

УДК 621.308.38

К. т. н. Л. Б. ЛИЩИНСКАЯ, к. т. н. А. А. ЛАЗАРЕВ,  
М. В. БАРАБАН, д. т. н. Н. А. ФИЛИНЮК

Украина, Винницкий национальный технический университет  
E-mail: L\_Fil1@mail.ru

## ПОЛУАКТИВНЫЙ РАДИОЧАСТОТНЫЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Разработан и исследован датчик расхода электроэнергии на базе транзисторного динамического негатрона. В датчике отсутствуют механические части и электрический контакт с электрической сетью, он позволяет осуществлять контроль дистанционно, благодаря чему его можно встраивать в элементы конструкций здания.*

*Ключевые слова: датчик расхода электрической энергии, динамический негатрон, преобразователь потребляемой электрической энергии, преобразователь высокочастотного сигнала.*

Частотные датчики дистанционного контроля состояния объекта получили широкое применение вследствие их высокой помехозащищенности, простоты согласования с устройствами цифровой обработки сигналов и высокой точности [1–3]. Использование достижений негатроники [4, 5] позволяет в ряде случаев улучшить технико-экономические показатели электронной аппаратуры и создать качественно новые электронные устройства. В частности, использование полупроводниковых приборов с отрицательным активным сопротивлением —  $R$ -негатронов — позволяет создавать схемотехнически простые микросистемные частотные датчики различных физических величин [6–8], в которых функции преобразования и генерации совмещены и выполняются  $R$ -негатронами. Недостатком большинства генераторных датчиков является зависимость их работы от источника питания, что ограничивает время и зону их работы. Целью настоящей работы является построение и исследова-

ние радиочастотных датчиков (**РЧД**) на базе транзисторных динамических негатронов, не имеющих “жесткой” привязки к источнику питания.

### Построение РЧД

Для высокоэффективных РЧД дистанционного контроля целесообразно использовать комбинированный динамический негатрон, который обеспечивает возможность построения генераторных схем СВЧ-диапазона. Они могут быть реализованы как со встроенным источником питания (активные РЧД), так и без него (полуактивные РЧД), и работать в режиме непрерывного измерения или в режиме контроля (в дискретном режиме) [2].

Полуактивные РЧД в своем составе имеют генератор электромагнитных колебаний, но не имеют встроенного источника питания. Возбуждение схемы осуществляется периодическим воздействием на антенну РЧД электромагнитных колебаний внешнего возбуждающего генератора, частота которых  $f_0$  отличается от частоты сигнала генератора  $f_r$  и входит в стандартную сетку частот.

Концептуальным примером построения полуактивного РЧД является схема бесконтактного радиочастотного датчика учета расхода электрической энергии, представленная на **рис. 1** [9]. Он состоит из  $LC$ -генератора, образованного резонирующей емкостью  $C3$  и комбинированным динамическим негатроном, реализованным на полевом транзисторе  $VT1$  с индуктивным преобразуемым им-

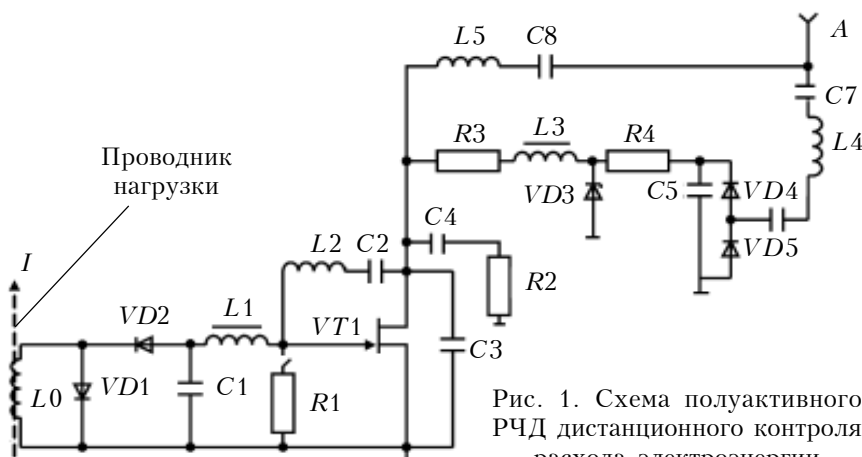


Рис. 1. Схема полуактивного РЧД дистанционного контроля расхода электроэнергии

митансом индуктивности  $L2$ . Напряжение между затвором и истоком снимается с конденсатора  $C1$ . Его величина определяется током и временем заряда конденсатора  $C1$  через выпрямительный диод  $VD2$ . Величина тока заряда пропорциональна току, который протекает по проводнику нагрузки. Таким образом, частота генерации, определяемая величиной тока и временем заряда конденсатора  $C1$ , пропорциональна электрической энергии переменного тока, который прошел через проводник нагрузки.

Устройство начинает генерировать сигналы после того как на антенну РЧД начинают поступать возбуждающие электромагнитные колебания от ридера. Эти сигналы выпрямляются схемой удвоения напряжения на диодах  $VD4$  и  $VD5$  и обеспечивают необходимое напряжение между истоком и стоком транзистора  $VT1$ , стабилизируемое стабилитроном  $VD3$ . Считывание информации происходит с некоторой задержкой, по окончании переходных процессов и после установления напряжения питания.

Такой счетчик электрической энергии позволяет осуществлять контроль дистанционно, в нем нет механических частей, отсутствует электрический контакт с электрической сетью, и он может быть встроен в элементы конструкции здания. Если ввести в схему элемент памяти, то датчик можно будет идентифицировать, но это увеличит его себестоимость.

Необходимыми условиями самовозбуждения рассмотренного датчика являются [10]

$$K_{у\text{вн}} < 1; |Y_{12}Y_{21}| / (2\text{Re}Y_{11}) > 0,$$

где  $K_{у\text{вн}}$ ,  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{21}$  — соответственно, внутренний инвариантный коэффициент устойчивости полевого транзистора и его  $Y$ -параметры в схеме с общим стоком.

Для обеспечения генерации на частоте  $f_c$  необходимо выполнение условия

$$\text{Im} Y_h + \text{Im} Y_{\text{вых}} = 0,$$

где  $Y_h$  — проводимость нагрузки в плоскости «исток — сток» полевого транзистора  $VT1$ ;  $Y_{\text{вых}}$  — проводимость цепи «исток — сток»  $VT1$ ,  $Y_{\text{вых}} = \text{Re}Y_{\text{вых}} + j\text{Im}Y_{\text{вых}}$ .

Здесь

$$\text{Re} Y_{\text{вых}} = \text{Re} Y_{22} - \frac{\text{Re}(Y_{12}Y_{21}) + \sigma_r \text{Im}(Y_{12}Y_{21})}{(1 + \sigma_r) \text{Re}(Y_{11} + Y_r)}; \quad (1)$$

$$\text{Im} Y_{\text{вых}} = \text{Im} Y_{22} - \frac{\text{Im}(Y_{12}Y_{21}) + \sigma_r \text{Re}(Y_{12}Y_{21})}{(1 + \sigma_r^2) \text{Re}(Y_{11} + Y_r)}; \quad (2)$$

где  $\sigma_r = \text{Im}(Y_r + Y_{11}) / \text{Re}(Y_r + Y_{11})$ .

Решая уравнение  $\partial \text{Re} Y_{\text{вых}} / \partial \sigma_r = 0$  относительно  $\sigma_r$  при  $\text{Re} Y_r = 0$ , находим условие, при котором  $\text{Re} Y_{\text{вых}}$  имеет минимальное значение:

$$\sigma_{r\text{опт}} = \frac{|Y_{12}Y_{21}| - \text{Re}(Y_{12}Y_{21})}{\text{Im}(Y_{12}Y_{21})}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и решая его относительно  $\text{Im} Y_r$ , находим величину преобразуемой проводимости (в данном случае — проводимость катушки индуктивности  $L1$ )

$$\text{Im} Y_{r_0} = \frac{1}{2\pi f_r L1} = \sigma_{r\text{опт}} \text{Re} Y_{11} - \text{Im} Y_{11}$$

и значение резонирующей емкости

$$C3 = \frac{\text{Im} Y_{\text{вых}}}{2\pi f_r} = \frac{\text{Im}(Y_{12}Y_{21})}{2 \text{Re} Y_{11}} - \text{Im} Y_{22}.$$

Приведенная методика расчета может быть применена и для других видов транзисторов (биполярных, однопереходных), используемых в качестве основы комбинированного динамического негatrona.

### Экспериментальные исследования

При исследовании работы РЧД учитывалось, что его структурная схема состоит из трех частей: входного преобразователя потребляемой электрической энергии в постоянное напряжение на затворе полевого транзистора; преобразователя высокочастотного сигнала с антенны в напряжение питания схемы;  $LC$ -генератора на базе динамического негatrona на полевом транзисторе.

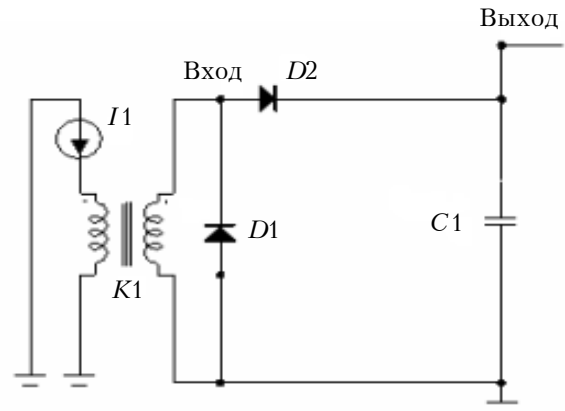


Рис. 2. Схема входного преобразователя количества потребляемой электрической энергии в постоянное напряжение

Схема для моделирования входного преобразователя показана на рис. 2. Трансформатор тока  $K1$  создает ток заряда накопительного конденсатора  $C1$ , который значительно меньше тока потребления и прямо пропорционален ему. Ток заряда выпрямляется диодом Шоттки  $D1$ . Напряжение на конденсаторе  $C1$ , таким образом, будет пропорционально потребленной электрической энергии.

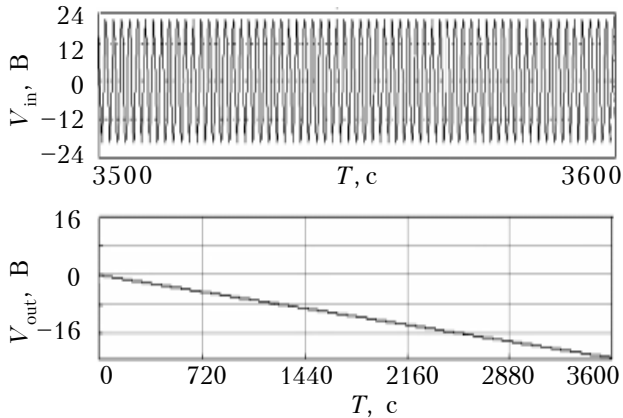


Рис. 3. Результаты моделирования выходного напряжения входного преобразователя

На рис. 3 представлены результаты моделирования напряжения на выходе схемы  $V_{out}$  при входном напряжении  $V_{in}$ . Действующее значение силы тока  $I_1=4,55$  А соответствует мощности потребления электроэнергии 1 кВт при напряжении в сети 220 В. Из графиков следует, что напряжение на выходе преобразователя растёт линейно во времени пропорционально потребленной энергии и через 3600 с достигает  $-22,6$  мВ. Катушка индуктивности  $L1$  обеспечивает развязку по переменному току с остальной частью схемы.

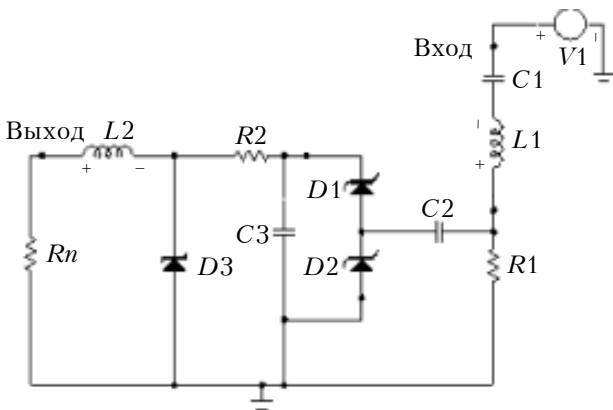


Рис. 4. Схема преобразователя ВЧ-сигнала с антенны в напряжение питания датчика

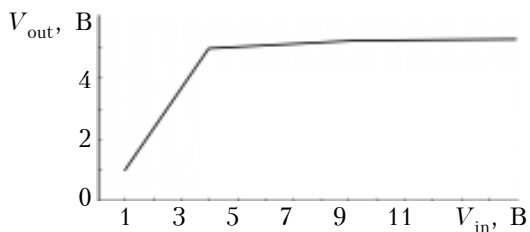


Рис. 5. Зависимость напряжения на выходе ВЧ-преобразователя от значения амплитуды входного напряжения, которое наводится в антенне

Схема для моделирования преобразователя высокочастотного сигнала с антенны в напряжение питания устройства показана на рис. 4. Напряжение, которое наводится в приемной антенне от ридера, поступает на вход и через входной полосно-пропускающий фильтр  $C1, L1$ , настроенный на частоту сигнала опроса 125 кГц, подается на удвоитель напряжения на элементах  $C2, C3, D1, D3$ . На элементах  $R2, D3$  собран параметрический стабилизатор напряжения. Дроссель  $L2$  обеспечивает развязку по переменному току.

На рис. 5 показаны результаты моделирования зависимости напряжения  $V_{out}$  на выходе преобразователя (рис. 4) от напряжения входа  $V_{in}$ , которое наводится в антенне. В диапазоне амплитуд входного напряжения 4 – 15 В частотой 125 кГц, значение постоянного напряжения на выходе составляет 5,0 – 5,2 В при токе нагрузки 1,75 мА. Этим обеспечивается стабильная работа датчика на различных расстояниях от ридера.

Схема для моделирования основной части датчика – автогенератора гармонических колебаний на базе динамического негатрона на полевом транзисторе Шоттки – показана на рис. 6, а зависимость частоты его генерации  $f_r$  от напря-

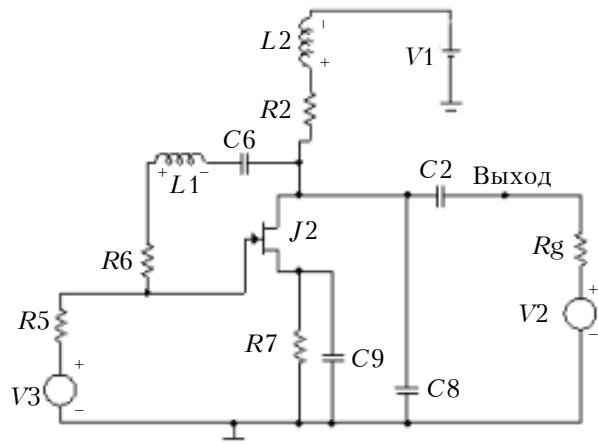


Рис. 6. Схема генератора на динамическом негатроне

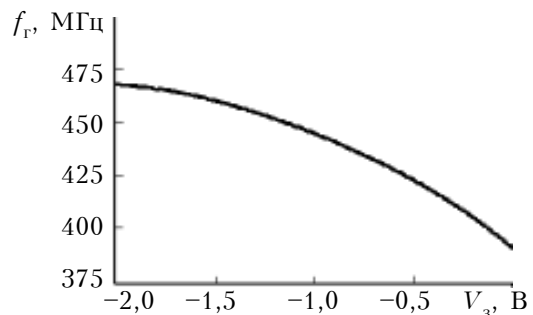


Рис. 7. Зависимость частоты генератора (см. схему на рис. 6) от напряжения на затворе полевого транзистора

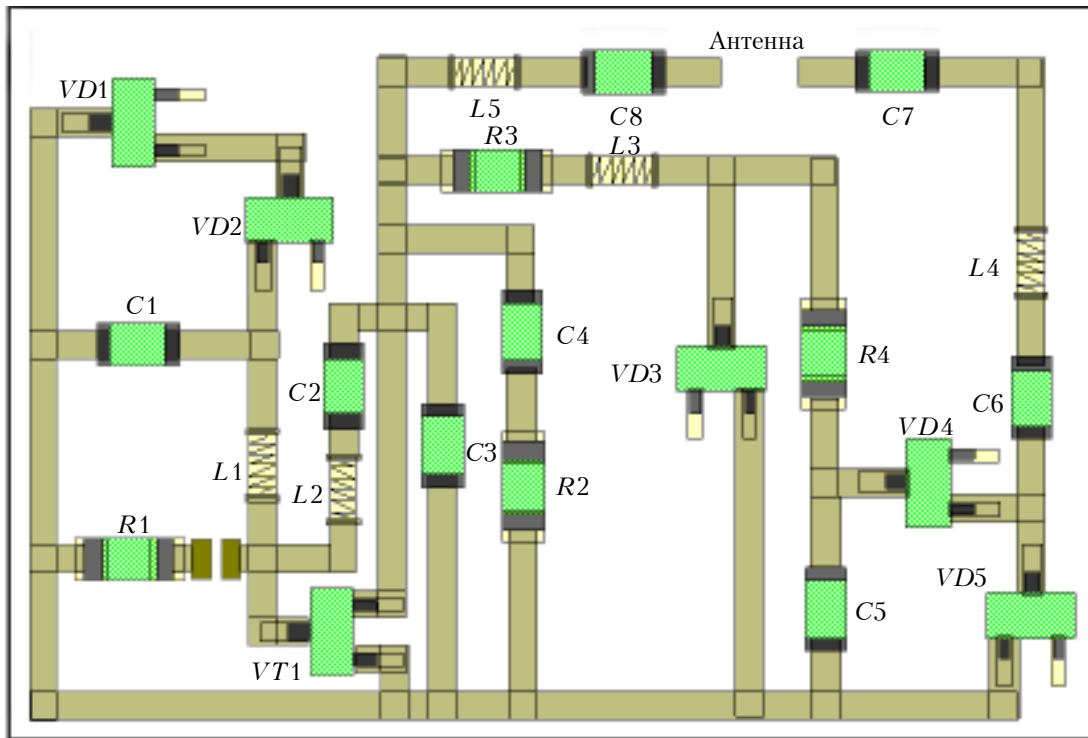


Рис. 8. Плата РЧД дистанционного контроля расхода электроэнергии

жения на затворе  $V_3$  полевого транзистора — на рис. 7.

При нулевом напряжении на затворе частота генерации составляет 390,3 МГц. С увеличением отрицательного напряжения на затворе транзистора частота увеличивается и при напряжении  $-2$  В составляет 467,8 МГц. Изменение частоты составляет 77,5 МГц. Для того чтобы  $V_3$  составило  $-2$  В необходимо, чтобы количество энергии, потребленной пользователем, составило 88,5 кВт·ч. Таким образом, крутизна преобразования датчика составляет в среднем 0,876 МГц/(кВт·час).

Для реализации РЧД расхода электрической энергии была разработана гибридная микросхема, плата которой размером 18,5×12 мм с установленными компонентами показана на рис. 8.

В качестве основания платы использовали керамическую подложку RO3010 фирмы Rogers Corporation, в качестве компонентной базы — керамические высокочастотные конденсаторы GQM SMD 0603 фирмы Murata, толстопленочные резисторы ERJ3G SMD 0603 фирмы Panasonic, высокочастотные монолитные катушки индуктивности LQG SMD 0603 фирмы Murat, высокочастотные диоды Шоттки фирмы NXP, транзистор BF862 фирмы NXP.

\*\*\*

Таким образом, предложен радиочастотный датчик контроля расхода электроэнергии, который работает без встроенного источника питания

— необходимое напряжение питания создается за счет преобразования высокочастотного сигнала, поступающего от ридера на датчик. Высокочастотный сигнал на выходе РЧД пропорционален измеряемому параметру. Разработанный датчик контроля расхода электроэнергии работает в диапазоне частот 390,3 — 467,8 МГц.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Виглеб Г. Датчики. — М.: Мир, 1989. [Vigleb G. Datchiki. Moscow. Mir. 1989]
2. Ліщинська Л. Б. Радіочастотні датчики дистанційного контролю стану об'єкту // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. — 2010. — Vol. 1(7). — N 4. — P. 27–36. [Lishchins'ka L. B. Radiochastotn i datchiki distantsiinogo kontrolyu stanu ob'ektu // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2010. Vol. 1(7). N 4. P. 27]
3. Арш Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений. — М.: Машиностроение, 1979. [Arsh E. I. Avtogenetatornyye metody i sredstva izmerenii. — Moscow. Mashinostroenie. 1979]
4. Филинюк Н. А. Краткий исторический обзор развития научного направления “Негатроника” // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1999. — № 3. — С. 38–43. [Filinyuk N. A. Kratkii istoricheskii obzor razvitiya nauchnogo napravleniya “Negatronika” // Vimiryuval'na ta obchislyuval'na tekhnika v tekhnologichnikh protsesakh. 1999. N 3. P. 38]
5. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А. и др. Негатроника. — Новосибирск: Наука, 1995. [Ser'eznov A. N., Stepanova L. N., Garyainov S. A. i dr. Negatronika. Novosibirsk. Nauka. 1995]

6. Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные датчики с частотным выходом на основе аналогов негatronов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 5–6. — С. 19–22. [Negodenko O. N., Mardamshin Yu. P. Mikroelektronnyye datchiki s chastotnym vykhodom na osnove analogov negatronov // Tekhnologiya i Konstruivovanie v Elektronnoy Apparature. 2000. N 5–6. P. 19]

7. Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю., Негоденко О. Н., Румянцев К. Е. Микроэлектронные преобразователи на основе негatronных элементов и устройств. — Баку: ЭЛМ, 2001. [Kasimov F. D., Guseinov YA. Yu., Negodenko O. N., Rumyantsev K. E. Mikroelektronnyye preobrazovateli na osnove negatronnykh elementov i ustroystv. Baku. ELM. 2001]

8. Ліщинська Л. Б., Рожкова Я. С., Фурса С. Є., Філінюк М. А. Оптико-електронний генераторний сенсор на базі двохпараметричного УПІ // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2010. — № 2(20). — С. 219–224. [Lishchins'ka L. B., Rozhkova YA. S., Fursa S. E., Filinyuk M. A. Optiko-elektronniy generatorni sensor na bazi dvokhparametrichnogo UPI // Optiko-elektronni informatsiino-energetichni tekhnologiyi. 2010. N 2(20). P. 219]

9. Патент 54733 України. Дистанційний лічильник витрат електричної енергії / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, О. О. Лазарев, М. А. Філінюк. — Бюл. № 22. [Patent 54733 Ukrayini. Distantsiinnyy lichil'nik vitrat elektrichnoyi energiyi / L. B. Lishchins'ka, M. V. Baraban, O. O. Lazarev, M. A. Filinyuk. Bull. N 22]

10. Філінюк М. А., Войцеховська О. В. Елементи та пристрої автоматики на основі нелінійних властивостей динамічних негatronів. — Вінниця: Універсум–Вінниця, 2008. [Filinyuk M. A., Voitsekhovs'ka O. V. Elementi ta pristroyi avtomatiki na osnovi nelineinikh vlastivostei dinamichnikh negatroniv. Vinnitsya. Universum–Vinnitsya. 2008]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 23.09 2011 г.

Lishchinskaya L. B., Lazarev A. A., Baraban M. V., Filinyuk N. A. **Semi-active radiofrequency power consumption sensor.**

*Keywords: power consumption sensor, dynamical negatron, electrical energy consumption converter, converter of high-frequency signal.*

A semi-active RF sensor of power consumption based on the transistor dynamic negatron was developed and investigated. The designed sensor has no mechanical parts and there is no electrical contact between the sensor and electrical grid, it can be monitored distantly, whereupon the sensor can be embedded in structural elements of the building.

Ukraine, Vinnytsia National Technical University.

Ліщинська Л. Б., Лазарев О. О., Барабан М. В., Філінюк М. А. **Напівактивний радіочастотний датчик контролю витрати електроенергії.**

*Ключові слова: датчик витрати електричної енергії, динамічний негatron, перетворювач споживаної електричної енергії, перетворювач високочастотного сигналу.*

Розроблено та досліджено напівактивний радіочастотний датчик витрати електроенергії на базі транзисторного динамічного негatronа. У розробленому датчику відсутні механічні частини та електричний контакт з електричною мережею, він дозволяє проводити контроль дистанційно, завдяки чому його можна вбудувати в елементи конструкції будівлі.

Україна, Вінницький національний технічний університет.

**Красников Г. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.— Москва: Техносфера, 2011.— 800 с.**

В книге рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, описаны направления развития и ограничения применения методов масштабирования транзисторов, представлены требования к подзатворным диэлектрикам, технологии их формирования, различные конструкции сток-истоковых областей МОПТ и технологические процессы создания мелкозалегающих легированных слоев. Рассмотрены проблемы влияния масштабирования размеров элементов в субмикронную область и особенностей технологических процессов на надежность и долговечность субмикронных МОП-транзисторов. Представлены данные о влиянии технологических процессов изготовления субмикронных СБИС (процессов плазменной обработки, ионного легирования и технологических операций переноса изображения) на деградацию подзатворного диэлектрика, а значит — на уровень выхода, надежность и долговечность годных готовых изделий.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования и разработки технологии изготовления КМОП СБИС, а также для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

