального генератора (где имеет место пик $P_1(\omega)$) – величина E растет с насыщением (сравнить рис. 5, *c* и рис. 3).

Особый интерес представляет случай II, когда токи утечки и емкости изменяются во времени по одному и тому же закону (9), (10), (21), имеющему простой смысл: поперечная проводимость, через которую с конденсатора уходит заряд, прямо пропорциональна площади перекрытия пластин конденсатора. В этих условиях осуществляется самосогласованный заряд емкостей C_i от источника тока I_0 , причем суммарный заряд системы остается постоянным: $Q_\Sigma = Q(0) \approx Q_0/b_2 = I_0 C_0/\sigma_0$. Его постоянство определяет меньший спад $\varphi_i(t)$ на участке установления динамического равновесия, а также меньшую длительность участка спада $\varphi_i(t)$ по сравнению с вариантом $r_0 = \text{const}$, что, в свою очередь, приводит к росту мощности генератора (при равных, усредненных за период изменения $C_i(t)$ токах утечки) (рис. 5, *d*).

Отметим, что в приведенных выше случаях в области оптимума генерируемой мощности при малых потерях ($b_2 \ll 1$) наблюдаются те же соотношения, что и для идеального генератора: $\varphi_{i, \max}/\varphi_{i, \min} \approx \eta = C_{\max}/C_{\min}$ и $W_{i, \max}/W_{i, \min} \approx 2\eta$.

При увеличении амплитуды колебаний решетки возможно перекрытие за один период n линеек нижней решетки (случай III). В этом случае поведение емкости во времени описывается выражениями (22), в которых емкость C_i частотно модулирована. Так как за каждый период колебаний n линеек решетки перекрываются дважды (при движении вперед и назад), то наблюдается $2n$ колебаний величин C_i , Q_i , φ_i , I (рис. 6). Таким образом, увеличение амплитуды колебаний решетки приводит к увеличению эффективной частоты

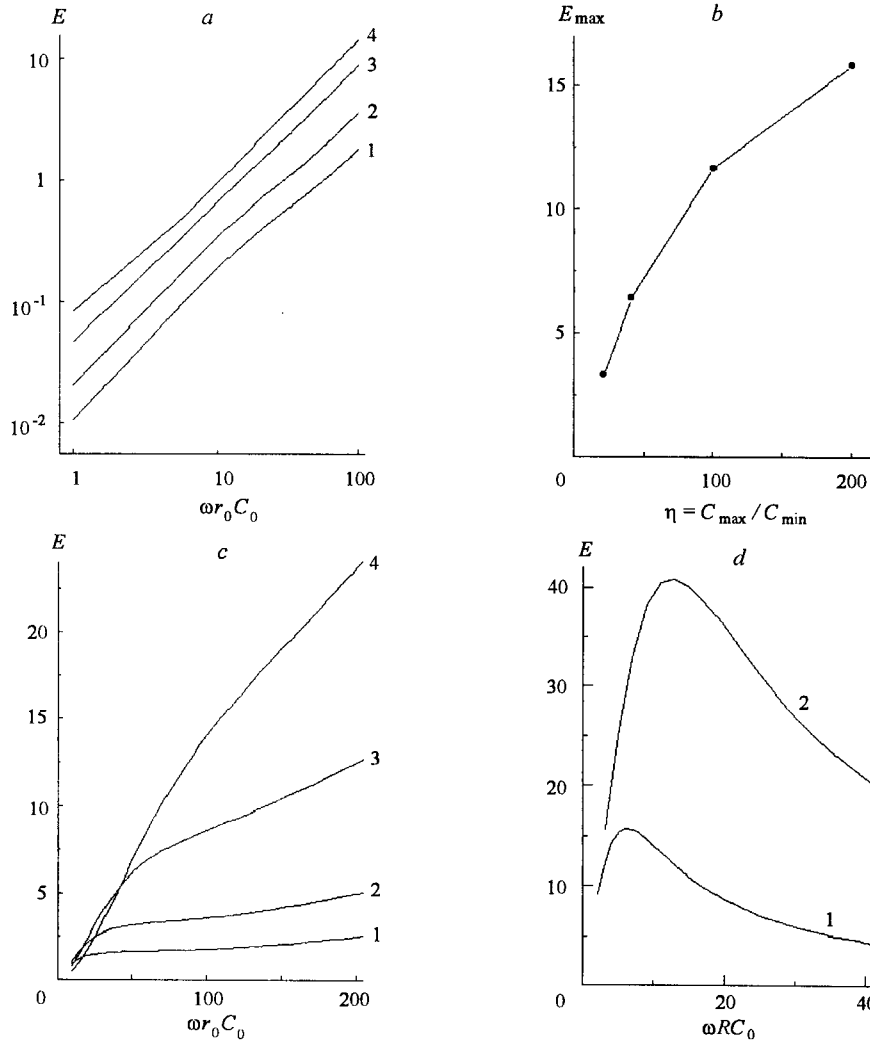


Рис. 5. Поведение эффективности преобразования энергии в зависимости от: *a* – сопротивления утечки, $\alpha = 0,1$, $b_1 = 0,1$ (кривая 1), 0,05 (2), 0,02 (3), 0,01 (4); *b* – глубины модуляции емкости, $b_2 = 0,01$; *c* – частоты, $\alpha = 0,1$, $b_1/b_2 = r_0/R = 1$ (кривая 1), 2 (2), 5 (3), 10 (4); *d* – сопротивления нагрузки, $\alpha = 0,1$, $b_2 = 0,01$ (кривая 1); сравнение со случаем синхронно модулированных утечек ($\sigma_j(t) = C_j(t)$) (кривая 2), усредненные за период утечки одинаковы

генератора в $2n$ раз. Сравнение характеристик генератора в режиме перекрытия одной и n линеек показывает, что они практически совпадают для одинаковых эффективных частот $\omega' = 2n\omega$ (рис. 7, *a*), причем с ростом n это совпадение становится более близким. Таким образом, использование в преобразователе энергии режима перекрытия n линеек приводит при прочих равных условиях (равные α и $b_2 = 1/\omega RC_0$) к росту величины максимальной эффективности в $2n$ раз, причем этот максимум наблюдается при уменьшении частоты колебаний решетки также в $2n$ раз (см. рис. 7, *b*).

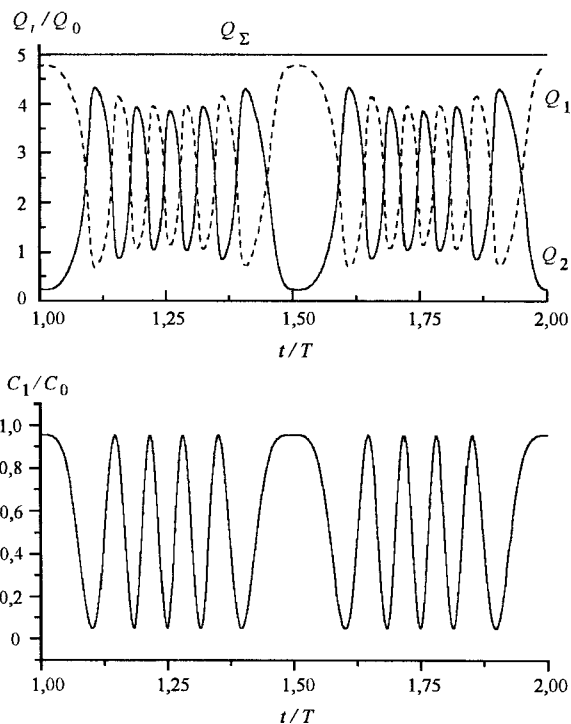


Рис. 6. Изменение во времени величин зарядов и емкости C_1 для случая частотно-модулированной емкости: перекрытие $n = 5$ линеек решетки, $\alpha = 0,1$, $b_1 = 1$, $b_2 = 0,2$

2. Оценка возможных параметров двухъёмкостного генератора в режиме стабилизации напряжения. Выше проведен анализ поведения эффективности преобразования энергии E в зависимости от параметров генератора. Возможны два характерных режима работы генератора. Во-первых, режим стабилизации тока источника, когда $I_0 = \text{const}$ и не меняется при изменении параметров схемы, например, таких, как R , r_0 . Во-вторых, режим стабилизации напряжения, когда начальное значение потенциала $\varphi_1(0)$ на емкости C_1 поддерживается постоянным напряжением, что достигается путем соответствующего изменения I_0 при изменении R , r_0 и f . Поскольку величина E не зависит от I_0 , то она не будет зависеть и от $\varphi_1(0)$. Однако вид кривых зависимостей величины выходной мощности генератора (P) от основных параметров (r_0 , R , α , ω) существенно зависит от режима его работы: либо стабилизации тока I_0 , либо напряжения $\varphi_1(0)$. С точки зрения практики более выгоден режим стабилизации напряжения, потому что в режиме стабилизации тока I_0 в условиях постоянно изменяющейся нагрузки R будут сильно изменяться напряжения φ_i на емкостях C_i и они могут, в частности, превысить пробивное напряжение.

Рис. 8 демонстрирует практические возможности рассматриваемого генератора в режиме стабилизации напряжения на конденсаторе C_1 . Приведены кривые зависимости P от сопротивлений нагрузки R и утечки r_0 , построенные в размерных координатах для решетки линеек с общей площадью 1 см^2 . Используются следующие параметры, легко достигаемые при изготовлении конструкции с помощью технологии микроэлектроники: удельная

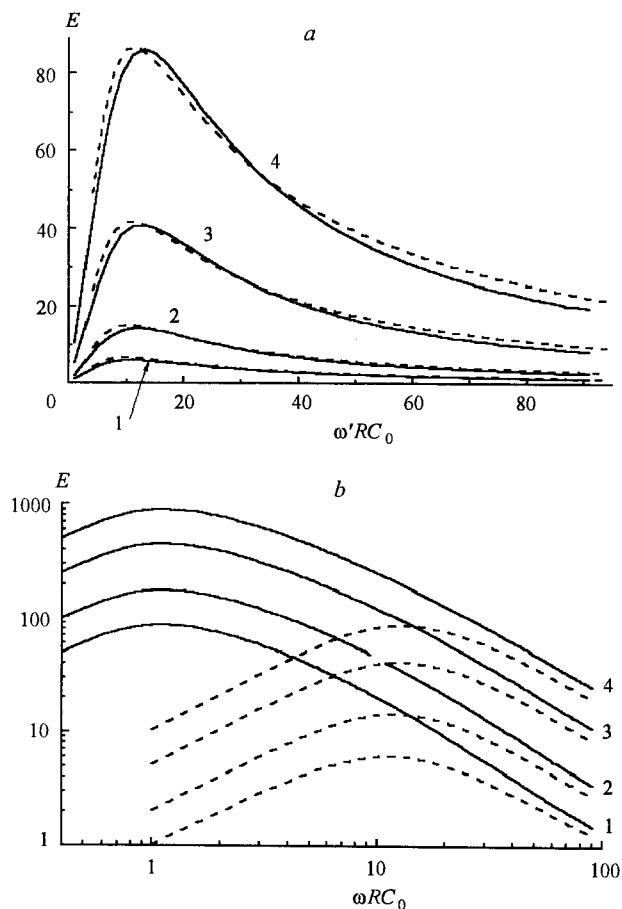


Рис. 7. Сравнение нагрузочных кривых для эффективности преобразования энергии в случае перекрытия одной линейки (пунктирные кривые) и $n = 5$ линеек (сплошные), $\omega' = 2n\omega$, $b'_2 = 1/\omega' r_0 C_0$, b_2 ($n = 0,5$) = b'_2 ($n = 5$) = 0,1 (кривая 1), 0,05 (2), 0,02 (3), 0,01 (4)

емкость $C_{уд} = 100$ пФ/мм², ширина электродов 20 мкм, расстояние между ними 20 мкм, $\alpha = 0,1$, $C_0 = 5000$ пФ, $f = 160$ Гц, $\phi_1(0) = 40$ В. Амплитуда колебаний 40 мкм соответствовала перекрытию одной линейки решетки (рис. 8, *a*) и 200 мкм – перекрытию пяти линеек решетки (рис. 8, *b*). Максимальная мощность здесь достигала 7 и 70 мВт соответственно.

В данном случае в отличие от режима стабилизации тока зависимость генерируемой мощности от сопротивления r_0 слабая (см. рис. 8, *a* и 5, *a*). Она усиливается в области $r_0 \ll R$ (см. рис. 8, *a*, пунктирные кривые), но только за счет увеличения тока источника I_0 при соответствующем снижении эффективности.

Закономерности поведения эффективности при увеличении амплитуды колебаний решетки и мощности аналогичны. При перекрытии n линеек решетки величина пика мощности возрастает в $2n$ раз и происходит сдвиг этого пика в сторону в $2n$ раз меньших сопротивлений нагрузки R (см. рис. 8, *a* и *b*, сплошные кривые). Частотная зависимость мощности также качест-

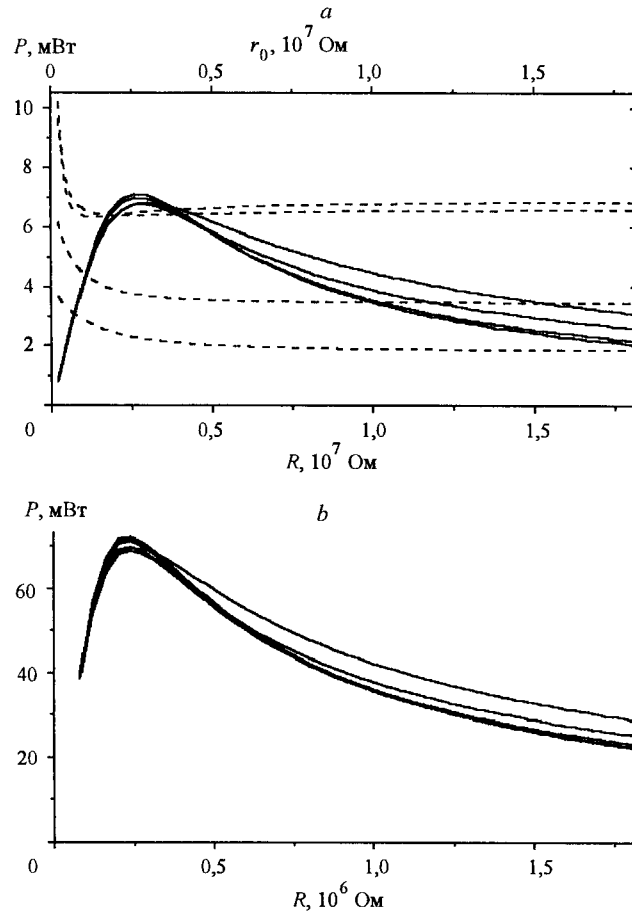


Рис. 8. Кривые зависимости мощности ячейки генератора площадью 1 см^2 : *a* – от сопротивления нагрузки (сплошные кривые): $r_0 = 10^6, 5 \cdot 10^7, 2 \cdot 10^7, 10^7 \text{ Ом}$ – сверху вниз) и от сопротивления утечки (пунктирные): $R = 2 \cdot 10^6, 4 \cdot 10^6, 10^7, 2 \cdot 10^7 \text{ Ом}$ – сверху вниз) для перекрытия одной линейки: *b* – от сопротивления нагрузки для случая перекрытия $n = 5$ линеек: $r_0 = 10^5, 2 \cdot 10^5, 4 \cdot 10^5, \text{ более } 10^6 \text{ Ом}$ – сверху вниз

венно совпадает с частотной зависимостью эффективности (см., например, рис. 5, *c*).

Оценим максимальную величину удельной энергии W_{max} , которую может вырабатывать генератор. В реальном эксперименте достижима удельная емкость C_0 порядка 1000 пФ/мм^2 . Эта величина характерна для процесса электростатического наката тонких металлических пленок на поверхность сегнетоэлектрических пленок [4]. Используя выражение (19), получаем

$$W_{\text{max}} = k_1 \frac{C_0 (\varphi(0))^2}{2} \eta/2, \quad (23)$$

где k_1 – коэффициент заполнения площади, учитывающий, что не вся поверхность подложки занята полосками решетки. Полагая $\varphi_1(0) = 40 \text{ В}$,

$k_1 = 0,5$ и $\eta = 20$, получаем $W_{\max} = 4 \text{ Дж/м}^2$. Величина выходной мощности генератора пропорциональна рабочей частоте: $P_{\max} = W_{\max} f$, например, при рабочей частоте $f = 1 \text{ кГц}$ $P_{\max} = 4 \text{ кВт/м}^2$. Эта величина более чем на порядок превышает мощность потока сильного ветра и сравнима с величиной потока энергии остаточного тепла в мощных теплогенераторах.

Отметим, что W_{\max} можно значительно увеличить за счет увеличения $\varphi_1(0)$ и η . Однако рост этих параметров приводит к пропорциональному возрастанию максимальных напряжений на конденсаторах φ_{\max} , они ограничены электрическим пробоем межэлектродного промежутка. Оценка W_{\max} сделана для $\varphi_{\max} < 280 \text{ В}$, при таких напряжениях надежность пленки сегнетоэлектрика достаточно высока для толщины пленки $d = 4-5 \text{ мкм}$. Величины W_{\max} и P_{\max} вырастут в $2n$ раз при увеличении амплитуды колебаний линейек решетки в n раз. Так, при $n = 5$ получаем $W_{\max} = 40 \text{ Дж/м}^2$ и $P_{\max} = 40 \text{ кВт/м}^2$.

Отметим, что принцип электростатической генерации энергии за счет большой модуляции величин емкостей может быть применен не только для преобразования энергии колебаний решеток, но и для традиционных устройств вращения. В этом случае решетки металлических электродов будут выполнены в виде сегментов, перекрывающихся при вращении одной из них. Преимущества таких генераторов вращения по сравнению с традиционными индуктивными генераторами состоят также в более высокой энергоемкости (меньшем весе), в большем диапазоне вариации режимов работы, более низкой стоимости и простоте управления.

Подобные устройства можно использовать для преобразования энергии различного типа маломощных источников (например, ветер или остаточное тепло, образующееся в различных технологических процессах) в электрическую энергию, поскольку для таких источников традиционные методы генерации электроэнергии малоэффективны. Вопрос о первоначальном преобразовании энергии в механические колебания малой амплитуды, очевидно, должен быть решен отдельно для каждого типа энергии на стадии создания конкретных устройств.

Заключение. Теоретический анализ работы различных модификаций электрических схем двухконденсаторных емкостных генераторов показал, что эти устройства достаточно эффективны и заслуживают дальнейшей разработки в направлении создания реальных микроэлектронных схем-преобразователей энергии, которые могут быть объединены затем в большие энергетические системы. Вопросы о величине КПД преобразования механической энергии в электрическую в конкретном способе суммирования мощностей микрогенераторов пока не затрагиваются, они должны решаться в процессе изготовления реальных устройств.

Перечислим выявленные в процессе анализа основные закономерности работы схем двухконденсаторных генераторов.

1. Для достижения максимума их выходной мощности (а также оптимума по эффективности) при заданной рабочей частоте необходима оптимизация электрической нагрузки. Максимальная энергия, вырабатываемая двухемкостным генератором за один период, в условиях оптимального частотного согласования в 2 раза больше энергии, вырабатываемой в схеме одноконденсаторного генератора.

2. Эффективность преобразования энергии и мощность генератора выше в том случае, когда утечки заряда $\sigma_i(t)$ изменяются во времени синхронно с изменениями величин $C_i(t)$ (по сравнению со случаем $r_0 = \text{const}$). Этот случай более реален – он отражает пропорциональность токов утечки площади перекрытия решеток.

3. Эффективность преобразования энергии и мощность генератора возрастают в $2n$ раз при увеличении амплитуды колебаний решетки и перекрытия n линеек решетки, поскольку в этом случае эффективная частота генератора увеличивается в $2n$ раз по сравнению с режимом перекрытия одной линейки.

Того же эффекта можно достичь и за счет соответствующего уменьшения ширины полосок решетки и, следовательно, ее периода, что во многих случаях технологически достижимо. Необходимо отметить, что такой способ увеличения мощности генератора обладает явным технологическим преимуществом по сравнению с другими способами, поскольку не всегда возможно увеличивать частоту колебаний решетки либо удельную емкость элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тэнэсеску Ф., Крамарюк Р. Электростатика в технике. М.: Энергия, 1980.
2. Pat. 2522106 USA. Electrostatic Machine /N. Felici. Publ. 1950.
3. Pat. 4127804 USA. Electrostatic Energy Conversion System /O. P. Breaux. Publ. 1978.
4. Dyatlov V. L., Kostsov E. G., Baginsky I. L. High-effective electromechanical energy convention on the basis of thin ferroelectric films // Ferroelectrics. 2000. 241. P. 99.
5. Дятлов В. Л., Косцов Э. Г. Высокоэффективные электростатические микродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Автометрия. 1999. № 3. С. 3.

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
E-mail: kostsov@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
8 мая 2001 г.*