

УДК 621.3.049.77.002.5

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО КОНДЕНСАТОРА  
ГРЕБЕНЧАТОГО ТИПА ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ****К.Е. Блум<sup>1,2</sup>, Д.И. Остертак<sup>2</sup>**  
<sup>1</sup>ООО «СиБИС»<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет

Совокупность достижений в микроэлектронике, микросистемной технике и радиотехнике в настоящее время позволяет создавать беспроводные сенсорные сети (БСС), состоящие из множества датчиков и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиоканала. Для работы узлов БСС необходимы надежные автономные источники питания, традиционные же батареи и аккумуляторы требуют периодической замены или подзарядки, что не всегда осуществимо из-за труднодоступности узлов БСС и их большого числа. Источники питания, позволяющие извлекать энергию из окружающей среды непосредственно на месте функционирования узлов БСС, являются наиболее привлекательной альтернативой батареям и аккумуляторам. Вследствие распространенности и доступности источников механических колебаний, а также совместимости процессов интегральной технологии и технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) наиболее подходящим является использование емкостных (электростатических) микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) (генераторов) механической энергии в электрическую. Принцип их действия основан на изменении заряда или напряжения на обкладках переменного конденсатора при модуляции его емкости с помощью механических колебаний. В работе исследуются зависимости отношения максимальной и минимальной емкостей гребенчатого переменного конденсатора от геометрических параметров электродов. С помощью пакета ANSYS проводится моделирование конструкции исследуемого переменного конденсатора с изменением площади перекрытия электродов с различной шириной пальцев и толщиной электродов. Анализ показывает, что полученные зависимости емкости от смещения состоят из системы максимумов и минимумов, положение которых меняется при изменении ширины пальцев и толщины электродов. Установлено, что максимум отношения между максимальной и минимальной емкостью, определенный при малой толщине электродов, с ее ростом смещается в сторону меньших ширин пальцев. Показано, что без существенного изменения размеров переменного конденсатора можно добиться увеличения выходной мощности МЭМП энергии более чем в 2 раза.

*Ключевые слова:* электрическая емкость, генератор энергии, гребенчатый переменный конденсатор, микроэлектромеханический преобразователь, краевые эффекты.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-1-20-30

**Введение**

Современные достижения в области микроэлектроники, микросистемной техники и радиотехники привели к возможности создания беспроводных сенсорных сетей (БСС), состоящих из беспроводных интеллектуальных сенсоров с очень низким энергопотреблением [1–2]. Потребность в таких БСС имеется в медицине,

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, код проекта 629, тема проекта: «Теория построения и практическая реализация широкополосных микроволновых устройств, предназначенных для использования в измерительном оборудовании цифровых систем телевидения, связи и телекоммуникаций, включая вычислительные системы».

промышленности, системах охраны и безопасности, мониторинга окружающей среды и других сферах человеческой деятельности.

Для работы БСС необходимы надежные автономные источники питания. На данный момент основными источниками питания для элементов БСС являются батареи и аккумуляторы, требующие периодической замены или подзаряда, что не всегда осуществимо из-за труднодоступности элементов БСС и их большого числа. Кроме того при функционировании БСС ее элементы находятся в состоянии ожидания (т.е. очень низкого потребления энергии), до 99 % всего времени эксплуатации. При этом возможна ситуация, когда саморазряд батареи превышает среднее потребление энергии элементом БСС. Например, для Li-Ion батарей саморазряд может составлять порядка 2–3 % в месяц, для свинцово-кислотных аккумуляторов – 4–6 %, для Ni-Cd – 15–20 %, а для Ni-MH – даже до 30 %.

Источники питания, позволяющие извлекать энергию из окружающей среды непосредственно на месте функционирования элементов БСС, являются наиболее подходящей альтернативой традиционным батареям и аккумуляторам [3–5]. К тому же тенденция уменьшения энергопотребления современными интегральными схемами ведет к росту интереса к таким источникам питания.

Для преобразования в электрическую энергию можно использовать: солнечную энергию; энергию, выделяемую при химических процессах; электромагнитные, электростатические и гравитационные поля, градиенты температуры, потоки жидкости и газа, энергию механических колебаний, а также энергию, порождаемую в процессе жизнедеятельности [4–5].

Вследствие распространенности и доступности источников механических колебаний, наиболее подходящим является использование микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) (или генераторов) механической энергии в электрическую энергию [5–7]. Существует три основных направления разработки МЭМП энергии – на основе пьезоэлектрических, электромагнитных и электростатических преобразователей [6–7]. Наиболее подходящими представляются электростатические (емкостные) МЭМП (генераторы) энергии, поскольку в основе технологии их изготовления лежит хорошо совместимая с интегральными процессами технология микроэлектромеханических систем (МЭМС).

### 1. Постановка задачи

Принцип работы емкостных МЭМП энергии, обеспечивающих преобразование энергии механических колебаний в электрическую энергию, основан на изменении заряда или напряжения на обкладках переменного конденсатора (рис. 1) при модуляции его емкости с помощью механических колебаний. За счет работы, совершаемой внешней механической силой, при изменении емкости переменного конденсатора, часть внешней механической энергии преобразуется в электрическую энергию.

На рис. 2 представлена типичная схема МЭМП (генератора) энергии, где  $V_0$  – первичный источник напряжения,  $C$  – переменный конденсатор,  $C_S$  – накопительный конденсатор,  $R$  – сопротивление нагрузки,  $S_{w1}$  и  $S_{w2}$  – управляющие ключи. Принцип работы данной схемы подробно рассмотрен в работе [8].

Энергию, получаемую за один цикл работы данной схемы, можно оценить с помощью выражения

$$\Delta E = \frac{1}{2} V_0^2 (C_{\max} - C_{\min}) \left( \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \right), \quad (1)$$

где  $C_{\max}$  и  $C_{\min}$  – максимальная и минимальная емкости переменного конденсатора  $C$ . Из выражения (1) видно, что количество вырабатываемой энергии за цикл преобразования зависит от отношения максимальной и минимальной емкостей переменного конденсатора  $C_{\max}/C_{\min}$ .

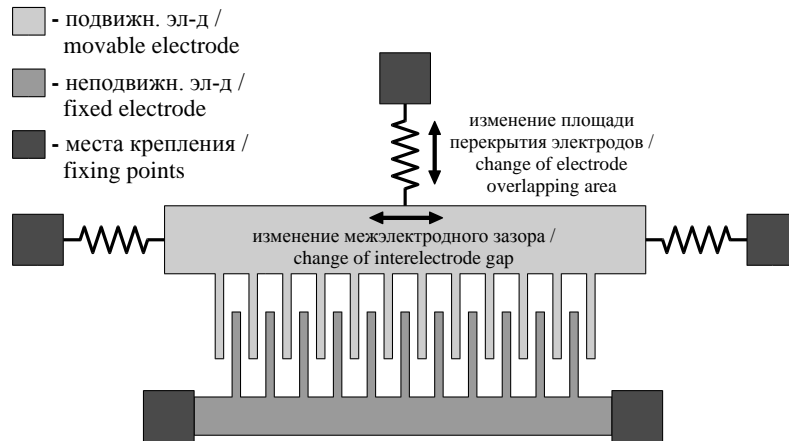


Рис. 1 – Упрощенная схема механического узла МЭМП

Fig. 1 – Simplified scheme of MEMC mechanical unit

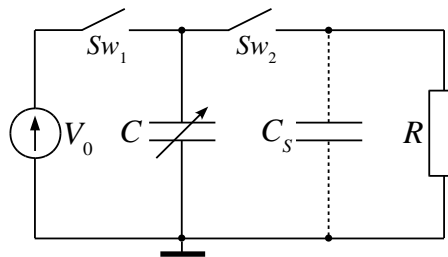


Рис. 2 – Типичная электрическая схема МЭМП энергии [8]

Fig. 2 – Typical electrical circuit of MEMC [8]

Таким образом, желательно иметь максимальную глубину модуляции емкости  $C_{\max}/C_{\min}$ . Изменения емкости конденсатора МЭМП можно добиться путем изменения межэлектродного зазора или площади перекрытия электродов (рис. 1). Оба варианта, однако, имеют свои недостатки: конструкции с изменением межэлектродного зазора подвержены эффекту схлопывания (pull-in effect) электродов [8, 9], тогда как в конструкциях с изменением площади перекрытия электродов модуляция емкости  $C_{\max}/C_{\min}$  из-за влияния краевых эффектов может быть недостаточной для эффективной работы генератора [10–12].

В данной работе используется гребенчатая конструкция переменного конденсатора с изменением площади перекрытия электродов, в которой подвижный и неподвижный электроды расположены в различных плоскостях, при этом движение подвижного электрода происходит в горизонтальном направлении (рис. 3). Такая конструкция не будет подвержена эффекту схлопывания, поскольку движение в вертикальном направлении отсутствует, кроме того, так как площадь перекрытия между электродами будет изменяться существенно, чем в конструкции

с изменением площади перекрытия электродов, изображенной на рис. 1, то и модуляция емкости  $C_{\max}/C_{\min}$  будет заметно выше.

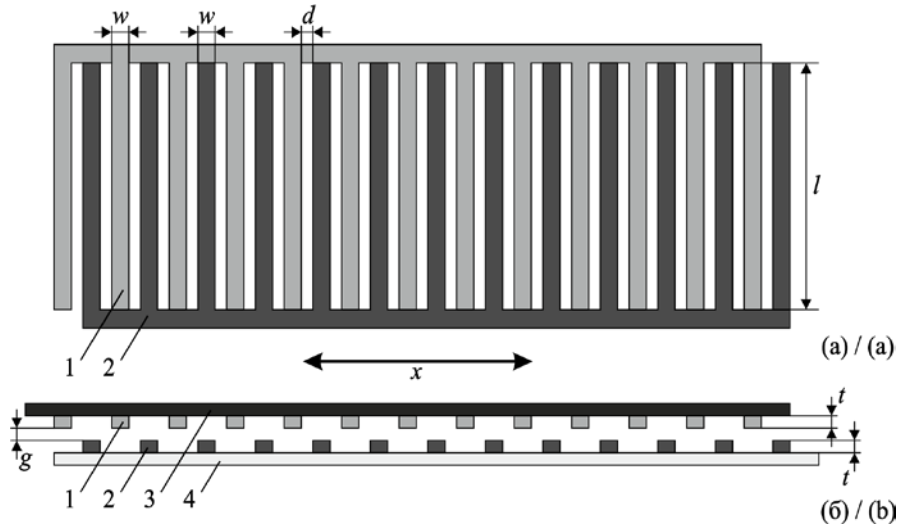


Рис. 3 – Модель исследуемого гребенчатого переменного конденсатора:

1 – подвижный гребенчатый электрод, 2 – неподвижный гребенчатый электрод, 3 – основание подвижного электрода, 4 – основание неподвижного электрода; (а) – вид сверху, (б) – вид сбоку

Fig. 3 – Model of comb-drive variable capacitor under consideration:

1 – movable comb-drive electrode; 2 – stationary comb-drive electrode; 3 – movable electrode base; 4 – stationary electrode base; (a) – top view, (b) – side view

Целью работы является исследование зависимости отношения максимальной и минимальной емкостей  $C_{\max}/C_{\min}$  исследуемого гребенчатого переменного конденсатора от геометрических параметров электродов.

## 2. Модель

Модуляция емкости в рассматриваемом гребенчатом конденсаторе (рис. 3) происходит за счет изменения площади перекрытия алюминиевых электродов при смещении  $x$  подвижного электрода (1), относительно неподвижного электрода (2). Подвижный и неподвижный электроды закреплены на диэлектрических основаниях (3) и (4), соответственно. Конструкция состоит из двух гребенчатых электродов, расположенных в параллельных плоскостях и состоящих каждый из 13 пальцев, соединенных друг с другом.

Расчет зависимостей емкости от смещения подвижного электрода относительно неподвижного проводился с помощью метода конечных элементов в среде ANSYS. Вычисление проводилось при различных значениях ширины пальцев  $w$  и толщины электродов  $t$ , длина пальцев  $l = 46$  мм и межэлектродный зазор  $g = 0,1$  мм оставались неизменными. Изменение емкости происходило при смещении  $x$  подвижного электрода вправо и влево относительно начального положения электродов, расположенных друг над другом. Смещение  $x$  варьировалось от  $-6,2$  до  $6,2$  мм. Ширина пальцев  $w$  менялась от  $0,2$  мм до  $2$  мм, а величина бокового межэлектродного зазора  $d$  соответственно варьировалась от  $1,8$  до  $0$  мм

согласно выражению  $d = 2 - w$ , где все величины берутся в [мм]. Для анализа были взяты пять значений толщины электродов  $t = 0, 2; 0, 4; 0, 6; 0, 8$  и  $1, 0$  мм.

### 3. Обсуждение результатов

Зависимости емкости  $C$  переменного конденсатора от относительного смещения  $x$  подвижного электрода при различной ширине пальцев  $w$  для толщин подвижного и неподвижного электродов гребенчатого переменного конденсатора  $t = 0, 2; 0, 6$  и  $1, 0$  мм представлены на рис. 4, а, б, в соответственно.

Из рис. 4, а, б и 4, в видно, что все зависимости  $C(x)$  симметричны относительно оси ординат, что объясняется симметричностью конструкции. На всех представленных зависимостях  $C(x)$  емкость достигает своего наибольшего значения, когда  $x = 0$  мм, при этом все пальцы верхнего и нижнего электродов расположены строго друг над другом, и площадь перекрытия электродов максимальна (рис. 5, а, з). Такие максимумы емкости имеются при  $x = \pm 4$  мм, однако значения емкостей в этих точках меньше, чем при  $x = 0$  мм, поскольку суммарная площадь перекрытия электродов в этом случае меньше.

В общем случае положения основных максимумов соответствуют смещению  $x = 2n(w + d)$ , где  $n \in \mathbb{Z}$ , очевидно, что значения емкости в этих максимумах будут уменьшаться с ростом  $n$ , это обусловлено уменьшением рабочей площади перекрытия электродов переменного конденсатора. При очень больших смещениях, когда перекрытия между пальцами электродов не будет вообще, максимумов появляться больше не должно, поэтому  $n \in [-12, 12]$ , так как каждый электрод состоит из 13 пальцев.

Из зависимостей рис. 4, а, б, в видно, что при уменьшении ширины пальцев  $w$  уменьшаются значения минимальных емкостей  $C_{\min}$ . Это возникает, поскольку боковой межэлектродный зазор  $d$  увеличивается при уменьшении  $w$ , что снижает влияние соседних пальцев на противоположную обкладку конденсатора (рис. 5, в, е). Это позволяет значительно уменьшить величину минимальной емкости  $C_{\min}$ . При этом, однако, уменьшается эффективная площадь переменного конденсатора, а вслед за ней и максимальная емкость  $C_{\max}$  (рис. 5, а, з). Но варьируя ширину пальцев  $w$ , можно достичь наибольшего отношения  $C_{\max}/C_{\min}$ .

Из рис. 4, а, б, в также видно, что с ростом толщины электродов  $t$  при неизменной ширине пальцев  $w$  минимальные емкости  $C_{\min}$  переменного конденсатора уменьшаются, а максимальные  $C_{\max}$  – увеличивается. Уменьшение  $C_{\min}$  связано с уменьшением взаимодействия наиболее удаленных участков пальцев электродов, примыкающих к диэлектрическим основаниям (3) и (4). Рост  $C_{\max}$  связан с увеличением боковой площади пальцев электродов, что наиболее существенно образом проявляет себя, когда  $x = 2n(w + d)$ , где  $n \in [-12, 12]$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ . Таким образом, как и в случае с шириной  $w$ , изменяя толщину электродов  $t$  можно добиться наибольшего отношения  $C_{\max}/C_{\min}$ .

При смещении подвижного электрода из положений  $x = 2n(w + d)$  емкость  $C$  падает из-за того, что площадь перекрытия между пальцами подвижного и неподвижного электродов уменьшается (рис. 5, б, д). Однако емкость уменьшается до определенного момента, после чего начинает расти, при этом возникает некий максимум. Анализ показывает, что положения этих дополнительных максимумов для конструкций с различной шириной пальцев  $w$  соответствуют смещениям

$x = 2n(w + d) \pm w$ , где  $n \in [-12, 12]$  и  $n \in \mathbb{Z}$  (рис. 5, в, д), как и для основных максимумов, с ростом  $n$  значения емкости в дополнительных максимумах уменьшаются. Также на рис. 4 можно заметить характерные изломы зависимостей емкости  $C$  от смещения  $x$  подвижного электрода, возникающие примерно при смещениях  $x = 2n(w + d) \pm w/2$ .

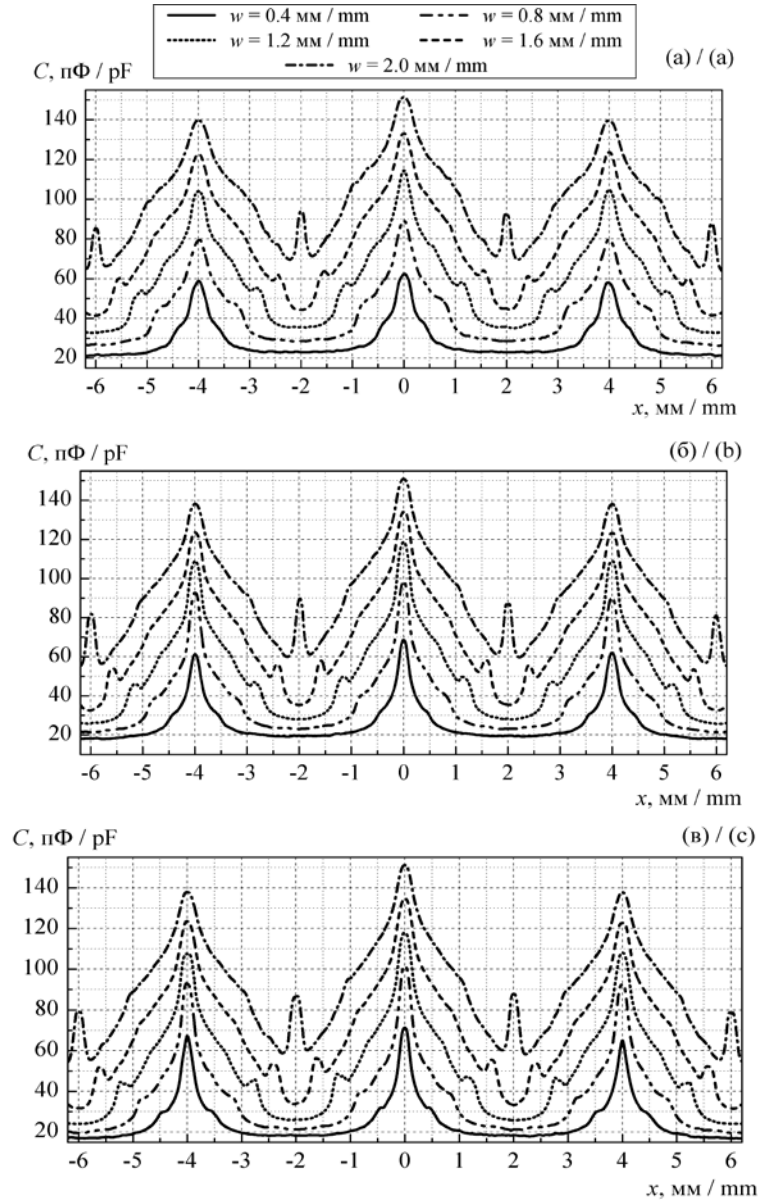


Рис. 4 – Зависимости емкости от относительного смещения  $x$  при различной ширине пальцев  $w$  и толщине электродов  $t = 0,2; 0,6$  и  $1,0$  мм, (а), (б) и (в) соответственно

Fig. 4 – The capacitance dependences versus relative electrode displacement  $x$  for different finger width  $w$  and electrode thickness  $t = 0,2; 0,6$  и  $1,0$  mm, (a), (b), and (c) respectively

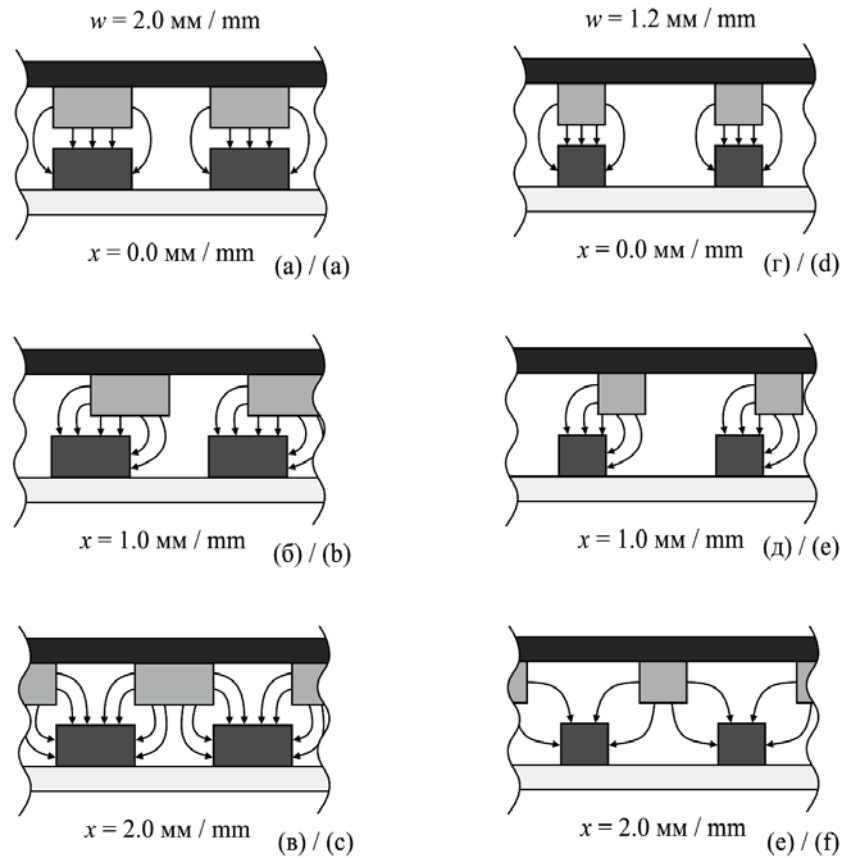


Рис. 5 – Схематические изображения распределения электрического поля в исследуемом гребенчатом переменном конденсаторе при различных смещениях  $x$  подвижного электрода:

(а), (г) – 0 мм, (б), (д) – 1,0 мм и (в), (е) – 2,0 мм, и различных ширинах пальцев  $w$ : (а)–(в) – 2,0 мм, (г)–(е) – 1,2 мм

Fig. 5 – Schematic drawing of electric field distribution in comb-drive variable capacitor under consideration for different movable electrode displacement  $x$ :

(а), (д) – 0 мм, (б), (е) – 1,0 мм, and (в), (е) – 2,0 мм, and different finger width  $w$ : (а)–(в) – 2,0 мм, (д)–(е) – 1,2 мм

Из рис. 4 а, б, 4, в видно, что значения емкости в дополнительных максимумах, как и в основных максимумах, увеличиваются с ростом  $w$  и  $t$ . Наличие дополнительных максимумов обусловлено влиянием краевых эффектов и внесением добавочной емкости конденсаторами, образуемыми боковыми стенками пальцев. Из рис. 5, а, г видно, что при  $x = 0$  мм основную емкость вносят рабочие поверхности пальцев, параллельные основаниям (основные поверхности), в то время как боковые поверхности добавляют незначительную часть емкости. При смещении  $x = 1,0$  мм (рис. 5, б, д) начинает сказываться большее влияние краевых эффектов из-за уменьшения площади перекрытия между пальцами соседних электродов. При максимальном смещении  $x = 2,0$  мм (рис. 5, в, е) площадь перекрытия между гребенчатыми электродами отсутствует, поэтому всю емкость вносят конденсаторы, образованные между основными и боковыми поверхностями пальцев соседних электродов. При ширине пальцев  $w = 2,0$  мм (рис. 5, в) расстояние между обкладками образованных конденсаторов мало, емкость достаточно велика и воз-

никает экстремум. При ширине пальцев  $w = 1,2$  мм (рис. 5, *e*) расстояние между обкладками конденсаторов достаточно велико, влияние краевых эффектов мало, в связи с этим емкость будет минимальна при  $x = 2,0$  мм.

Анализ зависимостей рис. 4 показывает, что при  $x = (2n \pm 1)(w + d)$  емкость будет минимальна для всех конструкций с  $w < 2,0$  мм, для конструкции же с  $w = 2,0$  мм при таких смещениях  $x$  будут наблюдаться дополнительные максимумы. Стоит отметить, что дополнительные пики при  $x = (2n \pm 1)w$  для  $w = 2,0$  мм при уменьшении ширины пальцев  $w$  расщепляются на пики при  $x = 2n(w + d) \pm w$ , где  $n \in [-12, 12]$  и  $n \in \mathbb{Z}$ , причем высота этих пиков заметно меньше по сравнению с «нерасщепленным» пиком.

На рис. 6 представлена зависимость отношения максимальной емкости к минимальной от толщины электродов  $t$  и ширины пальцев  $w$  гребенчатого переменного конденсатора. Из рисунка видно, что существует максимум зависимости отношения  $C_{\max}/C_{\min}$  при ширине пальцев  $w = 1,2$  мм при  $t = 0,2$  мм, который смещается в сторону меньших ширин  $w$  при увеличении толщины электродов  $t$ . Анализ влияния параметров конструкции гребенчатого переменного конденсатора на электрическую емкость, показал, что наибольшее отношение  $C_{\max}/C_{\min} = 4,92$  имеет конструкция со следующими параметрами:  $t = 1,0$  мм,  $l = 46$  мм,  $g = 0,1$  мм,  $w = 0,8$  мм. Стоит заметить, что наиболее типичная конструкция такого гребенчатого переменного конденсатора с параметрами  $t = 0,2$  мм,  $l = 46$  мм,  $g = 0,1$  мм,  $w = 2,0$  мм имеет отношение  $C_{\max}/C_{\min}$  лишь 2,19. Таким образом, незначительно изменяя конструкцию переменного конденсатора, можно добиться увеличения выходной мощности МЭМП энергии более чем в 2 раза.

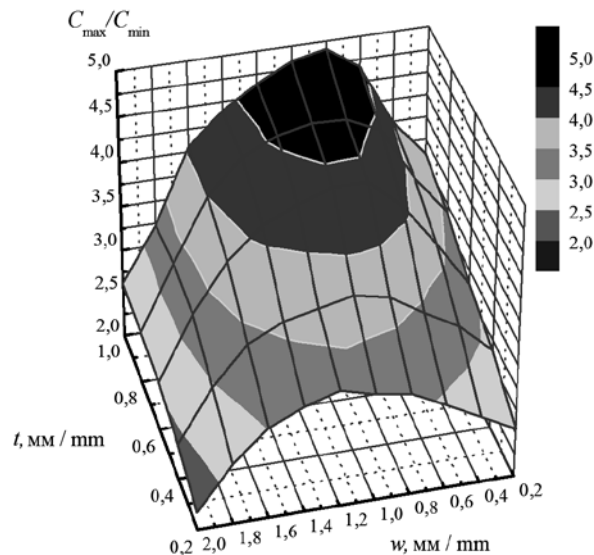


Рис. 6 – Зависимость отношения максимальной емкости гребенчатого переменного конденсатора к минимальной от толщины электродов  $t$  и ширины пальцев  $w$

Fig. 6 – The dependence of the ratio between maximal and minimal capacitances of the comb-drive variable capacitor versus electrode thickness  $t$  and finger width  $w$



### Заключение

В результате исследования были получены и проанализированы зависимости электрической емкости  $C$  переменного конденсатора с гребенчатой конструкцией с изменением площади перекрытия электродов от смещения подвижного электрода  $x$  при различных значениях ширины пальцев  $w$  и толщины электродов  $t$ .

Анализ показывает, что полученные зависимости имеют основные максимумы при смещении  $x = 2n(w + d)$ , где  $n \in [-12, 12]$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ , дополнительные максимумы – при  $x = 2n(w + d) \pm w$ , изломы – при  $x = 2n(w + d) \pm w/2$  и минимумы емкости для  $w < 2,0$  мм – при  $x = (2n \pm 1)(w + d)$ .

Также было найдено, что дополнительные максимумы при  $x = (2n \pm 1)w$  для  $w = 2,0$  мм расщепляются на два максимума  $x = 2n(w + d) \pm w$  при уменьшении ширины пальцев  $w$ , причем высота этих пиков заметно меньше по сравнению с «нерасщепленным» пиком.

Установлено, что при толщине электродов  $t = 0,2$  мм при изменении ширины пальцев  $w$  возникает максимум отношения  $C_{\max}/C_{\min}$  при  $w = 1,2$  мм, который смещается в сторону меньших ширин электродов при увеличении толщины  $t$  до 1,0 мм и находится в точке  $w = 0,8$  мм. Максимальное отношение  $C_{\max}/C_{\min} = 4,92$  из всех проанализированных конструкций имеет конденсатор с параметрами  $t = 1,0$  мм,  $l = 46$  мм,  $g = 0,1$  мм,  $w = 0,8$  мм.

Полученные результаты позволяют более точно рассчитать оптимальную конструкцию гребенчатого переменного конденсатора, представленного в данной работе и используемого в МЭМП энергии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Современные тенденции развития микросистемной техники / В.Д. Вернер, П.П. Мальцев, А.А. Резнев, А.Н. Сауров, Ю.А. Чаплыгин // Нано- и микросистемная техника. – 2008. – № 8. – С. 2–6.
2. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks / C.Ó. Mathúna, T. O'Donnell, R.V. Martinez-Catalá, J. Rohan, B. O'Flynn // Talanta. – 2008. – Vol. 75. – P. 613–623. – doi: 10.1016/j.talanta.2007.12.021.
3. Micropower energy harvesting / R.J.M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. van Hoof, R. Mertens // Solid-State Electronics. – 2009. – Vol. 53, iss. 7. – P. 684–693. – doi: 10.1016/j.sse.2008.12.011.
4. **Paradiso J.A., Starner T.** Energy scavenging for mobile and wireless electronics // IEEE Pervasive Computing. – 2005. – Vol. 4, iss. 1. – P. 18–27. – doi: 10.1109/MPRV.2005.9.
5. Power sources for wireless sensor networks / S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright, J. Rabaey // Lecture Notes in Computer Science. – 2004. – Vol. 2920. – P. 1–17. – doi: 10.1007/978-3-540-24606-0\_1.
6. **Beeby S.P., Tudor M.J., White N.M.** Energy harvesting vibration sources for microsystems applications // Measurement Science and Technology. – 2006. – Vol. 17, iss. 12. – P. 175–195. – doi: 10.1088/0957-0233/17/12/R01.
7. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices / P.D. Mitcheson, E.M. Yeatman, G.K. Rao, A.S. Holmes, T.C. Green // Proceedings of the IEEE. – 2008. – Vol. 96, iss. 9. – P. 1457–1486. – doi: 10.1109/JPROC.2008.927494.
8. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Микроэлектромеханические преобразователи // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41, № 2. – С. 120–135.
9. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Предельные характеристики микроэлектромеханических преобразователей энергии // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 1 (34). – С. 129–141.
10. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Анализ эффективности использования 2D-модуляции емкости в МЭМП с последовательной схемой включения компонентов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2010. – № 2 (15). – С. 45–53.

11. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС со встречно-штыревой структурой // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2009. – № 1 (12). – С. 99–106.
12. Драгунов В.П., Колчужин В.А., Остертак Д.И. Влияние краевых эффектов на электрическую емкость в МЭМС // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2009. – № 2 (13). – С. 97–105.

## COMB VARIABLE CAPACITOR OPTIMIZATION FOR THE MICROELECTROMECHANICAL POWER CONVERTER

Blum K.E.<sup>1,2</sup>, Ostertak D.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC «SibIS», Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

The modern achievements in microelectronics, microsystem technology and radio engineering have led to possibility of wireless sensor networks (WSNs) deployment consisting of low-power wireless intelligent sensors and actuators. Power sources which can extract energy from environment directly on WSN nodes operation place are the most attractive alternative to conventional batteries and accumulators. Due to the ubiquity and availability of mechanical vibration sources, as well as because of compatibility between integrated circuits technology and microelectromechanical systems (MEMS) technology the most suitable solution is to use capacitive (electrostatic) microelectromechanical mechanical-to-electrical energy converters (MEMC) (energy generators). Operation principle of capacitive MEMC providing mechanical-to-electrical energy conversion is based on charge or voltage variation at variable capacitor plates during its capacitance modulation with the help of mechanical vibrations. The aim of this work is to study the dependence of the ratio between maximal and minimal capacitances of the considered variable capacitor versus electrodes parameters. Comb-drive variable capacitor construction with electrode overlap area change at different finger width and electrode thickness is modeled using ANSYS. The analysis shows that the obtained dependences of capacitance versus movable electrode displacement consist of complex of maximums and minimums, where their positions depend on finger width and electrode thickness. It was established, that the maximal value of the ratio between maximal and minimal capacitances defined for lesser electrode thickness is shifted to smaller values of width  $w$  when electrode thickness  $t$  is increased. The results obtained enable to enhance the efficiency of vibration energy generator by increasing its output power more than twice without substantial modification of the variable capacitor dimension.

**Keywords:** capacitance, energy generator, comb-drive variable capacitor, microelectromechanical converter, fringing field effect.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-1-20-30

## REFERENCES

1. Verner V.D., Mal'tsev P.P., Reznov A. A., Saurov A.N., Chaplygin Yu.A. Sovremennye tendencii razvitiya mikrosistemnoj tehniki [Modern tendencies in development of micro system technique]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – Journal of NANO and MICROSYSTEM TECHNIQUE*, 2008, no. 8, pp. 2–6.
2. Mathúna C. Ó., O'Donnell T., Martinez-Catalá R.V., Rohan J., O'Flynn B. Energy scavenging for long-term deployable wireless sensor networks. *Talanta*, 2008, vol. 75, iss. 23, pp. 613–623. doi: 10.1016/j.talanta.2007.12.021
3. Vullers R.J.M., Schaijk R. van, Doms I., Hoof C. van, Mertens R. Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics*, 2009, vol. 53, pp. 684–693. doi: 10.1016/j.sse.2008.12.011
4. Paradiso J.A., Starner T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive Computing*, 2005, vol. 4, iss. 1, pp. 18–27. doi: 10.1109/MPRV.2005.9
5. Roundy S., Steingart D., Frechette L., Wright P., Rabaey J. Power sources for wireless sensor networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, vol. 2920, pp. 1–17. doi: 10.1007/978-3-540-24606-0\_1
6. Beeby S.P., Tudor M.J., White N.M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 2006, vol. 17, iss. 12, pp. R175–R195. doi: 10.1088/0957-0233/17/12/R01

7. Mitcheson P.D., Yeatman E.M., Rao G.K., Holmes A.S., Green T.C. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 2008, vol. 96, iss. 9, pp. 1457–1486. doi: 10.1109/JPROC.2008.927494
8. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Mikroelektromekhanicheskie preobrazovateli [Microelectromechanical converters]. *Mikroelektronika – Russian Microelectronics*, 2012, vol. 41, iss. 2, pp. 107–121.
9. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Predel'nye kharakteristiki mikroelektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii [Limit parameters of microelectromechanical energy converters]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science bulletin of Novosibirsk state technical university*, 2009, vol. 34, no. 1, pp. 129–141.
10. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Analiz effektivnosti ispol'zovaniya 2D-modulyatsii emkosti v MEMS s posledovatel'noi skhemoi vklyucheniya komponentov [An efficiency analysis of - using of 2D capacitance modulation in microelectromechanical converter with a series circuit]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2010, vol. 15, no. 2, pp. 45–53.
11. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Elektrostaticheskie vzaimodeistviya v MEMS so vstrechno-shtyrevoi strukturoi [Coulomb interactions in interdigitated MEMS]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 99–106.
12. Dragunov V.P., Kolchuzhin V.A., Ostertak D.I. Vliyanie kraevykh effektiv na elektricheskuyu emkost' v MEMS [Fringing field effect on electric capacitance in MEMS]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 97–105.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Блум Кирилл Евгеньевич** – родился в 1989 году, аспирант кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета, инженер-конструктор ООО «СибИС». Область научных интересов – нано- и микросистемная техника. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630049, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 220, корп. 2. Email: bloom.kirill@gmail.com).

**Blum Kirill Evgenievich** (b. 1989) – postgraduate student of Semiconductor Devices and Microelectronics Department at the Novosibirsk State Technical University, design engineer of limited liability company “SibIS”. His research interests are currently focused on nano- and microsystem engineering. He is author of 7 scientific papers. (Address: 220, build 2, Krasnyj prospect, Novosibirsk, 630049, Russian Federation. Email: bloom.kirill@gmail.com).



**Остертак Дмитрий Иванович** – родился в 1983 году, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано 37 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 4. Email: ostertak@ngs.ru).

**Ostertak Dmitry Ivanovich** (b. 1983) – candidate of engineering science, associate professor, associate professor of Department of Semiconductor Devices and Microelectronics at the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem engineering. He is author of 37 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: ostertak@ngs.ru).

Статья поступила 11 декабря 2014 г.  
Received December 11, 2014

#### To Reference:

Blum K.E., Ostertak D.I. Optimizatsiya peremennogo kondensatora grebenchatogo tipa dlya mikroelektromekhanicheskogo preobrazovatelya energii [Comb variable capacitor optimization for the microelectromechanical power converter]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 1 (26), pp. 20–30. doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-20-30