

## ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.77.002.5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДВУХКОНДЕНСАТОРНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

И. Л. Багинский, В. Ф. Камышлов, Э. Г. Косцов

*Учреждение Российской академии наук  
Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: baginsky@iae.nsk.su*

Проведён анализ особенностей функционирования двухконденсаторного генератора, основанного на перетекании заряда, накопленного в конденсаторах, через сопротивление нагрузки между двумя конденсаторами, ёмкость которых модулирована в противофазе путём латерального или планарного сдвига пластин электродов при приложении механической силы к подвижным электродам. Получены численные решения для всех режимов работы генератора и установлен их универсальный характер. Найдены аналитические оценки максимальной мощности генератора в зависимости от глубины модуляции ёмкости. Экспериментальные исследования двухконденсаторного генератора вращения показали соответствие его характеристик проведённому анализу и применимость последнего для описания всех особенностей функционирования конкретных генераторов.

*Ключевые слова:* электростатика, двухконденсаторный генератор энергии, воздушный зазор, латеральный сдвиг, вибрации, заряд.

**Введение.** Электростатические генераторы известны достаточно давно. Принцип их действия основан на совершении механическими силами работы по переносу электрического заряда против электростатических сил притяжения разноимённых зарядов [1]. В зависимости от способа создания и перемещения этого заряда генераторы можно разделить на два класса. В первом из них перемещение заряда, созданного каким-либо внешним воздействием, например с помощью электрической дуги либо трением, осуществляется транспортёром: лентой (генераторы Ван-де-Графа) [1] или диском (фрикционные машины). Во втором перемещается непосредственно заряженная пластина конденсатора в зависимости от наличия или отсутствия встроенного заряда в этом конденсаторе. Такие устройства называются либо электретным генератором [2], либо машиной Теплера [1].

Эквивалентная схема машины Теплера приведена на рис. 1, а. Конденсатор  $C(t)$  первоначально заряжен до потенциала  $V_0$ . Заряд конденсатора  $Q_0 = C_{\max}V_0$ , где  $C_{\max}$  — начальное (максимальное) значение ёмкости конденсатора, ключ К установлен в положение 2. При уменьшении ёмкости конденсатора за счёт механических сил, увеличивающих межэлектродное расстояние, и совершении таким образом работы против сил электрического поля энергия электростатического поля возрастёт с  $W_{\min} = C_{\max}V_0^2/2$  до  $W_{\max} = C_{\min}V_{\max}^2/2$  (где  $V_{\max}$  — максимальное напряжение на конденсаторе), величина заряда при этом не изменяется:  $Q_0 = C_{\max}V_0 = C_{\min}V_{\max}$  ( $C_{\min}$  — минимальное значение ёмкости конденсатора) или

$$V_{\max} = V_0(C_{\max}/C_{\min}), \quad (1)$$

т. е.

$$W_{\max} = (C_{\max}/C_{\min})W_{\min} = Q_0^2/(2C_{\min}). \quad (2)$$

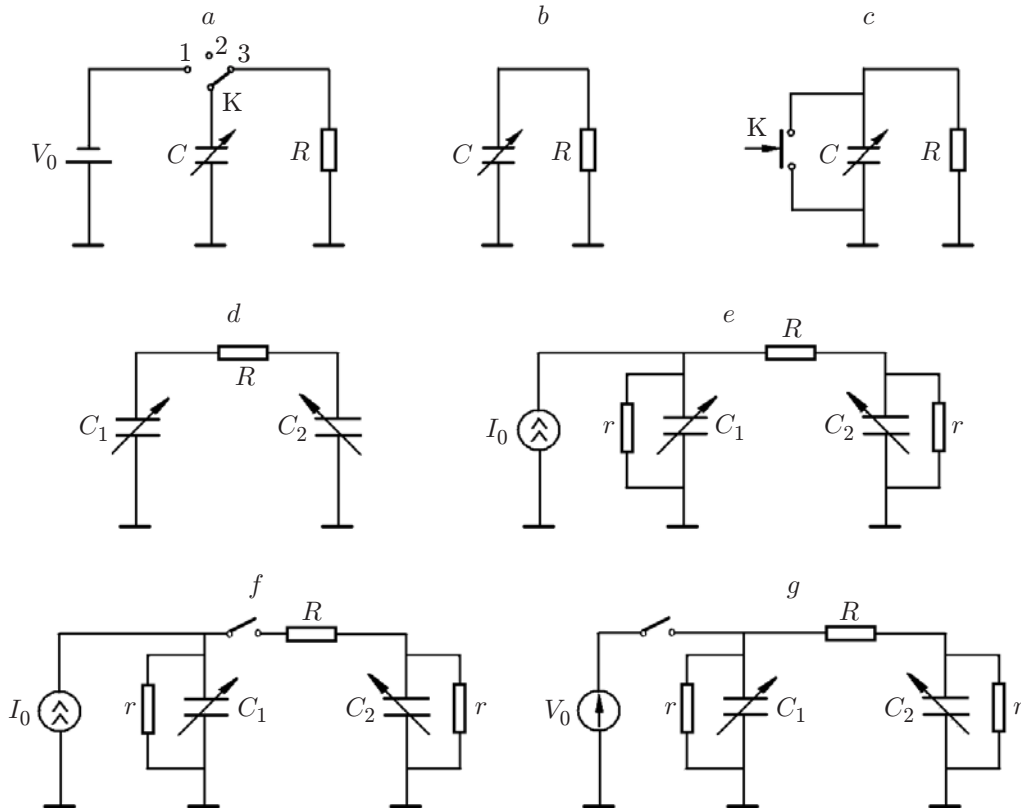


Рис. 1. Различные схемы реализации ёмкостных электростатических генераторов: *a* — машина Теплера, *b* — электретный токовый генератор, *c* — электретный генератор напряжения, *d* — идеальный двухконденсаторный генератор, *e* — двухконденсаторный генератор с компенсацией потерь за счёт источника тока, *f* — модификация схемы *e* с ключом, *g* — двухконденсаторный генератор с компенсацией потерь за счёт источника напряжения ( $V_0$  — источник напряжения,  $I_0$  — источник тока,  $R$  — сопротивление нагрузки,  $r$  — сопротивление утечек)

Полученная электрическая энергия передаётся в нагрузку  $R$  переключением  $K$  в положение 3. Далее пластины конденсатора возвращаются в исходное положение, заряжаются от источника напряжения (положение 1 ключа  $K$ ) и процесс преобразования энергии повторятся. Мощность, развиваемая таким генератором,

$$P = W_{\max} f, \quad (2a)$$

где  $f$  — частота повторения циклов преобразования.

Определим эффективность преобразования энергии  $E$  как отношение энергии, вырабатываемой генератором за период преобразования, к потерям энергии за счёт токов утечки в конденсаторах за то же время. В случае машины Теплера в каждом цикле заряд конденсатора расходуется полностью и потери энергии составляют  $W_{\min}$ , поскольку в начале следующего цикла необходимо затратить энергию  $W_{\min}$  от источника напряжения  $V_0$  для поддержания заряда на конденсаторе  $Q_0$ , тогда

$$E = \frac{W_{\max}}{W_{\min}} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}. \quad (3)$$

Такой ёмкостный генератор имеет следующие недостатки:

1. Так как величина  $C(t)$  мала, то для увеличения энергоёмкости генератора требуется максимально повышать рабочее напряжение  $V_0$ , что приводит к росту  $V_{\max}$  (1), (2) вплоть до напряжения, близкого к напряжению пробоя воздушного зазора.

2. Необходимо использовать ключи  $K$  как для съёма электрической энергии на нагрузку  $R$ , так и для подзарядки ёмкости  $C(t)$  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 этим схема, приведённая на рис. 1, *a*, нашла ограниченное применение — только для генерации высоких напряжений (до нескольких сотен киловольт) при решении специальных технических задач.

В электретных генераторах [2–7] (рис. 1, *b*) компенсация потерь заряда осуществляется за счёт встроенного заряда, что исключает необходимость применения ключей для подзарядки. Однако в данном режиме генератор работает неэффективно, так как не происходит усиления первоначально индуцированного на конденсаторе напряжения  $V_P$ , поскольку при обратном движении пластин конденсатора (в сторону увеличения ёмкости) заряд уменьшается, что приводит к колебаниям напряжения в области от  $-V_P$  до  $V_P$ , так называемый «токовый» режим. В [2] показано, что в таком генераторе усиление напряжения в  $C_{\max}/C_{\min}$  раз и выходной мощности достигается использованием ключа, который на короткое время соединяет электроды конденсатора и восстанавливает исходное напряжение, индуцированное полем электрета (рис. 1, *c*). Недостаток этой схемы — необходимость использования ключа на каждом такте преобразования энергии, синхронизованного с фазой механических колебаний.

Практически более полезный вариант применения ёмкостного метода электромеханического преобразования описан в [8–10], его схема приведена на рис. 1, *d*. Механическая сила преобразуется в электрическую энергию за счёт изменения во времени ёмкости каждого из двух конденсаторов  $C_i(t)$ ,  $i = 1, 2$ . Они первоначально заряжены до потенциала  $V_0$  и так механически связаны, чтобы величины ёмкостей всегда находились в противофазе ( $C_1$  максимальна в тот момент времени, когда  $C_2$  минимальна, и наоборот). При этом исключается необходимость использования ключа  $K$ . Электрическая энергия выделяется на нагрузке  $R$  в результате прохождения через неё переменного тока  $I(t)$ . Если в генераторе есть первоначальный заряд  $Q_0 = (C_1 + C_2)V_0$ , распределённый между ёмкостями  $C_1$  и  $C_2$ , то в идеальном случае, при отсутствии утечек заряда, система будет работать неограниченно долго, периодически перекачивая часть заряда с одной ёмкости на другую и обратно.

В [8] приведено аналитическое описание работы двухконденсаторного генератора, но только в условиях, когда постоянная времени перезаряда конденсаторов  $\tau = R(1/C_1 + 1/C_2)^{-1}$  много меньше периода воздействия механической силы  $T$ . Важно отметить, что в таком генераторе из-за токов утечки заряд  $Q_0$  со временем уменьшается, и генератор перестает работать. Для компенсации потери заряда в [8] предлагалось на короткое время подключать конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  к источнику напряжения либо произвольно (через определённый промежуток времени), либо с использованием специальной следящей схемы. Однако анализ процесса подзарядки не был проведён.

В [9, 10] изучалась работа двухконденсаторного генератора с боковым (латеральным) сдвигом пластин конденсаторов. Представлен метод компенсации потерь заряда путём параллельного подключения источника тока к одному из конденсаторов генератора (рис. 1, *e*). Схема была проанализирована относительно эффективности преобразования энергии  $E$ . Численно получены и аналитические оценки эффективности для области максимальной мощности генератора. Электроды генератора состояли из совокупности параллельно соединённых металлических полосок-электродов (решёток), рассматривалось их колебательное движение с учётом перекрытия нескольких полосок за один такт. Такая схема также

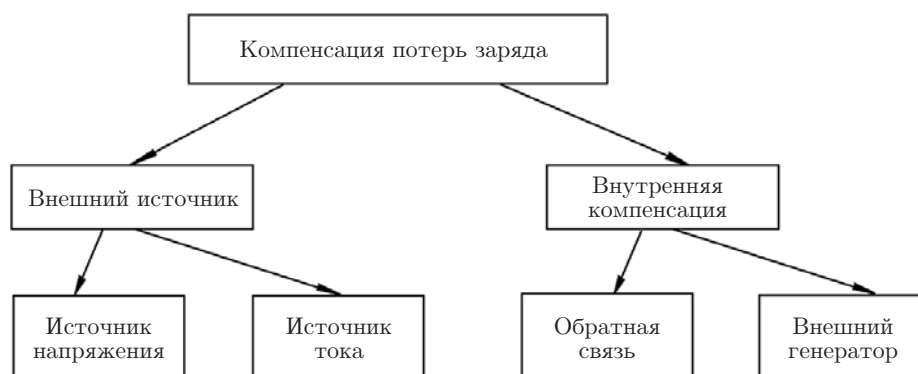


Рис. 2. Различные способы компенсации потерь заряда в двухконденсаторном электростатическом генераторе

исключает использование ключей для подзарядки конденсаторов генератора, но остаётся неясным вопрос о конкретных способах реализации источника тока: применение батарей или аккумуляторов снижает преимущества микроэлектронного и энергонезависимого исполнения микрогенераторов.

Целью предлагаемой работы является теоретический анализ различных способов реализации двухконденсаторных электростатических генераторов энергии, в которых исключается необходимость постоянного на каждом такте преобразования энергии подключения источника электрической энергии для компенсации потерь заряда, возникающих из-за токов утечки в генерирующих элементах. Кроме того, проведено экспериментальное исследование макетов указанных генераторов, генераторов вращения, демонстрирующих высокую эффективность генерации электрической энергии.

**1. Особенности построения энергонезависимого двухконденсаторного генератора.** Разные варианты реализации двухконденсаторных генераторов базируются на схеме идеального генератора, представленного на рис. 1, *d*. Они различаются только способом компенсации потерь заряда, обусловленных наличием токов утечки в конденсаторах генератора (рис. 2).

Такая компенсация возможна от внешнего источника электрической энергии. Источник тока, т. е. источник, обеспечивающий постоянный ток и обладающий достаточно высоким (в идеале — бесконечным) внутренним сопротивлением, подключается к одному из конденсаторов генератора (см. рис. 1, *e*).

При компенсации потерь от источника напряжения (внутреннее сопротивление которого мало) необходимо применять ключ, подсоединяющий источник к одному из конденсаторов на время, достаточное для его подзаряда (рис. 1, *g*).

Кроме того, компенсация потерь заряда может осуществляться и при использовании дополнительного маломощного генератора, подключённого ко входу основного генератора, потребляющего малую часть механической энергии системы, например, за счёт использования «электретного эффекта» [7].

Возможна также компенсация потерь заряда благодаря организации схемы обратной связи для передачи части энергии с выхода генератора на его вход [11]. Один из примеров такой схемы, когда часть энергии, накапливаемой на конденсаторе  $C_0$ , передаётся на конденсатор генератора  $C_1$  ключом  $K$ , приведён на рис. 3.

## 2. Анализ вариантов реализации схем двухконденсаторных генераторов.

2.1. *Компенсация потерь заряда с использованием источника тока.* Схема, реализующая данный принцип, приведена на рис. 1, *e*. Работа такого генератора описывается системой

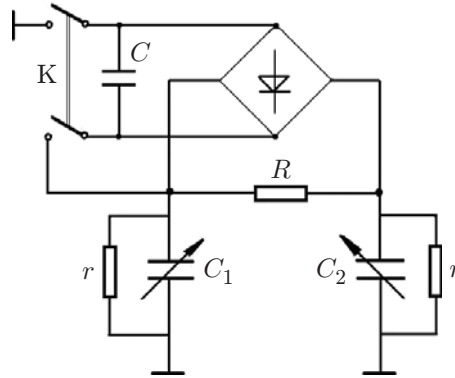


Рис. 3. Пример реализации обратной связи для компенсации утечек заряда

дифференциальных уравнений:

$$I(t) = \frac{V_2(t) - V_1(t)}{R};$$

$$I(t) = -I_0 + \frac{d(V_1(t)C_1(t))}{dt} + \sigma_1(t)V_1(t); \quad (4)$$

$$I(t) = -\frac{d(V_2(t)C_2(t))}{dt} - \sigma_2(t)V_2(t),$$

где  $V_1(t)$  и  $V_2(t)$  — падение напряжения на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  соответственно;  $\sigma_1(t)$  и  $\sigma_2(t)$  — проводимости, возникающие за счёт утечек в этих конденсаторах, в общем случае зависящие от времени.

Возможны два режима работы двухконденсаторных генераторов: с латеральным (боковым) сдвигом пластин (с изменением площади перекрытия электродов, частный случай — генератор вращения) и с вертикальными колебаниями пластин (с изменением межэлектродного зазора — режим вибраций). Для достижения максимальной эффективности генерации энергии в обоих случаях движение пластин конденсаторов осуществляется в противофазе.

2.1.1. Генератор с латеральным сдвигом пластин конденсаторов. При противофазном изменении ёмкостей и при латеральном сдвиге пластин конденсаторов их суммарная ёмкость постоянна:

$$C_1(t) + C_2(t) = C_0. \quad (5)$$

В частном случае, когда утечки заряда пропорциональны площади перекрытия электродов, т. е. при аналогичном изменении проводимостей, имеем

$$\sigma_1(t) + \sigma_2(t) = \sigma_0. \quad (5a)$$

Система уравнений (4) решалась численно. В случае постоянных утечек  $\sigma_1 = \sigma_2 = 1/r$ . В безразмерном виде система уравнений (4) сформулирована в [9], её решение определяется только двумя безразмерными параметрами, характеризующими нагрузочные свойства системы ( $fRC_0$ ) и потери заряда за счёт токов утечек ( $fC_0/\sigma_0$ ). В результате решения

определялись величины напряжений  $V_1$  и  $V_2$  на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ , тока  $I(t)$ , проходящего через нагрузку  $R$ , выделяемой в нагрузке мощности  $P = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t I^2(t) R dt$ , где  $T$  — период колебаний, потенциалы на ёмкостях  $C_1$  и  $C_2$ , а также заряды этих ёмкостей  $Q_1(t)$  и  $Q_2(t)$  и суммарный заряд  $Q_\Sigma(t)$ .

Система уравнений, описывающая функционирование двухконденсаторного генератора, была проанализирована в работах [9, 10], в которых получены численные решения относительно эффективности генерации  $E$  для различных вариантов возбуждения сдвиговых колебаний решёток электродов. Однако анализ выходной мощности, производимой генератором, с получением соответствующих аналитических оценок не производился.

Оценим величину вырабатываемой таким генератором максимальной энергии за цикл преобразования и, соответственно, мощности.

Рассмотрим в качестве первого приближения случай двухконденсаторного идеально-го генератора (см. рис. 1, *d*), для которого утечки малы и подзарядка конденсаторов (например, от источника тока) не требуется. Предположим, что конденсаторы генератора в исходном состоянии заряжены до напряжения  $V_0$ . С учётом (5) получаем

$$Q_0 = C_0 V_0 = \text{const}, \quad (6)$$

где  $Q_0 = Q_\Sigma(0)$  — суммарный начальный заряд, накопленный на конденсаторах. Так как утечки заряда в данном случае отсутствуют, то заряд будет сохраняться в течение всего времени работы генератора.

При заданных выше условиях наблюдается начальный участок релаксации тока с характерной постоянной времени порядка  $RC_0$ , в течение которого за счёт перераспределения заряда на конденсаторах устанавливается динамически равновесный режим генерации. Характер поведения напряжений на конденсаторах зависит в данном случае от начальной фазы величин  $C_1(t)$  и  $C_2(t)$ . Кроме того, возможны и другие условия, например постепенное, плавное увеличение амплитуды и частоты колебаний ёмкостей, более близкие к реальной ситуации. Данный участок в предлагаемой работе подробно не анализировался, поскольку при любых начальных условиях достигается один и тот же динамически равновесный режим.

Оценим величины минимального и максимального напряжений на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  в режиме динамического равновесия и при условии максимальной генерируемой мощности. Так как суммарный заряд  $Q_\Sigma$  не меняется с течением времени, то

$$Q_\Sigma(t) = C_1(t)V_1(t) + C_2(t)V_2(t) = Q_0 = C_{\min}V_{\max} + C_{\max}V_{\min}, \quad (7)$$

где  $V_{\max}$  и  $V_{\min}$  — значения напряжений на конденсаторах при минимуме и максимуме ёмкости. Кроме того, предполагая, что в данных условиях выполняется соотношение

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \eta, \quad (1a)$$

и учитывая условие (6), имеем

$$V_{\min} = \frac{C_0 V_0}{2C_{\max}}. \quad (8)$$

Так как в соответствии с (5)

$$C_{\max} + C_{\min} = C_0, \quad (9)$$

получаем

$$\frac{V_{\min}}{V_0} = \frac{1 + 1/\eta}{2}, \quad (10)$$

а напряжение  $V_{\max}$  вычисляется по формуле (1а). Исходя из того, что в данном случае оба конденсатора участвуют в преобразовании энергии, нетрудно показать, что энергия, вырабатываемая за цикл преобразования, запишется как

$$W_2 = 2(W_{\max} - W_{\min}) = \frac{V_0^2}{4} \eta C_{\min} \left( \frac{1}{\eta} + 1 \right)^2 (\eta - 1). \quad (11)$$

Отношение этой энергии к начальной

$$W_0 = (C_0 V_0^2)/2, \quad (12)$$

накопленной на конденсаторах, следующее:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{W_2}{W_0} = \frac{\eta^2 - 1}{2\eta}, \quad (13)$$

где  $P$  — мощность двухконденсаторного генератора;  $P_0 = W_0 f$ .

Аналогичное выражение для энергии, вырабатываемой за цикл преобразования одноконденсаторным генератором (см. рис. 1), имеет вид

$$W_1 = W_{\max} - W_{\min} = \frac{V_0^2}{2} \eta C_{\min} (\eta - 1). \quad (14)$$

При одинаковом начальном заряде конденсаторов до напряжения  $V_0$  отношение указанных энергий, а следовательно, и мощностей генераторов составляет

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\eta} + 1 \right)^2. \quad (15)$$

При  $\eta \gg 1$

$$W_2/W_1 \approx 1/2. \quad (15a)$$

Таким образом, при одинаковом начальном напряжении одноконденсаторный генератор развивает мощность, которая в 2 раза превышает максимальную мощность двухконденсаторного генератора. Но в этом режиме заряд полностью теряется на каждом цикле преобразования энергии и его необходимо возобновлять, что во многих случаях затрудняет применение такого способа преобразования энергии. Мощность же двухконденсаторного генератора (при одинаковых начальных напряжениях) меньше из-за неоптимального, неполного заряда конденсаторов  $C_i$  при указанных начальных условиях.

Путём численного решения системы уравнений (4) с условием (5) при отсутствии утечек заряда находились величины напряжений на конденсаторах  $V_i$ , после чего определялся ток в нагрузке, заряд на конденсаторах и находилась мощность генератора  $P$ . Зависимость  $P/P_0$  от  $fRC_0$ , где  $P_0 = fW_0$ , приведена на рис. 4.

Зависимость максимальной мощности  $P_{\max}/P_0$  от глубины модуляции  $\eta$  (рис. 5, кривая 1) для идеального генератора практически линейна в области  $\eta \gg 1$  и хорошо описывается формулой (13) и кривой 3 на рис. 5. При малых значениях  $\eta$ ,  $1 < \eta < 3$ , отклонения

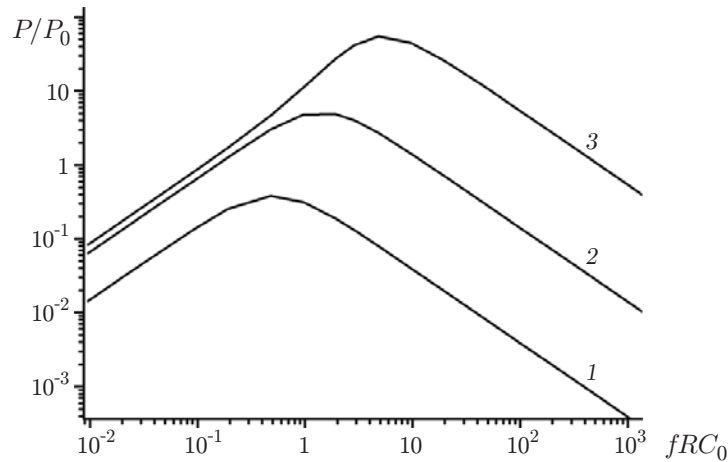


Рис. 4. Характеристические кривые генерируемой мощности для случая идеального генератора: кривая 1 —  $\eta = 2$ , 2 — 10, 3 — 100

от выражения (13) существенны, поскольку в этом случае  $V_{\max}/V_{\min} < \eta$  и соотношение (1) не выполняется.

Отметим, что в использованных нами нормировках кривые на рис. 4 зависят только от величины глубины модуляции ёмкости, а на рис. 5 вообще не зависят от абсолютных параметров модели, т. е. имеют универсальный характер, описывающий все возможные решения системы уравнений (4) для случая идеального генератора. С этой точки зрения указанные кривые были названы нами «характеристическими».

Пример численного решения уравнений (4), иллюстрирующих работу двухконденсаторного генератора при отсутствии потерь заряда и при совокупности параметров, соответствующих пику его мощности, приведён на рис. 6.

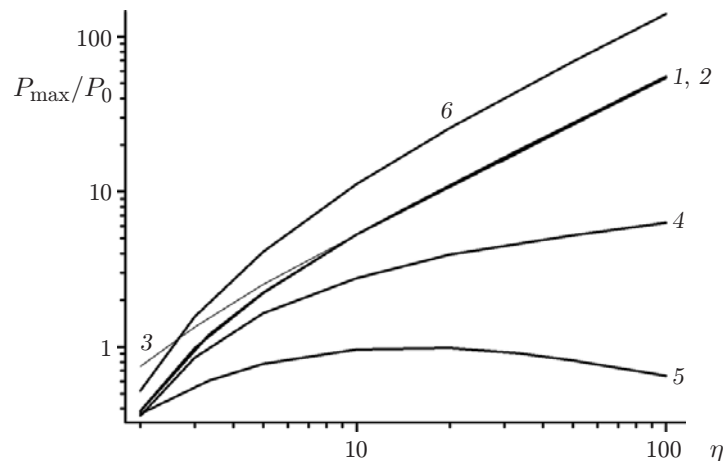


Рис. 5. Характеристические кривые зависимости величины максимальной генерируемой мощности  $P_{\max}/P_0$  от глубины модуляции ёмкости для режимов: идеального генератора с латеральным смещением пластин (кривая 1), латерального сдвига пластин при модуляции утечек заряда синхронно модуляции ёмкости (2), латерального сдвига пластин при постоянных утечках (4), вертикальных противофазных колебаний пластин (виброгенератор) (5), латерального смещения пластин при подзарядке конденсатора  $C_1$  от источника напряжения в условиях  $C_1(0) = C_{\max}$  (6), аналитическая оценка для идеального генератора (13) (3)



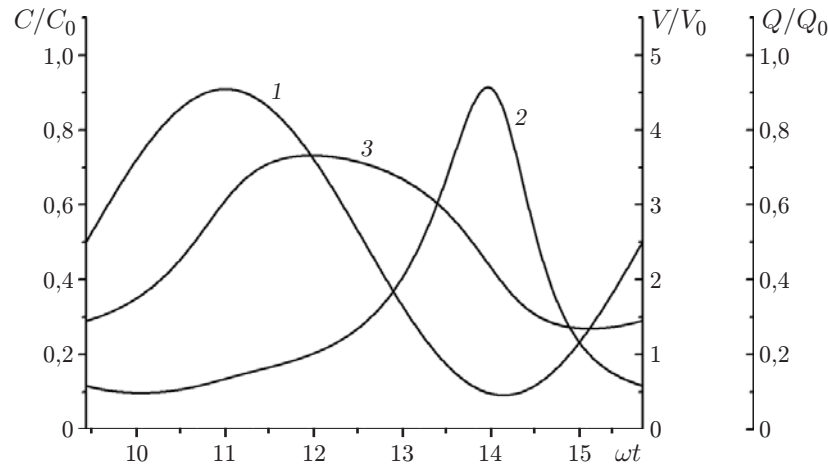


Рис. 6. Поведение во времени ёмкости (кривая 1), напряжения (2), заряда (3) для одного из конденсаторов генератора в области оптимума мощности ( $\eta = 10$ ,  $fRC_0 = 1,9$ )

Синусоидальные колебания в противофазе ёмкостей  $C_1$  и  $C_2$  приводят к ангармоническим колебаниям величин заряда  $Q_i$  и потенциала  $V_i$ , а также тока  $I$  в нагрузке  $R$ . Чем больше амплитуда колебаний величин  $V_i$ ,  $Q_i$  и тока, тем выше мощность генератора либо её нормированная величина  $P/P_0$ , определяемая как  $W/W_0$  — отношение величины энергии, вырабатываемой генератором за период колебаний, к величине начальной энергии, накопленной на конденсаторах:

$$P/P_0 = W/W_0, \quad (16)$$

$$W = \int_{t_1}^{t_1+T} I^2(t)Rdt, \quad (17)$$

$P = Wf$  — мощность.

Отметим, что результаты численного анализа подтверждают сформулированное выше приближение (1а), следствием которого является равенство зарядов  $Q_i$  при максимальном и минимальном значениях ёмкости конденсатора, т. е.  $C_{\min}V_{\max} = C_{\max}V_{\min}$  (см. рис. 6, кривая 3).

При достаточно больших частотах ( $f \gg 1/RC_0$ ) конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  не успевают обмениваться зарядом за цикл преобразования энергии, что приводит к уменьшению глубины модуляции заряда на каждом из конденсаторов в динамически равновесном режиме (рис. 7, кривая 4). Следовательно, вырабатываемая в цикле преобразования энергии  $W$  будет меньше предельной величины  $W_2$ . С другой стороны, при малых частотах ( $f \ll 1/RC_0$ ) преобразование энергии также неэффективно, поскольку в этих условиях переход заряда на второй конденсатор происходит быстрее, чем ёмкость генерирующего конденсатора достигает минимального значения. Заряд на конденсаторах «отслеживает» изменения ёмкости (кривые 1 и 2 на рис. 7 практически совпадают). Таким образом, для двухконденсаторных генераторов характерен оптимум приведённой мощности  $P/P_0$  в области частот  $f \sim 1/RC_0$ , что соответствует результатам численного анализа (см. рис. 4). В условиях оптимума генерации при уменьшении ёмкости генерирующего конденсатора (на котором в данном интервале времени осуществляется преобразование энергии) значительная часть заряда перетекает на другой конденсатор, восстанавливая на нём состояние, соответствующее началу генерации на этом конденсаторе (см. рис. 7, кривая 3).

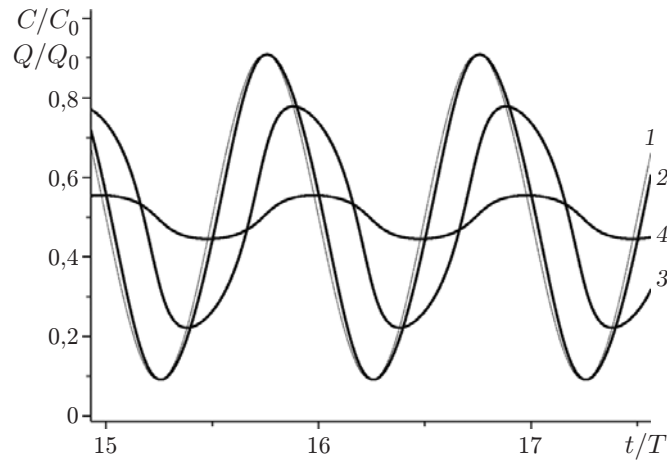


Рис. 7. Изменение во времени заряда на одном из конденсаторов генератора в режиме динамического равновесия: кривая 2 — в области малых частот модуляции ( $fRC_0 = 9,63 \cdot 10^{-2}$ ), 3 — при оптимуме генерации ( $fRC_0 = 1,45$ ), 4 — при высоких частотах ( $fRC_0 = 9,63$ ), 1 —  $C/C_0$

При увеличении глубины модуляции ёмкости  $\eta$  возрастает мощность генератора  $P/P_0$ , а её максимум сдвигается в сторону более высоких частот.

Рассмотрим работу двухконденсаторного генератора с учётом потерь заряда за счёт токов утечки и его компенсации из внешнего источника тока. На эквивалентной схеме рис. 1,  $e$  потери заряда учитываются как проводимости  $\sigma_i(t)$ , подключённые параллельно конденсаторам  $C_i(t)$ . Для компенсации этих потерь используется источник постоянного тока  $I_0$ . Работа такого генератора описывается системой дифференциальных уравнений (4) с начальными условиями, соответствующими стационарному состоянию системы при прохождении в цепи тока  $I_0$ .

В результате численного решения определялись безразмерные величины потенциалов  $y(x)$  и  $z(x)$  на ёмкостях  $C_i$ , затем вычислялись величины, характеризующие работу генератора.

Проанализируем первоначально случай модуляции ёмкости и проводимости по одинаковому синусоидальному закону, т. е. когда выполняются условия

$$\frac{\sigma_i(t)}{\sigma_0} = \frac{C_i(t)}{C_0}, \quad (18)$$

а также (5) и (5а).

Подобная модуляция проводимостей характерна для реальной ситуации, когда утечки пропорциональны площади перекрытия пластин конденсатора. Вычитая из левой и правой частей второго уравнения системы (4) соответствующие компоненты третьего уравнения этой же системы с учётом (18) и выражения для суммарного заряда  $Q_\Sigma$ , имеем

$$\frac{dQ_\Sigma(t)}{dt} = -Q_\Sigma(t) \frac{\sigma_0}{C_0} + I_0. \quad (19)$$

Исходя из начального условия, описывающего заряд конденсаторов от источника тока  $I_0$  в стационарном состоянии:

$$Q_\Sigma(0) = \frac{I_0 C_0}{\sigma_0}, \quad (20)$$

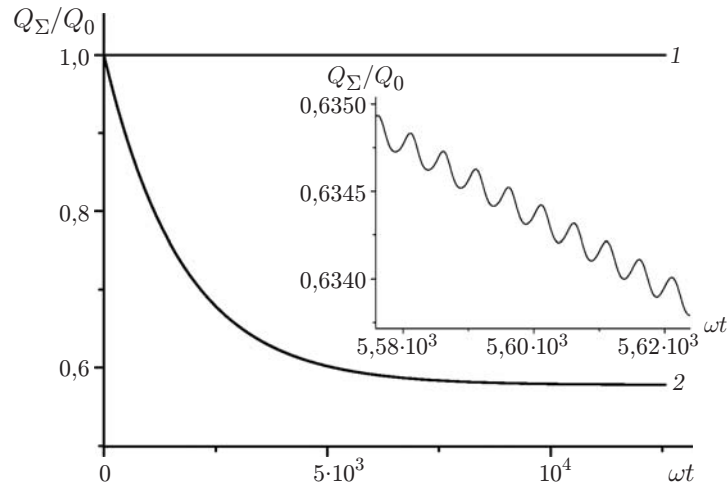


Рис. 8. Поведение во времени суммарного заряда ёмкостей генератора при  $fRC_0 = 9,6$ ,  $\eta = 10$ : кривая 1 — модуляция утечек синхронно модуляции ёмкости (18); 2 — постоянные утечки ( $fRC_0 = 9,6 \cdot 10^2$ ). На вставке дан увеличенный фрагмент кривой 2

нетрудно показать, что для уравнения (19) возможно единственное решение (рис. 8, кривая 1)

$$Q_{\Sigma}(t) = Q_{\Sigma}(0) = \frac{I_0 C_0}{\sigma_0}. \quad (21)$$

Тогда все оценки максимальной энергии, вырабатываемой идеальным генератором за период её преобразования, а также оценки мощности будут справедливы при некотором эффективном значении начального напряжения

$$V_0^* = I_0 / \sigma_0. \quad (22)$$

В качестве примера на рис. 5 показана характеристическая кривая 2 зависимости  $P_{\max}/P_0$  от  $\eta$ , полностью совпадающая с кривой 1 для идеального генератора. Отметим, что в общем случае значение  $V_0^*$  не равно реальной величине начального напряжения  $V(0)$ , поскольку оно зависит от начальной фазы колебаний, т. е. от конкретных значений проводимостей  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в момент времени  $t = 0$ .

Второй случай, также выполняющийся на практике, — это постоянные утечки:

$$\sigma_1(t) = \sigma_2(t) = \sigma_0/2. \quad (23)$$

Существенным отличием полученного решения от случаев пренебрежимо малых токов утечек или пропорциональности проводимости  $\sigma_i$  площади перекрытия электродов, рассмотренных выше, является первоначальный спад суммарного заряда  $Q_{\Sigma}$  во времени (см. рис. 8, кривая 2) и его колебания малой амплитуды (см. вставку на рис. 8) в соответствии с периодом изменения ёмкостей  $C_i$ :  $T = 2\pi/\omega$ . Данный эффект объясняется тем, что в каждом периоде из-за роста потенциалов на ёмкостях  $V_i$  возрастают и токи утечки, что приводит к некоторому уменьшению зарядов  $Q_i$  (далее в моменты перехода потенциалов  $V_i$  через минимумы заряды  $Q_i$  вновь подрастают за счёт подзарядки от источника  $I_0$ ). При этом в начальной фазе процесса токи утечек заряда превышают ток источника  $I_0$ , вследствие чего конденсаторы разряжаются. Для такого режима величина установившегося стационарного значения заряда  $Q_{\Sigma}(\infty)$  не поддаётся аналитической оценке, поэтому

спад заряда во времени анализировался численно: он растёт с возрастанием как величины  $\eta$ , так и абсолютного значения ёмкости. Однако в большинстве случаев, реальных для практического применения, спад суммарного заряда  $k = Q_{\Sigma}(0)/Q_{\Sigma}(\infty)$  не превышает 2 раз.

Полагая, что суммарный заряд уменьшился в  $k$  раз, и учитывая выражение для начального заряда (20), нетрудно получить выражения для стационарных значений минимального напряжения на конденсаторах  $V_{\min}(\infty)$  и вырабатываемой генератором энергии  $W(\infty)$ :

$$V_{\min}(\infty) = \frac{I_0}{k\sigma_0} \frac{1 + 1/\eta}{2}, \quad (10a)$$

$$W(\infty) = \frac{\eta^2 C_{\min}}{4} \left( \frac{I_0}{k\sigma_0} \right)^2 \left( 1 + \frac{1}{\eta} \right)^2. \quad (11a)$$

Эти формулы полностью аналогичны выражениям для идеального генератора (10) и (11) при замене  $V_0$  величиной

$$V(\infty) = I_0/(k\sigma_0).$$

Таким образом, для двухконденсаторного генератора с постоянными утечками заряда характерно дополнительное падение генерируемого напряжения в  $k$  раз и, соответственно, мощности в  $k^2$  раз по сравнению с описанным выше случаем, когда утечки пропорциональны площади перекрытия электродов (18).

Зависимость мощности  $P/P_0$  от  $fRC_0$  качественно подобна аналогичным кривым для идеального генератора с тем отличием, что на неё дополнительно влияют токи утечек (параметр  $frC_0$ ): она растёт линейно с уменьшением утечек при постоянном токе  $I_0$ . В выбранных нами нормировках величина  $P/P_0$  практически не зависит от  $frC_0$  при условии достаточно малых утечек:  $r \ll R$  (рис. 9). Как и для идеального генератора, наблюдается рост  $P_{\max}/P_0$  с увеличением глубины модуляции ёмкости  $\eta$  с выходом на «плато» (см. рис. 5, кривая 4). При этом частотная зависимость мощности качественно аналогична соответствующей характеристике идеального генератора.

Спад суммарного заряда (см. рис. 8) и генерируемой мощности, определяемый процессом перераспределения заряда при включении генератора на старте процесса модуляции

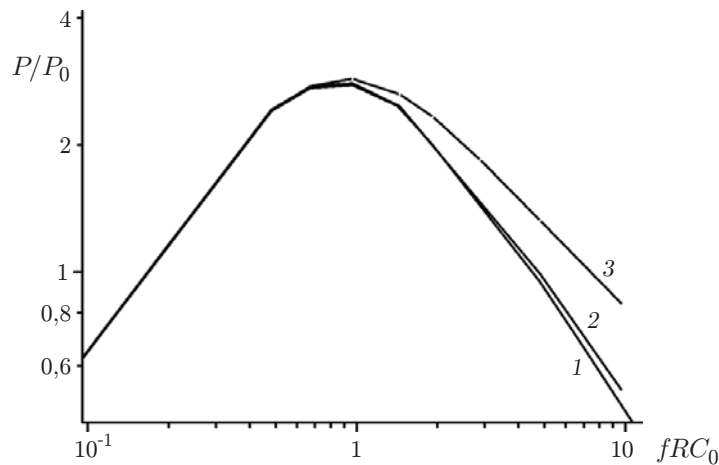


Рис. 9. Характеристические кривые для мощности генератора при различных сопротивлениях утечек  $r$ : кривая 1 —  $frC_0 = 960$ , 2 — 96, 3 — 9,6;  $\eta = 10$

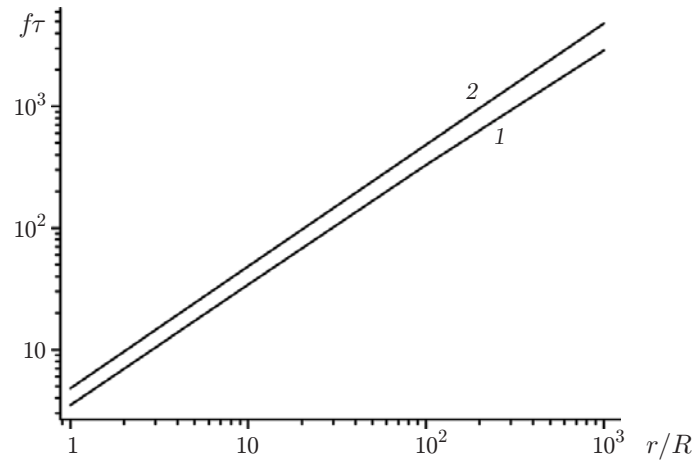


Рис. 10. Зависимость постоянной времени установления стационарного режима генерации  $\tau$  от сопротивления утечек (кривая 1),  $f r C_0/2$ ,  $f R C_0 = 9,63$  (кривая 2)

ёмкостей  $C_i$ , имеет экспоненциальный характер. Время выхода генератора на стационарный режим обратно пропорционально проводимости токов утечек (рис. 10). Так как генерация энергии эффективна только при  $r \gg R$  [9], а постоянная времени спада мощности  $\tau$  имеет порядок величины  $r C_0/2$ , то это время может быть достаточно большим ( $\geq 10^2 - 10^3$  с). Отметим, что в реальных условиях работы микрогенератора (например, в режиме съёма энергии микровибраций механических конструкций), когда частоты модуляции меняются за более короткое время, чем  $\tau$ , квазистационарный режим не достигается, следовательно, максимум генерируемой мощности находится между кривыми 1 и 4 на рис. 5.

2.1.2. *Виброгенератор.* Если конструкция двухконденсаторного генератора такова, что имеет место противофазная модуляция величин межэлектродных зазоров, но при этом площадь перекрытия электродов остаётся постоянной (режим вибраций), то условие постоянства во времени суммарной ёмкости конденсаторов не выполняется. В этом случае величины зазоров модулированы по синусоидальному закону, а ёмкости каждого из кон-

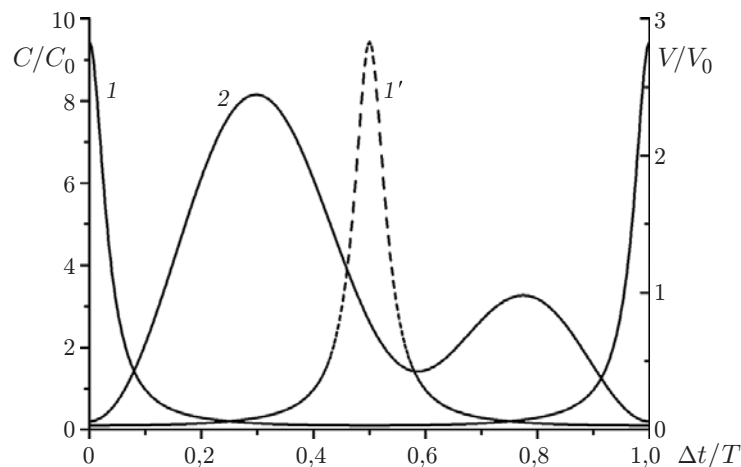


Рис. 11. Поведение во времени ёмкостей первого (кривая 1) и второго ( $1'$ ) конденсаторов и напряжения (2) для первого конденсатора генератора в области оптимума мощности. Режим вертикальных противофазных колебаний,  $\eta = 10$ ,  $f R C_0 = 0,854$

денсаторов обратно пропорциональны величинам зазоров (рис. 11, кривые 1 и 1', величина  $C'_0$  имеет смысл ёмкости, усреднённой за период колебаний). Поэтому ёмкость каждого из конденсаторов близка к минимальной величине в течение большей части периода колебаний  $T$ . Причём чем выше глубина модуляции ёмкости  $\eta$ , тем сильнее выражен этот эффект: при раздвижении пластин одного из конденсаторов (кривая 1, движение в сторону уменьшения  $C_1(t)$ ) и при соответствующем росте напряжения на нём (кривая 2) заряд с него перетекает на второй конденсатор, ёмкость которого  $C_2(t)$  остаётся ещё малой (кривая 1'). Таким образом, в отличие от случая латерального сдвига пластин процесс перетекания заряда не согласован с движением пластин второго конденсатора: максимум  $V_1(t)$  проявляется раньше, чем максимум  $C_2(t)$ , т. е. заряд с первого конденсатора перетекает на второй в основном в период времени, когда его ёмкость близка к минимальному значению.

Отсутствие в виброгенераторе «синхронизации» в обмене зарядами между конденсаторами приводит к снижению мощности генератора (см. рис. 5, кривая 5,  $P_0$  определяется в соответствии с (12), (16), но  $C_0$  заменено величиной  $C'_0$ ), что проявляется в уменьшении отношения  $V_{\max}/V_0$  (см. рис. 11, кривая 2). Несинхронность приводит к появлению второго максимума (меньшей амплитуды) на кривой  $V_1(t)$  после прохождения пика на кривой  $C_2(t)$ , что также снижает эффективность генерации в этом режиме.

Для поддержания синхронизации в передаче заряда в момент максимального значения одной из ёмкостей конденсаторов можно использовать управляемый ключ, подсоединяющий в цепь нагрузку  $R$  на время  $t_{\text{он}} \ll T/4$ , когда значения  $C_1(t)$  и  $C_2(t)$  максимальны (см. рис. 1,  $f$ ), при этом должно выполняться условие  $RC_{\max} \ll t_{\text{он}}$  [8]. Однако при таком режиме работы необходимо использовать ключ на каждом такте генерации энергии и при точной синхронизации момента его срабатывания.

В виброгенераторе необходимо особо выделить режим идеального генератора (рис. 12), для которого в отличие от режима латерального смещения электродов наблюдается существенная зависимость генерируемой энергии от начального состояния величин ёмкостей  $C_i$ . В частности, если в начале процесса колебаний имеет место максимальное сближение пластин одного из конденсаторов, то максимум вырабатываемой за цикл энергии, нормируемый на её начальное значение (кривая 1), превышает величину, характерную для генератора, основанного на сдвиге пластин (кривая 2). В этом случае достигается предельно допустимая для двухконденсаторных генераторов мощность, поскольку в виброгенераторе возможно создание предельно малых зазоров между электродами и, следовательно,

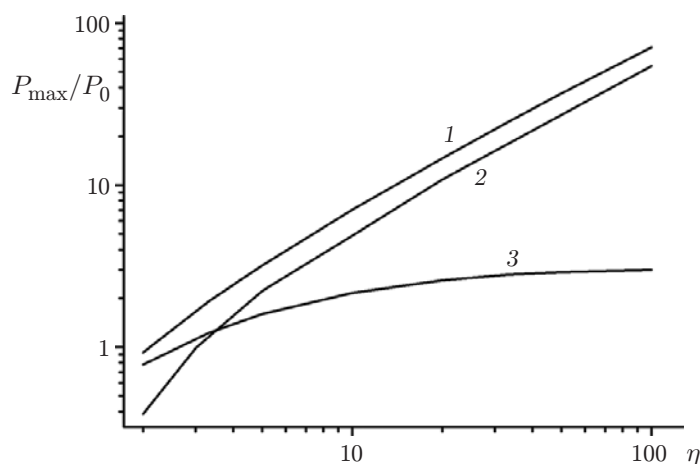


Рис. 12. Зависимость максимальной генерируемой мощности от глубины модуляции ёмкости для идеального генератора в режимах: вибраций пластин,  $C_1(0) = C_{\max}$  (кривая 1); латерального сдвига пластин (2); вибраций пластин при  $C_1(0) = C_2(0)$  (3)

предельно больших величин максимальной ёмкости. Однако, когда начало процесса колебаний не соответствует максимальной ёмкости одного из конденсаторов, эффективность генерации энергии резко уменьшается (кривая 3). Такое поведение генерируемой мощности объясняется величиной захваченного в начале процесса заряда: если в начале процесса одна из ёмкостей максимальна (кривая 1), то заряд также максимален. При других начальных условиях в первую очередь захватывается меньший заряд (промежуточные кривые между 1 и 3).

2.2. *Компенсация потерь заряда с использованием источника напряжения* осуществляется подключением источника на короткое время только к одному из конденсаторов (см. рис. 1, *g*), компенсация потерь заряда на втором конденсаторе происходит за счёт тока через сопротивление нагрузки  $R$  в процессе генерации при модуляции ёмкостей. В [8] рассмотрен другой способ — одновременная зарядка обоих конденсаторов, но в этом случае необходима синхронизация двух ключей с высокой точностью, так как даже небольшая задержка во времени коммутации ключей приводит к значительному снижению эффективности генерации.

Для синхронизации процесса подзарядки требуется выполнение двух условий: во-первых, напряжение на нём должно быть меньше напряжения источника ( $V_1(t) < V_0$ ); во-вторых, процесс подзарядки необходимо прекратить в момент максимального сближения пластин этого конденсатора (при  $C_1(t) = C_{\max}$ ).

Пример оптимальной синхронизации ключа, подсоединяющего источник  $V_0$  согласованно с периодами модуляции ёмкостей для случая латерального противофазного смещения подвижных электродов конденсаторов, приведён на рис. 13. Причём для данного примера время прихода импульса подзарядки выбрано таким, что уменьшения суммарного заряда (за счёт токов утечек) практически не происходит, начальный же спад амплитуды  $V_1$  обусловлен переходным процессом установления динамически равновесного режима генерации, который обсуждался в разд. 2.1.1. В начальном состоянии величина ёмкости  $C_1$  максимальна и оба конденсатора заряжены до напряжения  $V_0$ . Импульс заряда длительностью  $t_p \ll T/2$  начинается при  $C_1 < C_{\max}$  и заканчивается при  $C_1(t) = C_{\max}$ , и подзарядка приводит к восстановлению амплитуды колебаний напряжений на конденсаторах  $C_i$  до величин, соответствующих начальному состоянию системы. Отметим, что при сдвиге импульса подзарядки даже на относительно малую долю периода колебаний в сторону больших значений времени амплитуда напряжения на конденсаторах не восстанавливается до

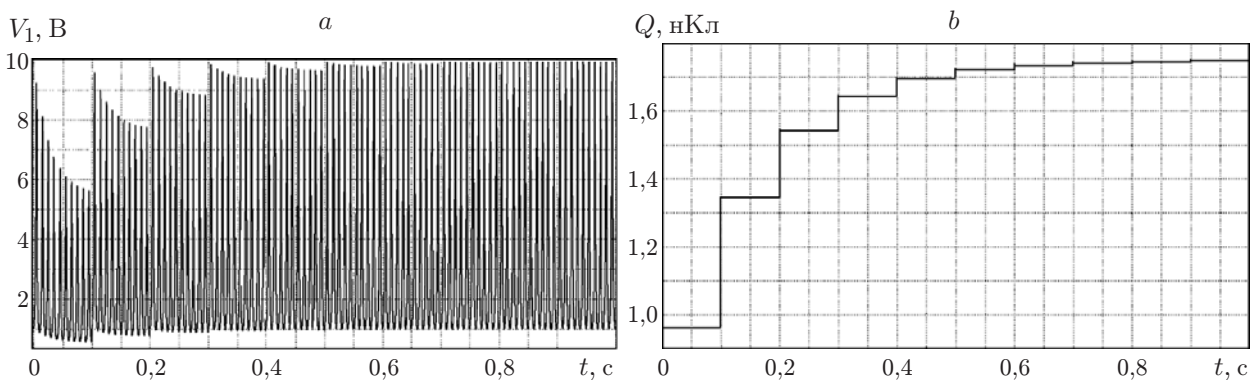


Рис. 13. Пример решения задачи компенсации потерь заряда путём подзарядки конденсатора от источника напряжения. Режим латерального сдвига пластин конденсаторов: *a* — напряжение на первом конденсаторе, *b* — суммарный заряд. Длительность импульса зарядки 10 мкс, амплитуда 1 В, период подачи 100 мс, число тактов в течение периода  $N = 10$ , частота модуляции ёмкостей 100 Гц,  $C_{\min} = 87,6$  пФ,  $\eta = 10$ ,  $R = 2 \cdot 10^8$  Ом,  $r = 10^{12}$  Ом

первоначального значения, так как значение ёмкости по окончании импульса подзарядки меньше  $C_{\max}$  и приводит к уменьшению амплитуды модуляции напряжений. За несколько циклов подзарядки при оптимальных сопротивлениях нагрузки достигается максимально возможная амплитуда колебаний напряжений на обоих конденсаторах, увеличивающая стационарные значения минимального и максимального напряжений в 2 раза: до  $V_{\min} = V_0$  и  $V_{\max} = \eta V_0$  (рис. 13, *a*). Следовательно, накапливаемый на ёмкостях генератора суммарный заряд возрастает от начального значения, равного  $C_{\max}V_0$ , до максимального значения  $2C_{\max}V_0$  (рис. 13, *b*). При этом передаваемая в нагрузку максимальная энергия превышает энергию одноконденсаторного генератора (2) в 2 раза, она в пределе (при  $\eta \gg 1$ ) стремится к значению  $C_{\max}V_0^2\eta$  (см. рис. 5, кривая *b*).

Таким образом, использование ключа, осуществляющего синхронную подзарядку конденсатора  $C_1$ , наряду с компенсацией потерь заряда повышает его до предельной величины  $2C_{\max}V_0$ , что влечёт за собой увеличение вырабатываемой энергии до значений, превышающих энергию идеального генератора в 4 раза.

Отметим, что аналогичные закономерности проявляются и для вибрационного двухконденсаторного генератора, приводя к ещё более резкому повышению мощности генератора в этом режиме (ср. кривые 5 и 6 на рис. 5).

**3. Экспериментальные исследования.** Проведённый анализ особенностей функционирования двухконденсаторного генератора показал, что при генерации электрической энергии возможно эффективное использование однократно инжектированного в генератор заряда как рабочего тела. Этот заряд до его рассасывания через паразитные цепи успевает при перекачке с одного конденсатора на другой через заданную нагрузку многократно совершить полезную работу, значительно превосходящую энергию, затраченную на первоначальную зарядку конденсаторов генератора. Число циклов перекачки заряда определяется величиной токов утечки, в идеальном случае (при их отсутствии) с помощью одной «порции» заряда можно произвести в электрической цепи генератора при действии механических сил неограниченно большую энергию.

Для демонстрации возможности производства электрической энергии за счёт механических сил с высокой эффективностью использования инжектированного в генератор заряда были проведены экспериментальные исследования, разработаны и созданы макеты электростатических генераторов. Исследовались два варианта генераторов с латеральным раздвижением пластин конденсаторов. Первый основан на конструкции сдвиговых решёток, описанной в [9], в которых осуществляется противофазная модуляция ёмкостей двух конденсаторов при латеральных колебаниях одной из них, с зазором между подвижными плоскостями 30 мкм и шагом решётки 100 мкм. Несмотря на то что достигнута большая ёмкость конденсаторов в 7000 пФ при глубине модуляции до 2,5–3,0, выбирался макет генератора с вращением центрального электрода, поскольку в этой конструкции токи утечек были минимальными, что позволяло использовать модельные оценки, характерные для идеального генератора.

Кроме того, преимущество конструкции такого генератора перед генератором на сдвиговых решётках заключается в следующем:

- нет необходимости учитывать массу подвижного электрода, «проходить» фазу его остановки с соответствующей потерей механической энергии (в режиме вынужденных колебаний) или использовать только резонансный режим работы с фиксированной частотой колебаний подвижных элементов;
- не столь существенно влияние массы подвижного элемента (определяющим фактором в этом случае является трение на оси вращения и действие сил электростатики);
- более простое совмещение решёток генератора (достаточно точно выставить ось вращения и определить относительное размещение решёток-электродов на разных плос-



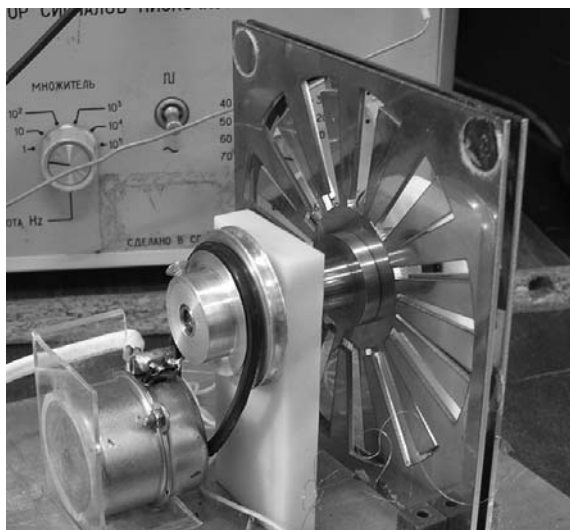


Рис. 14. Макет электростатического двухконденсаторного генератора энергии, основанного на вращении подвижного электрода

костях, что осуществляется на стадии проектирования, выполнения фотолитографии и т. п.);

— возможно достижение более высокой частоты модуляции ёмкости (вследствие относительного смещения полосок электродов) и, соответственно, более высокой мощности генерации энергии.

Для исключения возможного влияния встроенного в диэлектрик или полупроводник объёмного заряда на характеристики генератора в качестве материала как для вращающегося электрода, так и для неподвижных электродов использовался металл; каждый электрод состоял из 12 секторов. Электроды для всех секторов устройства изготавливались с помощью лазерной резки металла (рис. 14). Общая площадь электродов составляла  $25 \text{ см}^2$ .

Вращение подвижного электрода, закреплённого на оси двигателя постоянного тока, осуществлялось с частотой порядка 1–50 Гц. С учётом разбиения электродов на 12 секторов частота модуляции величин ёмкостей составляла 10–600 Гц. Все пластины были изолированы от корпуса и оси двигателя с помощью изоляторов с высоким сопротивлением (выше 100 ГОм). Зазор между пластинами составлял 100–200 мкм, ёмкость  $C_0$  порядка 250–350 пФ, глубина модуляции  $\eta = 1,8\text{--}3,5$ , эти параметры определялись путём независимых измерений.

Величины тока через нагрузку  $I(t)$  и напряжения на ней  $V(t)$  измерялись с помощью цифрового осциллографа щупом с входным сопротивлением  $10^7$  Ом и ёмкостью 12 пФ. Сопротивление нагрузки  $R$  регулировалось дискретно путём подключения дополнительных сопротивлений либо параллельно сопротивлению осциллографа ( $R < 10 \text{ МОм}$ ), либо последовательно с ним ( $R > 10 \text{ МОм}$ ). Измерялось падение напряжения на входном сопротивлении осциллографа, а величины  $V(t)$  и  $I(t)$  определялись методом пересчёта.

Осциллограмма, характеризующая генерацию энергии, представлена на рис. 15. Предварительно в момент времени  $t = 0$  в указанную структуру коротким импульсом напряжения 80 В был инжектирован заряд  $2 \cdot 10^{-8}$  Кл. Далее этот заряд при перетекании с одного конденсатора на другой в процессе вращения подвижного электрода с эффективной частотой 400 Гц через нагрузку  $R = 10 \text{ МОм}$  определял протекание тока (действующее значение) до 8 мкА. В начальный момент времени имеет место переходной процесс с постоянной времени  $RC_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  с (т. е. порядка одного периода колебаний, на рис. 15

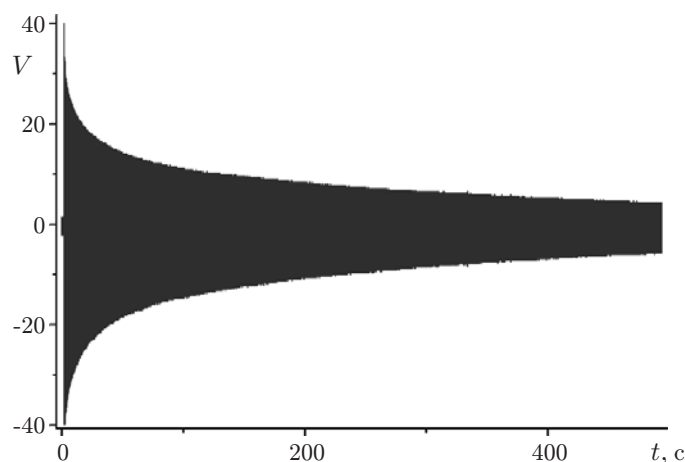


Рис. 15. Релаксация колебаний напряжения в нагрузке макета двухконденсаторного генератора ( $C_0 = 300$  пФ,  $\eta = 1,8$ ,  $R = 10$  МОм,  $f = 400$  Гц)

этот интервал времени не наблюдается), обусловленный перераспределением напряжений на конденсаторах. Данный процесс приводит к снижению минимального напряжения на конденсаторах и установлению динамически равновесного режима генерации. Поэтому для вычисления мощности идеального генератора в таком режиме на основе представленного макета использовалось измеряемое начальное значение амплитуды напряжения на нагрузке  $R$  (например, 40 В по данным рис. 15). Первоначальная зарядка образца обеспечивает генерацию энергии в течение длительного времени (до 1000 с), за которое проходит свыше  $4 \cdot 10^5$  актов преобразования энергии с использованием этого заряда и на сопротивлении нагрузки выделяется джоулева энергия, значительно превышающая энергию, затраченную на первоначальный заряд конденсаторов генератора. Исходя из постоянной времени спада заряда, нетрудно оценить сопротивление утечек, для рассматриваемой схемы оно составляло порядка  $10^{12}$  Ом. Мощность, развиваемая генератором при стартовом напряжении в 80 В, имела значение 1 мВт.

Экспериментально установлено, что максимальное напряжение, формируемое этим генератором, доходит до значений 400–500 В при других условиях компенсации потерь заряда (оно ограничивается пробоем воздушного зазора), и, следовательно, мощность достигает величины 25 мВт (удельная мощность — до 1 мВт/см<sup>2</sup>).

Исключительно низкие значения токов утечек в этих генераторах дают возможность поддержания в них постоянства заряда с использованием такого физического принципа его рекуперации от внешнего источника тока, как эффект трибоэлектричества — возникновение заряда при механическом разрыве контакта поверхностей металла и диэлектрика. Данный эффект возникал при скольжении резиновой ленты по поверхности оси привода вращения подвижного электрода. Такая конструкция позволяла осуществлять компенсацию потерь заряда в режиме источника тока, при этом время достижения в генераторе заряда, достаточного для возникновения напряжения 400 В, линейно зависело от скорости разрыва указанных поверхностей (1–20 см<sup>2</sup>/с) и составляло 1–100 с. Отметим, что в соответствии с предложенной моделью величина напряжения на конденсаторах и время установления стационарного состояния пропорциональны величине тока источника.

Для подтверждения основного следствия разработанной модели генератора — универсального характера зависимостей генерируемой мощности от величины нагрузки  $R$  — проведено исследование особенностей генерации энергии в начальной стадии процесса до проявления влияния токов утечки заряда (в этот период времени амплитуда тока близка к её значению для идеального генератора).

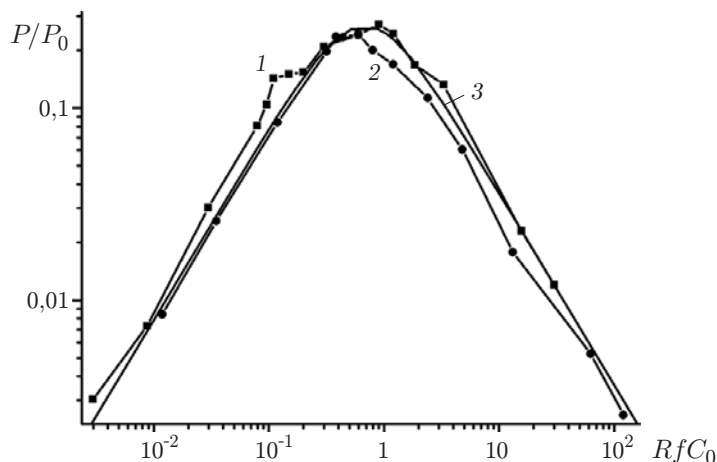


Рис. 16. Характеристические нагрузочные кривые двухконденсаторного генератора с компенсацией потерь от источника напряжения: кривая 1 —  $f = 400$  Гц, 2 —  $100$  Гц ( $C_0 = 300$  пФ,  $\eta = 1,8$ ); 3 — расчёт предложенной модели

Установлено, что для разных частот модуляции ёмкостей генератора нагрузочные кривые, построенные в координатах  $P/P_0$  от  $RfC_0$ , практически совпадают, т. е. имеют универсальный характер, а также хорошо совпадают с описанной моделью (рис. 16). Некоторое расхождение объясняется небольшим различием величин модуляции ёмкостей конденсаторов.

Мощность описанного генератора можно увеличить за счёт увеличения числа секторов, так как частота модуляции ёмкости прямо пропорциональна их числу. При указанных размерах пластин генератора допустимо увеличение числа секторов до 10 раз. Краевые эффекты, как показывают оценки, будут сказываться незначительно, и в этих условиях достижима мощность в 250 мВт, или 10 мВт/см<sup>2</sup>.

Таким образом, для получения мощностей в 10–100 Вт, достаточных для питания маломощных устройств, необходима поверхность электродов генератора порядка 10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> см<sup>2</sup>, что достижимо при использовании многослойных конструкций электродов, которые могут быть изготовлены из тонких металлизированных органических материалов с низкой плотностью, иметь небольшие габариты и вес.

**Заключение.** Проведённый в данной работе анализ особенностей функционирования двухконденсаторного генератора, основанного на перетекании заряда, накопленного в конденсаторах, через сопротивление нагрузки между двумя конденсаторами, ёмкость которых модулирована в противофазе за счёт приложения механической силы к подвижным электродам, показал его высокую эффективность.

В таком генераторе в отличие от одноконденсаторного прототипа — машины Теплера — отсутствует необходимость в рекуперации заряда на каждом цикле преобразования энергии, поэтому он обладает высокой эффективностью преобразования энергии, ограниченной только малыми токами утечки заряда, определяемыми конструктивными особенностями. В идеальном случае отсутствия каналов утечки заряда генератор может работать неограниченно долго, производя электрическую энергию при механическом воздействии.

Каналы стекания заряда практически всегда существуют, и для поддержания мощности генератора необходимо возобновлять исходную величину заряда либо путём прямой его инъекции малыми порциями от источника тока — непрерывное возобновление на каждом такте, либо от источника напряжения, подключаемого на короткое время к одному из конденсаторов в определённой фазе изменения его ёмкости, — через  $N$  тактов преобразования энергии.

Получены численные решения задачи для обоих случаев и приведены аналитические оценки для генерируемой мощности в некоторых предельных режимах. Эти решения в безразмерном виде имеют универсальный характер: когда сопротивление утечек намного превышает сопротивление нагрузки, кривые зависимости  $P/P_0$  от  $fRC_0$  имеют максимум  $P_{\max}/P_0$ , расположенный вблизи  $RC_0 = 1/f$ , который при увеличении глубины модуляции ёмкостей  $\eta$  сдвигается в сторону  $fRC_0 > 1$ . Вид этих кривых зависит только от значения  $\eta$ , при этом зависимость  $P_{\max}/P_0$  от  $\eta$  имеет общий характер для любых соотношений конкретных параметров генератора.

Одной из важнейших характеристик рассматриваемых генераторов является величина заряда, участвующего в процессе генерации энергии. Показано, что компенсация потерь заряда подключением к одному из конденсаторов источника напряжения в момент, когда его ёмкость достигает максимального значения, даёт возможность одновременно увеличить и мощность генератора до максимального значения, превышающего мощность идеального генератора в 4 раза.

Показано, что мощность двухконденсаторного виброгенератора, основанного на модуляции межэлектродного расстояния, в условиях отсутствия потерь заряда зависит от начального положения пластин конденсаторов: она максимальна, когда это расстояние минимально в одном из конденсаторов. В таком генераторе эффективность компенсации потерь от источника тока и вырабатываемая мощность уменьшаются из-за отсутствия синхронизации в передаче заряда с одного конденсатора на другой. Однако при компенсации потерь заряда от источника напряжения мощность вибрационного генератора резко возрастает и достигает значений  $P_{\max}/P_0$ , приближаясь к аналогичным величинам, характерным для случая генератора с латеральным сдвигом электродов.

Универсальный характер зависимости  $P/P_0$  от  $fRC_0$  дал возможность экспериментального исследования основных характеристик подобных генераторов даже с использованием их макетов с произвольной глубиной модуляции ёмкости конденсаторов.

Исследования макетов двухконденсаторных генераторов вращения показали, что имеет место хорошее совпадение экспериментально полученных зависимостей в нормировках  $P/P_0$  от  $fRC_0$  с предложенной моделью.

Проведённые исследования двухконденсаторных генераторов позволяют поставить задачу по созданию электростатических генераторов, способных функционировать без источника напряжения. Такие генераторы, изготовленные методами технологии микроэлектроники, предназначены для питания микросхем с длительными сроками службы, а также для создания лёгких (поскольку не используются характерные для электромагнитных генераторов массивные магнитопроводы) маломощных ветрогенераторов мощностью 10–100 Вт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тэнэеску Ф., Крамарюк Р. Электростатика в технике. М.: Энергия, 1980. 283 с.
2. Багинский И. Л., Косцов Э. Г., Соколов А. А. Электростатические микрогенераторы энергии с высокой удельной мощностью // Автометрия. 2010. **46**, № 6. С. 90–105.
3. Pat. 6750590 B2 USA. Electrostatic based power source and method thereof /M. D. Potter. Publ. 2004.
4. Naruse Y., Matsubara N., Mabuchi K. et al. Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**, N 9. 094002.
5. Grachevski S. M., Funkenbush P. D., Jia Z. et al. Design and modeling of a micro-energy harvester using embedded charge layer // Journ. Micromech. Microeng. 2006. **16**, N 2. P. 235–241.

6. Mizuno M., Chetwynd P. G. Investigation of resonance microgenerator // Journ. Micromech. Microeng. 2003. **13**, N 2. P. 209–216.
7. Okamoto H., Suzuki T., Mori K. et al. The advantages and potential of electret-based vibration-driven micro energy harvesters // Intern. Journ. Energy Res. 2009. **33**, N 13. P. 1180–1190.
8. Pat. 4127804 USA. Electrostatic energy conversion system /O. P. Breaux. Publ. 1978.
9. Багинский И. Л., Косцов Э. Г. Анализ возможности создания микроэлектронного электростатического генератора энергии // Автометрия. 2002. № 1. С. 107–123.
10. Багинский И. Л., Косцов Э. Г. Микроэлектронные высокоэнергоемкие генераторы энергии // Микросистемная техника. 2002. № 6. С. 24–28.
11. Basset P., Galayko D., Paracha A. M. et al. A bath fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester // Journ. Micromech. Microeng. 2009. **19**, N 11. 115025.

*Поступила в редакцию 19 мая 2011 г.*

---