

Д. т. н. Н. А. ФИЛИНЮК, к. т. н. Л. Б. ЛИЩИНСКАЯ, к. т. н. О. О. ЛАЗАРЕВ, Я. С. ТКАЧУК

Украина, Винницкий национальный технический университет
E-mail: rozhkova.yana@gmail.com

ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОРНЫЙ ДАТЧИК

Рассмотрена возможность построения трехпараметрического радиочастотного датчика. Разработана математическая модель, которая описывает взаимосвязь параметров датчика с параметрами первичных измерительных преобразователей. Исследованы основные зависимости параметров датчика, его функция преобразования и чувствительность. Результаты исследований и адекватность математической модели проверены экспериментальным путем.

Ключевые слова: радиочастотный датчик, обобщенный преобразователь иммитанса, полевой транзистор.

Генераторные датчики обеспечивают возможность дистанционного получения информации, а также простоту ее преобразования в цифровую форму [1]. Обычно это однопараметрические датчики, образованные комбинацией первичного измерительного преобразователя (ПИП) и генератора гармонических колебаний (см., например, [2]). Также имеют место разработки многопараметрических радиочастотных датчиков, в частности мультифункциональный сенсор для измерения двух ортогональных проекций вектора индукции магнитного поля и температуры [3]; беспроводная сенсорная платформа WISP [4], различные терморегуляторы [5] и т. д. Такие датчики имеют достаточно сложную конструкцию, дорогостоящие элементы и высокое энергопотребление. Двухпараметрические датчики не получили широкого применения и по той причине, что при их реализации возникает проблема неоднозначности выходного сигнала при измерении параметров ПИП. Поэтому с их помощью решаются специфические задачи, такие как, например, повышение чувствительности датчика за счет использования двух идентичных ПИП [6] или когда второй ПИП работает в режиме компенсации дестабилизирующего фактора [7]. Одним из решений указанной проблемы является построение многофункциональных измерительных преобразователей [8], использующих многоканальные системы или системы коммутации, что усложняет датчик и для радиочастотных датчиков является неэффективным. Тем не менее, проблема создания миниатюрных, экономичных многопараметрических радиочастотных датчиков для разных отраслей науки и производства остается актуальной.

Целью настоящих исследований является построение трехпараметрического радиочастотного

датчика СВЧ-диапазона малых размеров и простой конструкции, имеющего низкую стоимость и энергопотребление.

Схемотехническое обоснование

В основу построения датчика положен двухкаскадный трехпараметрический обобщенный преобразователь иммитанса (ОПИ) (рис. 1, а) [9]. В соответствии с теорией синтеза генераторных датчиков на основе ОПИ [7], преобразованный адмиттанс ОПИ

$$Y_{\text{вых}} = F([y^{(1)}], [y^{(2)}], Z_{Г1}, Z_{Г2}, Z_{Г3}) = \text{Re}(Y_{\text{вых}}) + j \cdot \text{Im}(Y_{\text{вых}}) \quad (1)$$

должен соответствовать требованиям

$$\text{Re}(Y_{\text{вых}}) < 0; \quad (2)$$

$$\text{Im}(Y_{\text{вых}}) < 0, \quad (3)$$

где $[y^{(1)}]$, $[y^{(2)}]$ — матрицы проводимости первого и второго каскадов ОПИ;

$Z_{Г1}$, $Z_{Г2}$, $Z_{Г3}$ — преобразуемые импедансы ПИП.

Как следует из (1), выполнение условий (2) и (3) зависит от характера преобразуемых импедансов и параметров адмиттансных матриц первого и второго каскадов ОПИ.

Если учесть, что среди современных ПИП наиболее широкую группу образуют иммитансные RLC -ПИП, возникает задача построения генераторного датчика с использованием индуктивного, емкостного и резистивного ПИП, импеданс которых ($Z_{Г1} \dots Z_{Г3}$) зависит от соответствующих физических возмущений ($F_1 \dots F_3$).

В качестве первого и второго каскадов используются активные четырехполюсники на

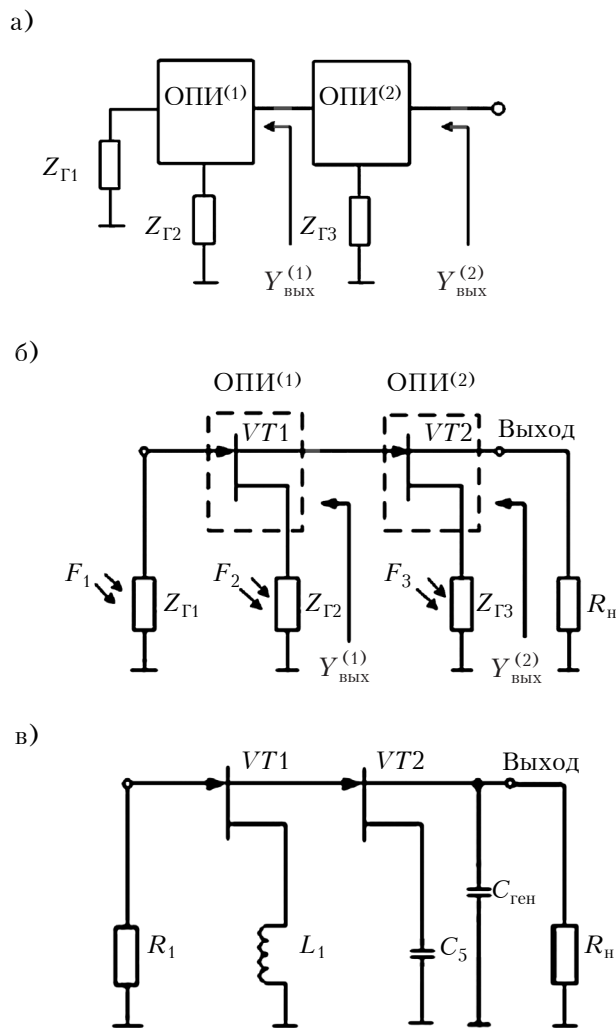


Рис. 1. Структурная (а) и высокочастотная (б) схемы двухкаскадного ОПИ и реализованный на его основе трехпараметрический генераторный датчик (в)

основе полевых транзисторов (ПТ), что обеспечивает технологичность, низкую стоимость и широкий диапазон рабочих частот синтезированного датчика.

После обоснования первичных требований к ПИП и каскадам ОПИ необходимо определить схему включения ПТ в каждом каскаде, а также характер импеданса каждого ПИП, при которых выполняются условия (2) и (3). С этой целью методом синтеза таблиц преобразования иммитанса [10] разработана таблица преобразования иммитанса однокаскадного двухпараметрического ОПИ на основе ПТ. Из нее следует, что для выполнения условий (2) и (3) второй каскад должен быть образован схемой включения ПТ с общим стоком (см. рис. 1, б), импеданс $Z_{Г3}$ должен иметь емкостной характер ($\text{Im}(Z_{Г3}) > 0$), а адмиттанс $Y_{\text{ВЫХ}}^{(1)}$ – индуктивный ($\text{Im}(Y_{\text{ВЫХ}}^{(1)}) < 0$).

Используя таблицу повторно, находим, что для получения $\text{Im}(Y_{\text{ВЫХ}}^{(1)}) < 0$ первый каскад ОПИ должен быть реализован на ПТ, включенным по схеме с общим стоком, причем в цепи затвора должен быть подключен активный импеданс ($\text{Re}(Z_{Г1}) > 0, \text{Im}(Z_{Г1}) = 0$), а в цепи стока – индуктивный импеданс ($\text{Im}(Z_{Г2}) < 0$).

Для обеспечения генерации сигнала, с учетом индуктивного характера преобразованного адмиттанса ($\text{Im}(Y_{\text{ВЫХ}}^{(2)}) < 0$), к выходу ОПИ подключена резонирующая емкость $C_{\text{ген}}$, которая обеспечивает баланс фаз: $\text{Im}(Y_{\text{ВЫХ}}^{(2)}) + \omega C = 0$. Необходимый баланс амплитуд достигается выбором величины импеданса нагрузки R_{H} , исходя из условия $R_{\text{H}} < |1 / \text{Re}(Y_{\text{ВЫХ}}^{(2)})|$.

Таблица преобразования иммитанса однокаскадного двухпараметрического ОПИ на основе ПТ с общим стоком

| Z_1 | Z_2 | $Y_{\text{ВЫХ}}$ | Z_1 | Z_2 | $Y_{\text{ВЫХ}}$ | Z_1 | Z_2 | $Y_{\text{ВЫХ}}$ |
|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|
| | R | | | R | | | R | |
| R | L | | L | L | | C | L | |
| | C | | | C | | | C | |

С учетом проведенного анализа получена высокочастотная схема трехпараметрического генераторного датчика, представленная на рис. 1, в.

Разработка математической модели

Исходя из назначения датчика, найдем его функцию преобразования в виде зависимости частоты генерации $f_{ген}$ от преобразуемых импедансов ОПИ ($Z_{Г1}...Z_{Г3}$), которые отвечают импедансам резистивного ($Z_{Г1}$), индуктивного ($Z_{Г2}$) и емкостного ($Z_{Г3}$) ПИП.

Преобразованный адмиттанс двухкаскадного ОПИ определяется выражением [11]

$$Y_{вых2} = Y_{22}^{(2)} - \frac{Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)}}{Y_{11}^{(2)} + Y_{вых1}} \tag{4}$$

где

$$Y_{вых1} = Y_{22}^{(1)} - \frac{Y_{12}^{(1)} Y_{21}^{(1)}}{Y_{11}^{(1)} + 1/Z_{Г1}} \tag{5}$$

$$[Y^{(1)}] = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(1)} & Y_{12}^{(1)} \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{11} + Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} & \frac{y_{12} - Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} \\ \frac{y_{21} - Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} & \frac{y_{22} + Z_{Г2} \Delta y}{1 + Z_{Г2} \Sigma y} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$[Y^{(2)}] = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(2)} & Y_{12}^{(2)} \\ Y_{21}^{(2)} & Y_{22}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y'_{11} + Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} & \frac{y'_{12} - Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} \\ \frac{y'_{21} - Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} & \frac{y'_{22} + Z_{Г3} \Delta y'}{1 + Z_{Г3} \Sigma y'} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\Sigma y = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22};$$

$$\Delta y = y_{11} y_{22} - y_{21} y_{12};$$

$y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}$ – параметры адмиттансной матрицы первого каскада ОПИ;

$$\Sigma y' = y'_{11} + y'_{12} + y'_{21} + y'_{22};$$

$$\Delta y' = y'_{11} y'_{22} - y'_{21} y'_{12};$$

$y'_{11}, y'_{12}, y'_{21}, y'_{22}$ – параметры адмиттансной матрицы второго каскада ОПИ.

После подстановки (5) в (4), с учетом (6) и (7), при условии что $Z_{Г1} = R_1, Z_{Г2} = j\omega L_1$ и $Z_{Г3} = 1/(j\omega C_5)$, получено аналитическое выражение для преобразованного адмиттанса двухкаскадного ОПИ

$$Y_{вых2} = \frac{y'_{22} + Z_{Г3} \cdot \Delta y' - (y'_{12} - Z_{Г3} \cdot \Delta y')(y'_{21} - Z_{Г3} \cdot \Delta y')}{Z_{Г3} \cdot \Sigma y' + 1 - (Z_{Г3} \cdot \Sigma y' + 1)^2 (A + B - B)} \tag{8}$$

где

$$A = \frac{y'_{11} + Z_{Г3} \cdot \Delta y'}{Z_{Г3} \cdot \Sigma y' + 1};$$

$$B = \frac{y_{22} + Z_{Г2} \cdot \Delta y}{Z_{Г2} \cdot \Sigma y + 1};$$

$$B = \frac{(y_{12} - Z_{Г2} \cdot \Delta y)(y_{21} - Z_{Г2} \cdot \Delta y)}{(Z_{Г2} \cdot \Sigma y + 1)^2 \left(\frac{y_{11} + Z_{Г2} \cdot \Delta y}{Z_{Г2} \cdot \Sigma y + 1} + \frac{1}{Z_{Г1}} \right)}$$

С учетом подключения к выходу схемы резонирующей емкости $C_{ген}$ получим выражение для функции преобразования синтезированного датчика

$$f_{ген} = \frac{\text{Im}(Y_{вых})}{2\pi C_{ген}} \tag{9}$$

при этом

$$\text{Im}(Y_{вых}) = \text{Im}(Y_{22}^{(2)}) + \frac{m_1 \sigma_r - m_2}{(1 + \sigma_r^2) \cdot \text{Re}(Y_{11}^{(2)} + Y_{вых1})}$$

где $m_1 = \text{Re}(Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)})$;

$m_2 = \text{Im}(Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)})$;

$$\sigma_r = \text{Im}(Y_{11}^{(2)} + Y_{вых1}) / \text{Re}(Y_{11}^{(2)} + Y_{вых1})$$

Система уравнений (4) – (9) является математической моделью трехпараметрического генераторного датчика на базе двухкаскадного обобщенного преобразователя иммитанса, реализованного на основе полевых транзисторов, и описывает взаимосвязь параметров датчика с параметрами ОПИ и ПИП.

Результаты исследования

Синтезированная схема трехпараметрического радиочастотного датчика должна генерировать информационный сигнал с частотой, которая зависит от изменения параметра только одного из ПИП, причем диапазоны частоты генерации при «срабатывании» каждого из датчиков должны быть разными. Это достигается выбором рабочего диапазона частот и параметров ПИП.

В процессе численного эксперимента определены частоты, при которых активная составляющая выходного адмиттанса $Y_{вых2}$ ОПИ будет иметь максимальное отрицательное значение, что обеспечивает достижение максимальной мощности генерируемого сигнала. При использовании транзисторов VT1 типа NE4210S01 с граничной частотой $f_{Г1} = 12$ ГГц и VT2 типа BF513 с граничной частотой $f_{Г2} = 6$ ГГц максимальное отрицательное значение реальной составляющей выходного адмиттанса наблюдается на частоте 175 МГц (рис. 2). Данная частота использовалась в даль-

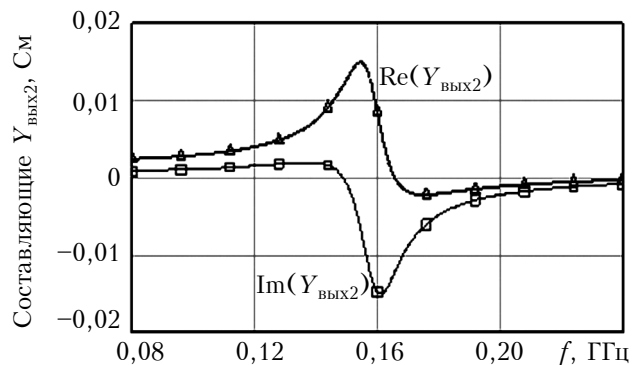


Рис. 2. Зависимость составляющих выходного адмиттанса двухкаскадного ОПИ от рабочей частоты f

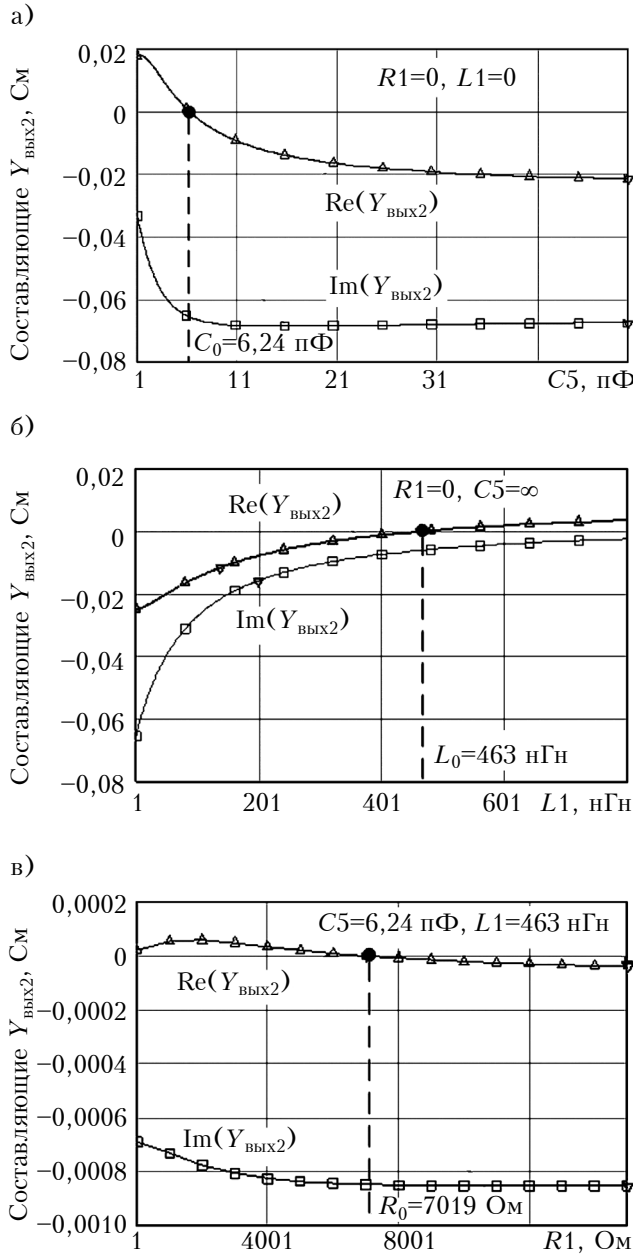


Рис. 3. Зависимость составляющих выходного адмиттанса датчика от изменения значений иммитансов емкостного (а), индуктивного (б) и резистивного (в) ПИП

нейших исследованиях в качестве центральной рабочей частоты трехпараметрического генераторного датчика.

Далее были проведены расчеты изменения выходного адмиттанса ОПИ в зависимости от параметров индуктивного ($L1$), емкостного ($C5$) и резистивного ($R1$) ПИП (рис. 3).

Полученные графики позволяют установить условия начала генерации сигнала и ее срыва при срабатывании одного из ПИП. В случае когда $R1=0$ Ом, $L1=0$ нГн генерация происходит после достижения емкостью третьего ПИП значения 6,24 пФ, т. е. значение $C5=6,24$ пФ является точкой начала генерации (рис. 3, а).

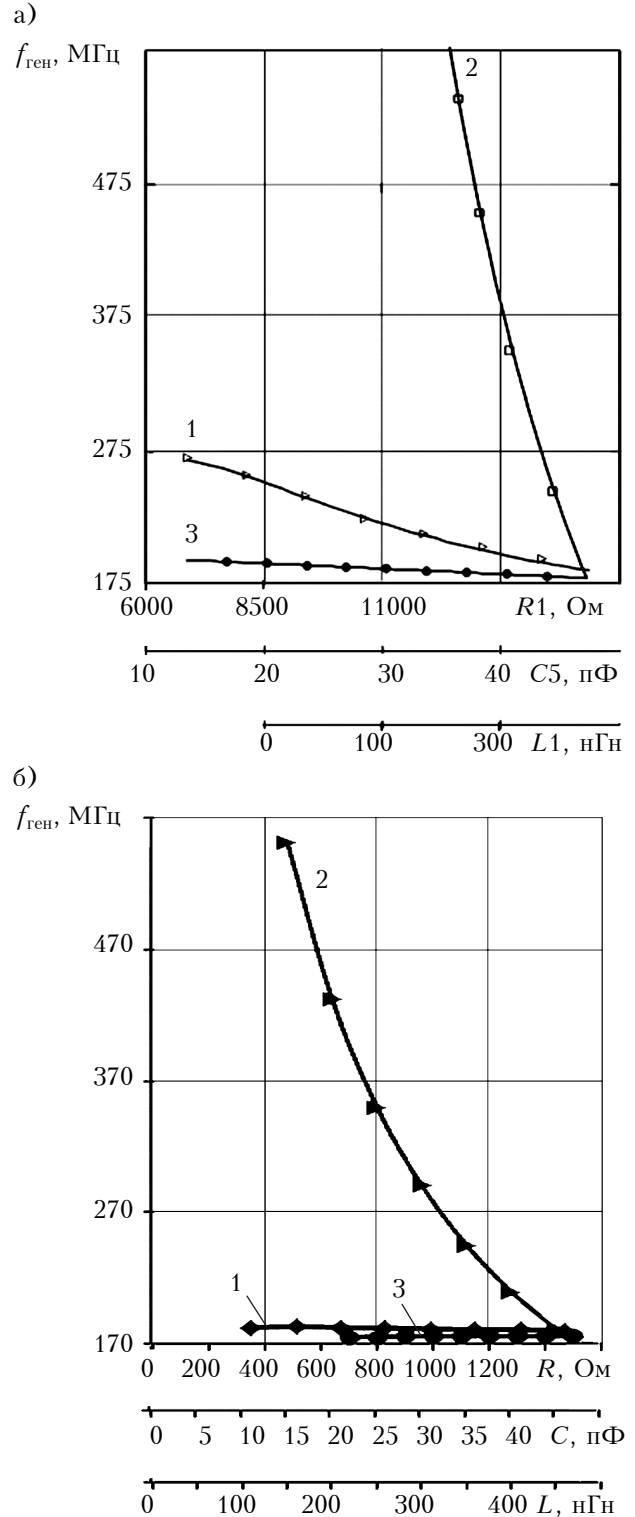


Рис. 4. Расчетные (а) и экспериментальные (б) зависимости частоты генерации от изменения параметров емкостного (1), индуктивного (2) и резистивного (3) ПИП

При $R1=0$ Ом, $C5=1000$ пФ такой точкой будет $L1=463$ нГн (рис. 3, б). Диапазон изменения значений сопротивления резистивного ПИП $R1$ выше 7 кОм является областью генерации сиг-

нала трехпараметрическим датчиком: в точке $R1=7019 \text{ Ом}$ происходит начало генерации сигнала (рис. 3, в).

Полученные результаты позволили провести моделирование зависимости частоты генерации $f_{\text{ген}}$ электромагнитных колебаний от параметров резистивного, индуктивного и емкостного ПИП и установить, что в каждом из этих случаев частота уменьшается при увеличении характерного параметра (рис. 4, а). Анализ результатов также показал, что частота генерируемых датчиком сигналов при уменьшении емкости $C5$ ($f_{\text{ген}1}$) лежит в области значений выше $180,1 \text{ МГц}$, при уменьшении индуктивности $L1$ ($f_{\text{ген}2}$) — выше $181,5 \text{ МГц}$, при уменьшении сопротивления $R1$ ($f_{\text{ген}3}$) — выше $174,9 \text{ МГц}$.

Сравнение результатов моделирования с полученными экспериментальными данными (см. рис. 4, б) показало, что расхождение не превышает 2%. Эксперимент проводился с использованием разработанного трехпараметрического датчика, принципиальная схема которого представлена на рис. 5.

При возбуждении схемы и генерации сигнала электромагнитные колебания поступают на выход датчика с тремя полосно-пропускающими фильтрами — ППФ1, ППФ2 и ППФ3, которые пропускают сигналы с частотой генерации, зависящей от изменения иммитансов емкостного, индуктивного или резистивного ПИП соответственно (рис. 4, а). Фильтр ППФ1 отфильтровывает сигнал частотой $f_{\text{ген}1}$, который возникает вследствие

изменения емкости $C5$ емкостного ПИП при наличии электрического поля и изменении его напряженности ($f_{\text{ген}1}=180 \text{ МГц}$). Фильтр ППФ2 отфильтровывает сигнал частотой $f_{\text{ген}2}$, возникающий вследствие изменения индуктивности $L1$ при наличии магнитного поля и изменении его напряженности ($f_{\text{ген}2}=181,5 \text{ МГц}$). Фильтр ППФ3 отфильтровывает сигнал с частотой $f_{\text{ген}3}$, который возникает вследствие изменения сопротивления $R1$ резистивного ПИП при изменении температуры ($f_{\text{ген}3}=174,9 \text{ МГц}$). Такая система позволяет определить, какой именно параметр изменяется и в каком диапазоне. В случае одновременного возмущающего влияния более чем на один ПИП частота генерируемого сигнала находится в диапазоне, отличном от полосы пропускания фильтров ППФ1...ППФ3, что исключает появление ложной информации.

Учитывая, что относительная чувствительность датчика определяется соотношением [12]

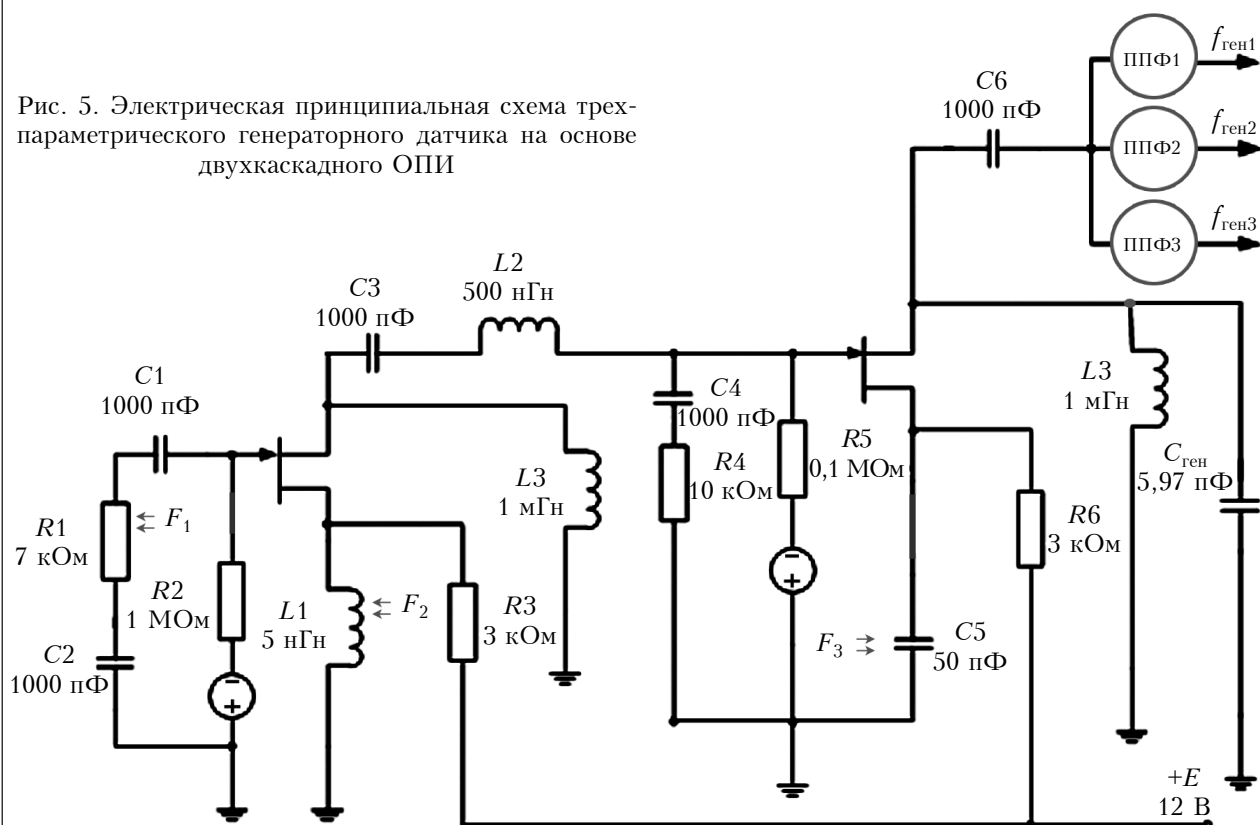
$$S_F^f = \frac{\partial f}{f} / \frac{\partial F}{F}, \quad (10)$$

где F — измеряемый параметр, а относительная чувствительность первичного измерительного преобразователя равна

$$S_F^Z = \frac{\partial Z}{Z} / \frac{\partial F}{F}, \quad (11)$$

где Z — резистивное, индуктивное или емкостное сопротивление ПИП, находим коэффициент увеличения относительной чувствительности генераторного датчика, использующего ОПИ,

Рис. 5. Электрическая принципиальная схема трехпараметрического генераторного датчика на основе двухкаскадного ОПИ



по сравнению с относительной чувствительностью ПИП:

$$K_S = S_F^f / S_F^Z = \frac{\partial f}{f} / \frac{\partial Z}{Z}. \quad (12)$$

Проведенные исследования разработанного трехпараметрического датчика с использованием уравнений (10)–(12) показали, что для резистивного канала относительная чувствительность $S_R^f = 1,88$, максимальный коэффициент увеличения чувствительности $K_S^R = 2$; для емкостного канала $S_C^f = -1,54$, $K_S^C = 1,5$; для индуктивного канала $S_L^f = -11,5$, $K_S^L = 1,2$. То есть, становится возможным повышение чувствительности датчика по сравнению с чувствительностью ПИП в 1,2–2 раза, а благодаря использованию двух каскадов ОПИ обеспечивается многофункциональность датчика. Потребляемая мощность датчика не превышает 100 мВт, а габаритные размеры 24×12 мм.

Выводы

Проведенные исследования подтвердили возможность разработки трехпараметрического генераторного датчика, который при своей многофункциональности и высокой чувствительности не усложняет конструкции, что достигается за счет использования двух каскадов ОПИ. Использование только двух полевых транзисторов и отсутствие коммутаторов делает его экономичным и обеспечивает возможность миниатюризации.

Генерация выходного сигнала предложенным датчиком происходит в различных диапазонах частоты, которые зависят от изменения значений параметров каждого из первичных измерительных преобразователей, что исключает неоднозначность результатов измерения. Использование полосно-пропускающих фильтров исключает появление ложной информации на выходе датчика и дает возможность определить, какой именно параметр изменяется и в каких пределах.

Таким образом, разработан мультифункциональный радиочастотный датчик, имеющий низ-

кое энергопотребление, простую конструкцию и малые размеры. При этом решена проблема неоднозначности выходного сигнала при измерении параметров ПИП, что является преимуществом по сравнению с другими существующими многоканальными системами.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками. – Москва: Энергия, 1970.
2. Пат. 50131 України. Генераторний сенсор / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, М. А. Філінюк. – 2010. – Бюл. №10.
3. Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Годинюк І. М., Марусенкова Т. А., Ільканич В. Ю. Мультифункціональний сенсор на інтегральній магнітотранзисторній структурі // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 1. – С. 110–120.
4. Sample A.P., Yeager D. J., Powledge P. S., Mamishev A. V., Smith J. R. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – Vol. 57, N 11. – P. 2608–2615.
5. Кравченко А. М., Анохин А. М. Двухканальный терморегулятор на основе S-негатронов // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 28–32.
6. Пат. 57679 України. Резистивний генераторний датчик / Л. Б. Ліщинська, Я. С. Рожкова, М. В. Барабан, С. Є. Фурса, М. А. Філінюк. – 2010. – Бюл. № 5.
7. Ліщинська Л. Б., Рожкова Я. С., Філінюк М. А. Індуктивно-резистивний генераторний датчик // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2012. – № 2. – С. 12–19.
8. Дубовой Н. Д. Автоматические многофункциональные измерительные преобразователи. – Москва: Радио и связь, 1989.
9. Ліщинська Л. Б. Багатопараметричні узагальнені перетворювачі імітансу на основі однокристальних напівпровідникових структур. – Вінниця: ВНТУ, 2012.
10. Ліщинська Л. Б., Філінюк М. А. Методика синтезу таблиць перетворення імітансу багатопараметричних УПН // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – №1. – С. 1–7.
11. Богачев В. М., Никифоров В. В. Транзисторные усилители мощности. – Москва: Энергия, 1978.
12. Датчики : Справочник / З. Ю. Готра, Л. Я. Ильницький, Е. С. Полищук и др. – Львов: Каменяр, 1995. – 312 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 04.06 2014 г.

М. А. ФІЛІНЮК, Л. Б. ЛІЩИНСЬКА, О. О. ЛАЗАРЄВ, Я. С. ТКАЧУК

Україна, Вінницький національний технічний університет
E-mail: rozhkova.yana@gmail.com

ТРИПАРАМЕТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОРНИЙ ДАТЧИК

У роботі розглядається можливість побудови трипараметричного радіочастотного датчика. Розроблено математичну модель датчика, яка описує взаємозв'язок параметрів датчика з параметрами первинних вимірювальних перетворювачів. Досліджено основні залежності параметрів датчика, його функція перетворення і чутливість. Результати досліджень і адекватність математичної моделі перевірено експериментальним шляхом.

Ключові слова: радіочастотний датчик, узагальнений перетворювач імітансу, польовий транзистор.

GENERATING THREE-PARAMETER SENSOR

Generating sensors provide the possibility of getting remote information and its easy conversion into digital form. Typically, these are one-parameter sensors formed by combination of a primary transmitter (PT) and a sine wave generator. Two-parameter sensors are not widely used as their implementation causes a problem with ambiguity output when measuring the PT. Nevertheless, the problem of creating miniature, thrifty multi-parameter RF sensors for different branches of science and industry remains relevant.

Considering ways of designing RF sensors, we study the possibility of constructing a three-parameter microwave radio frequency range sensor, which is based on a two-stage three-parameter generalized immitance convertor (GIC). Resistive, inductive and capacitive PT are used as sensing elements. A mathematical model of the sensor, which describes the relation of the sensor parameters to the parameters of GIC and PT was developed. The basic parameters of the sensor, its transfer function and sensitivity were studied. It is shown that the maximum value of the power generated signal will be observed at a frequency of 175 MHz, and the frequency ranges depending on the parameters of the PT will be different. Research results and adequacy of the mathematical model were verified by the experiment. Error of the calculated dependences of the lasing frequency on PT parameters change, compared with the experimental data does not exceed 2 %. The relative sensitivity of the sensor based on two-stage GIC showed that for the resistive channel it is about 1.88, for the capacitive channel –1,54 and for the inductive channel –11,5. Thus, it becomes possible to increase the sensor sensitivity compared with the sensitivity of the PT almost 1,2–2 times, and by using the two stage GIC a multifunctional sensor is provided.

Keywords: radiofrequency sensor, generalized immitance convertor, field-effect transistor.

REFERENCES

1. Novitskii P. V. [Digital devices with frequency sensors]. Moscow, Energy, 1970, 424 p. (in Russian)
2. Patent 50131 UA. Generator sensor. L. B. Lishchinska, M. V. Baraban, M. A. Filinyuk, 2010.
3. Gotra Z. Yu., Golyaka R. L., Godynyuk I. M., Marusenkov T. A., Il'kanych V. Yu. [Multifunctional sensor based on integral magnetic transistor structure]. *Optoelectronic Information-Power Technologies*, 2012, no 1, pp. 110-120. (in Ukrainian)
4. Alanson P. Sample, Daniel J. Yeager, Pauline S. Powledge, Alexander V. Mamishev, Joshua R. Smith. Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, vol. 57, no 11, pp. 2608-2615.
5. Kravchenko A.M., Anokhin A.M. [Dual thermostat on the basis of S-negatrons]. *Datchiki & Systemi (Sensors & Systems)*, 2013, no 2, pp. 28-32. (in Russian)
6. Patent 57679 UA. Resistive sensor generator. L. B. Lishchinska, Ya. S. Rozhkova, M. V. Baraban, S. Ye. Fursa, M. A. Filinyuk. 2010.
7. Lishchinska L. B., Rozhkova Y. S., Filinyuk M. A. [Inductively-resistive generating sensor]. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2012, no 2, pp. 12-19. (in Ukrainian)
8. Dubovoi N. D. [Automatic multifunctional transducers]. Moscow, Radio and sviaz', 1989, 256 p. (in Russian)
9. Lishchinska L. B. [Multi-parameter generalized immitance converters based on semiconductor structure chip]. Vinnitsia, VNTU, 2012, 243 p. (in Ukrainian)
10. Lishchinska L. B., Filinyuk M. A. [Table synthesis technique of immitance transducing of multi-parameter GICN]. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2011, no 1, pp. 1-7. (in Ukrainian)
11. Bogachev V. M., Nikiforov V. V. [Transistor amplifiers]. Moscow, Energy, 1978, 344 p.
12. Gotra Z. Yu., Il'nitskii L. Ya., Polishchuk E. S. et al. [Sensors: Handbook]. Lviv, Kamenyar, 1995, 312 p.