

## Математическая модель микроэлектронного частотного преобразователя с влагочувствительным МДП – транзистором

В.С. Осадчук, А.В. Осадчук, Л.В. Крылик

Кафедра электроники, Винницкий государственный технический университет

Хмельницкое шоссе, 95, 21021 Винница, Украина, тел.: 380 432 440013; e-mail: osa@lili.vstu.vinnica.ua

### Вступление

Использование современных технологий микроэлектроники предоставляет возможность разрабатывать и создавать влагочувствительные элементы на основе МДП – транзисторных структур [1-5]. Использование МДП – транзисторных структур позволяет уменьшить зависимость измеряемого параметра – относительной влажности – от влияния температуры окружающей среды, повысить чувствительность и точность измерения. Конструктивно микроэлектронные частотные преобразователи выполняются в виде интегральной схемы, которая состоит из трех МДП – транзисторов. Влагочувствительным элементом выступает двухзатворный МДП – транзистор, под вторым затвором которого создан влагочувствительный аморфный слой двуокиси кремния. В работе представлены исследования двух конструкций устройств с разными типами комплементарных МДП – транзисторов.

С целью изучения свойств частотных преобразователей влажности на основе МДП – транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, необходимо разработать математическую модель, при помощи которой можно получить зависимость активной и реактивной составляющих полного сопротивления структуры, частоты генерации от влияния относительной влажности, от режимов питания. Для подтверждения справедливости теоретических положений выполнены экспериментальные исследования. Рассмотрению этих вопросов посвящена данная работа.

Для осуществления микроминиатюризации влагочувствительного преобразователя, а именно изготовление его в виде интегральной схемы, необходимо отказаться от пленочной технологии для изготовления пассивного индуктивного элемента, так как уменьшение размеров пленочных индуктивных элементов приводит к уменьшению их самоиндукции, поскольку она зависит от охваченной элементом площади, а на площади  $1 \text{ см}^2$  можно выполнить элемент с индуктивностью не более  $1 \text{ мкГн}$ , который используют на частотах порядка  $40\text{-}50 \text{ МГц}$  [6, 7]. Увеличение значений индуктивности приводит к использованию навесных катушек индуктивности с ферромагнитными сердечниками, а на частотах до  $10^6 \text{ Гц}$  размеры данной индуктивности несовместимы с

размерами интегральной схемы преобразователя, и поэтому с целью решения этой проблемы было предложено [8, 9] использовать индуктивный характер полного сопротивления МДП – транзистора с RC – цепью, что легко выполняется в виде интегральной схемы. На рис.1 представлена схема влагочувствительного преобразователя с активной индуктивностью.

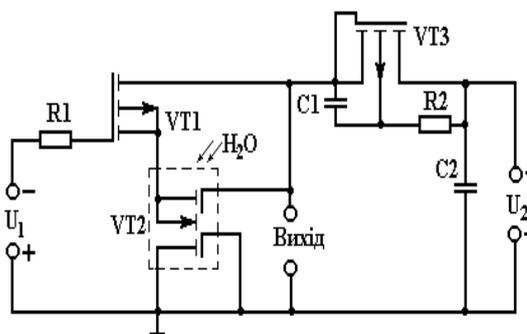


Рис.1. Электрическая схема частотного преобразователя влажности с активным индуктивным элементом

Следует отметить, что микроэлектронные частотные преобразователи, в которых используется зависимость параметров полевых транзисторов от изменения относительной влажности окружающей среды, по своим характеристикам намного лучше существующих аналоговых устройств. Кроме того, возможность использования транзисторных структур с отрицательным сопротивлением позволяет создать автогенератор преобразователя, в котором емкость и индуктивность зависят от изменения относительной влажности окружающей среды, а это значительно улучшает чувствительность и точность преобразователя. Емкость колебательного контура автогенератора реализуется емкостной составляющей полного сопротивления на электродах сток – сток полевого транзистора VT1 и двухзатворного полевого транзистора VT2, а индуктивность реализуется индуктивной составляющей полного сопротивления на электродах сток – исток транзистора VT3. Питание данной схемы осуществляют источники постоянного напряжения  $U_1$  и  $U_2$ .

### Математическая модель

На рис.2 представлена эквивалентная схема частотного преобразователя влажности.

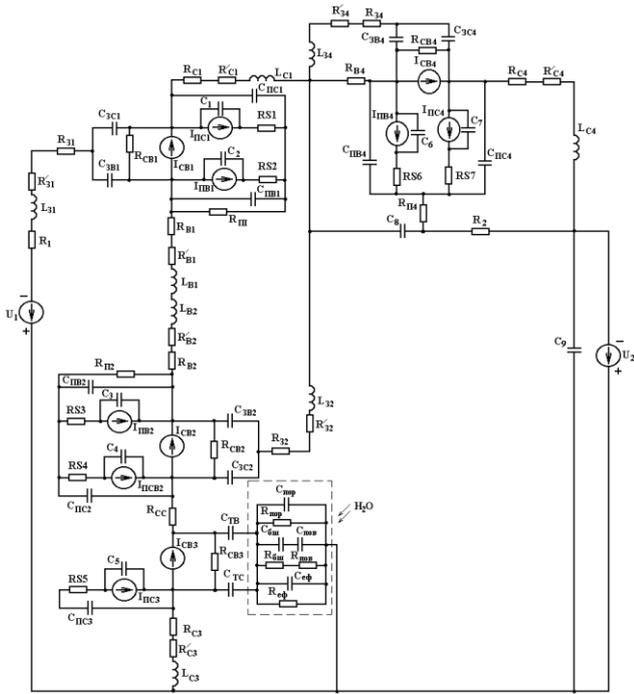


Рис.2. Эквивалентная схема преобразователя с активным индуктивным элементом

Определим функцию преобразования частотного преобразователя на основе эквивалентной схемы (рис.2), которая реализует зависимость частоты генерации от изменения относительной влажности окружающей среды. Для проведения расчетов преобразуем эквивалентную схему (рис.2) к более простому виду (рис.3).

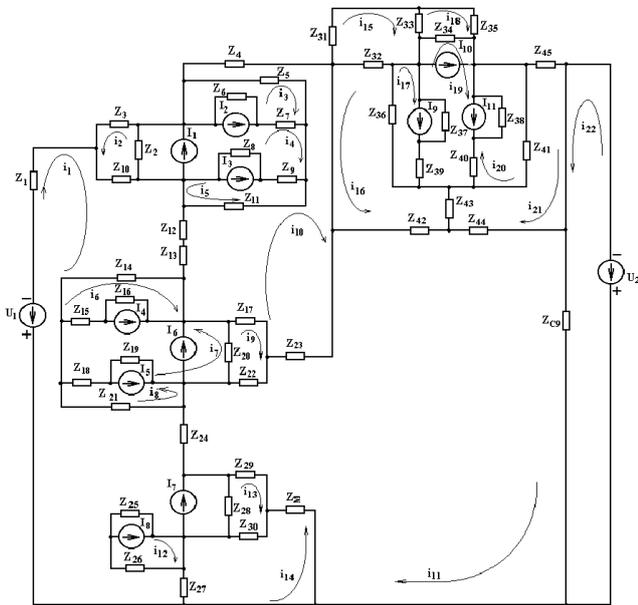


Рис.3. Преобразованная эквивалентная схема частотного преобразователя с активным индуктивным элементом

Система уравнений Кирхгофа имеет вид:

$$\begin{cases}
 -U_1 = (Z_1 + Z_{10} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{14} + Z_{21} + Z_{24} + \\
 + Z_{28} + Z_{25} + Z_{26} + Z_{27})(i_1 + I_7 + I_8) + Z_{10}i_2 - \\
 - (Z_{12} + Z_{13})i_{10} - Z_{14}i_6 + Z_{21}i_8 - Z_{24}i_{11} + \\
 + Z_{28}(-i_{13} + I_7) + Z_{25}(-i_{12} + I_8) - Z_{26}i_{12} + Z_{27}i_{14}, \\
 0 = (Z_3 + Z_2 + Z_{10})(i_2 - I_1) + Z_2(i_4 - I_1) + Z_{10}i_1, \\
 0 = (Z_5 + Z_6 + Z_7)(i_3 + I_2) - Z_5i_{10} - Z_7i_4 + \\
 + Z_6(-i_4 + I_2), \\
 0 = (Z_2 + Z_6 + Z_7 + Z_9 + Z_8)(i_4 + I_3 - I_1 - I_2) + \\
 + Z_2(i_2 - I_1) + Z_6(-i_3 - I_2) - Z_7i_3 + Z_9i_5 + \\
 + Z_8(i_5 + I_3), \\
 0 = (Z_8 + Z_9 + Z_{11})(i_5 + I_3) + Z_8(i_4 + I_3) + \\
 + Z_9i_4 + Z_{11}i_{10}, \\
 0 = (Z_{14} + Z_{15} + Z_{16})(i_6 + I_4) - Z_{14}i_1 + Z_{15}i_7 + \\
 + Z_{16}(i_7 + I_4), \\
 0 = (Z_{16} + Z_{15} + Z_{18} + Z_{19} + Z_{20})(i_7 - I_6 + I_4 - I_5) + \\
 + Z_{16}(i_6 + I_4) + Z_{15}i_6 - Z_{18}i_8 + Z_{19}(-i_8 - I_5) + \\
 + Z_{20}(i_9 - I_6), \\
 0 = (Z_{18} + Z_{19} + Z_{21})(i_8 + I_5) - Z_{18}i_7 + \\
 + Z_{19}(-i_7 + I_5) + Z_{21}i_1, \\
 0 = (Z_{17} + Z_{20} + Z_{22})(i_9 - I_6) - Z_{17}i_{10} + \\
 + Z_{20}(i_7 - I_6) - Z_{22}i_{11}, \\
 0 = (Z_4 + Z_5 + Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{17} + Z_{23})i_{10} - Z_5i_3 + \\
 + Z_{11}i_5 - (Z_{12} + Z_{13})i_1 - Z_{17}i_9 - Z_{23}i_{11}, \\
 0 = (Z_{C9} + Z_{44} + Z_{42} + Z_{23} + Z_{22} + Z_{24} + Z_{29} + Z_{\Sigma})i_{11} + \\
 + Z_{C9}i_{22} - Z_{44}i_{21} + Z_{42}i_{16} - Z_{23}i_{10} - Z_{22}i_9 - Z_{24}i_1 - \\
 - Z_{29}i_{13} + Z_{\Sigma}i_{14}, \\
 0 = (Z_{25} + Z_{26})(i_{12} - I_8) + Z_{25}(-i_1 - I_8) - Z_{26}i_1, \\
 0 = (Z_{29} + Z_{28} + Z_{30})(i_{13} - I_7) - Z_{29}i_{11} + Z_{28}(-i_1 - I_7) + \\
 + Z_{30}i_{14}, \\
 0 = (Z_{\Sigma} + Z_{30} + Z_{27})i_{14} + Z_{\Sigma}i_{11} + Z_{30}i_{13} + Z_{27}i_1, \\
 0 = (Z_{31} + Z_{32} + Z_{33})i_{15} + Z_{32}i_{16} - Z_{33}i_{18}, \\
 0 = (Z_{32} + Z_{36} + Z_{43} + Z_{42})i_{16} + Z_{32}i_{15} + Z_{36}i_{17} + \\
 + Z_{43}i_{21} + Z_{42}i_{11}, \\
 0 = (Z_{36} + Z_{39} + Z_{37})(i_{17} - I_9) + Z_{36}i_{16} - Z_{39}i_{19} + \\
 + Z_{37}(-i_{19} - I_9), \\
 0 = (Z_{33} + Z_{34} + Z_{35})(i_{18} + I_{10}) - Z_{23}i_{15} + \\
 + Z_{34}(-i_{19} + I_{10}), \\
 0 = (Z_{34} + Z_{37} + Z_{39} + Z_{40} + Z_{38})(i_{19} + I_9 - I_{10} - I_{11}) + \\
 + Z_{34}(-i_{18} - I_{10}) + Z_{37}(-i_{17} + I_9) - Z_{39}i_{17} - Z_{40}i_{20} + \\
 + Z_{38}(-i_{20} - I_{11}), \\
 0 = (Z_{38} + Z_{40} + Z_{41})(i_{20} + I_{11}) + Z_{38}(-i_{19} + I_{11}) - \\
 - Z_{40}i_{19} - Z_{41}i_{21}, \\
 0 = (Z_{45} + Z_{41} + Z_{43} + Z_{44})i_{21} - Z_{41}i_{20} + Z_{43}i_{16} - Z_{44}i_{11}, \\
 -U_2 = Z_{C9}i_{22} + Z_{C9}i_{11},
 \end{cases} \quad (1)$$

где  $Z_1 = R_1 + R_{31} + R'_{31} + j\omega L_{31}$ ,  $Z_2 = R_{CB1}$ ,

$$Z_3 = \frac{1}{j\omega C_{3C1}}, Z_4 = R_{C1} + R'_{C1} + j\omega L_{C1}, Z_5 = \frac{1}{j\omega C_{1C1}},$$

$$Z_6 = \frac{1}{j\omega C_1}, Z_7 = RS1, Z_8 = \frac{1}{j\omega C_2}, Z_9 = RS2,$$

$$Z_{10} = \frac{1}{j\omega C_{3B1}}, Z_{11} = \frac{R_{11}}{1 + \omega^2 R_{11}^2 C_{1B1}^2} - j \frac{\omega R_{11}^2 C_{1B1}}{1 + \omega^2 R_{11}^2 C_{1B1}^2},$$

$$Z_{12} = R_{B1} + R'_{B1} + j\omega L_{B1}, Z_{13} = R_{B2} + R'_{B2} + j\omega L_{B2},$$

$$Z_{14} = \frac{R_{12}}{1 + \omega^2 R_{12}^2 C_{1B2}^2} - j \frac{\omega R_{12}^2 C_{1B2}}{1 + \omega^2 R_{12}^2 C_{1B2}^2}, Z_{15} = RS3,$$

$$Z_{16} = \frac{1}{j\omega C_3}, Z_{17} = \frac{1}{j\omega C_{3B2}}, Z_{18} = RS4, Z_{19} = \frac{1}{j\omega C_4},$$

$$Z_{20} = R_{CB2}, Z_{21} = \frac{1}{j\omega C_{1C2}}, Z_{22} = \frac{1}{j\omega C_{3C2}},$$

$$Z_{23} = R_{32} + R'_{32} + j\omega L_{32}, Z_{24} = R_{CC}, Z_{25} = \frac{1}{j\omega C_5},$$

$$Z_{26} = RS5 - \frac{j}{\omega C_{1C3}}, Z_{27} = R_{C3} + R'_{C3} + j\omega L_{C3},$$

$$Z_{28} = R_{CB3}, Z_{29} = \frac{1}{j\omega C_{TB}}, Z_{30} = \frac{1}{j\omega C_{TC}},$$

$$Z_{\Sigma} = \frac{Z'_1 Z'_2 Z'_3}{Z'_1 Z'_2 + Z'_3 Z'_1 + Z'_3 Z'_2}, Z'_1 = \frac{(R_{nop} - j\omega R_{nop}^2 C_{nop})}{\omega^2 R_{nop}^2 C_{nop}^2 + 1},$$

$$Z'_2 = \frac{(R_{nos} + R_{\delta c}) - j(R_{nos} + R_{\delta c}) \cdot (\omega C_{\delta c} + \omega C_{nos})}{(R_{nos} + R_{\delta c})^2 \cdot (\omega C_{\delta c} + \omega C_{nos})^2 + 1},$$

$$Z'_3 = \frac{(R_{ef} - j\omega R_{ef}^2 C_{ef})}{1 + \omega^2 R_{ef}^2 C_{ef}^2}, Z_{31} = R_{34} + R'_{34} + j\omega L_{34},$$

$$Z_{32} = R_{B4}, Z_{33} = \frac{1}{j\omega C_{3B4}}, Z_{34} = R_{CB4},$$

$$Z_{35} = \frac{1}{j\omega C_{3C4}}, Z_{36} = \frac{1}{j\omega C_{1B4}}, Z_{37} = \frac{1}{j\omega C_6},$$

$$Z_{38} = \frac{1}{j\omega C_7}, Z_{39} = RS6, Z_{40} = RS7,$$

$$Z_{41} = \frac{1}{j\omega C_{1C4}}, Z_{42} = \frac{1}{j\omega C_8}, Z_{43} = R_{14},$$

$$Z_{44} = R_2, Z_{45} = R_{C4} + R'_{C4} + j\omega L_{C4}, Z_{C9} = \frac{1}{j\omega C_9}.$$

На рис.4 и рис.5 представлены экспериментальные вольт – амперные характеристики частотного преобразователя влажности с активным индуктивным элементом. Из рис.4 и рис.5 видно, что при увеличении напряжения управления увеличивается участок отрицательного сопротивления. Так, (рис.4) при  $U_1=3$  В участок отрицательного сопротивления по  $U_2$  лежит от 2,12 до 2,3 В, а при  $U_1=5$  В – от 4,2 В до 4,63 В. Участок отрицательного сопротивления (рис.5) при  $U_1=5$  В лежит от 3,5 В до 4,5 В, а при  $U_1=10$  В – от 9,7 В до 11 В.

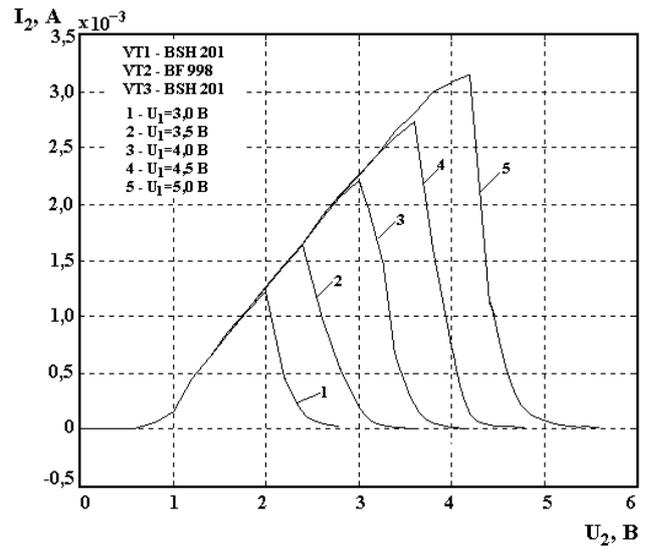


Рис.4. Экспериментальные ВАХ частотного преобразователя влажности с активным индуктивным элементом на основе МДП – транзисторных структур BSH 201и BF 998

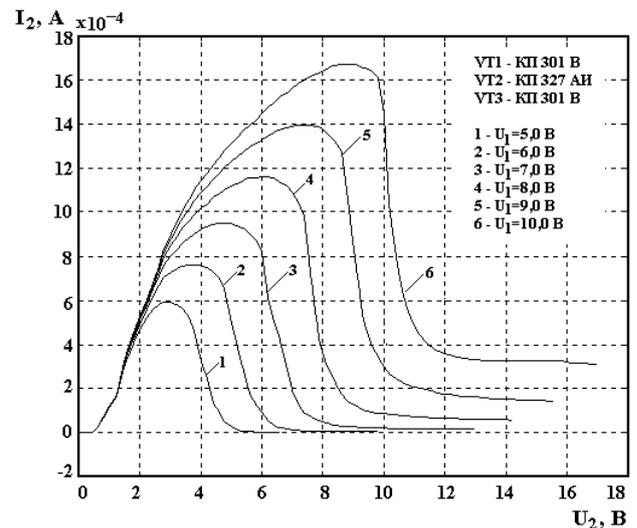


Рис.5. Экспериментальные ВАХ частотного преобразователя влажности с активным индуктивным элементом на основе МДП – транзисторных структур КП 301В и КП 327 В

С помощью пакета прикладных программ “Mathlab 5.2” на основе системы уравнений (1) рассчитана активная и реактивная составляющие полного сопротивления частотного преобразователя влажности с активным индуктивным элементом, зависимости которых от напряжения питания представлены на рис.6 и рис.7. Из рис.6 и рис.7 видно, что с увеличением напряжения питания  $U_2$  и относительной влажности  $W$  активная и реактивная составляющие полного сопротивления уменьшаются. При  $W=0\%$  (рис.6) диапазон изменения активной составляющей полного сопротивления составляет 4120 Ом, а при  $W=100\%$  - 1562,5 Ом. Диапазон изменения реактивной составляющей полного сопротивления (рис.7) при  $W=0\%$  составляет 1175 Ом, а при  $W=100\%$  - 687 Ом.

## Экспериментальные исследования

Зависимость активной и реактивной составляющих полного сопротивления от относительной влажности представлены на рис.8 и рис.9. Увеличение относительной влажности окружающей среды приводит к уменьшению активной и реактивной составляющих полного сопротивления.

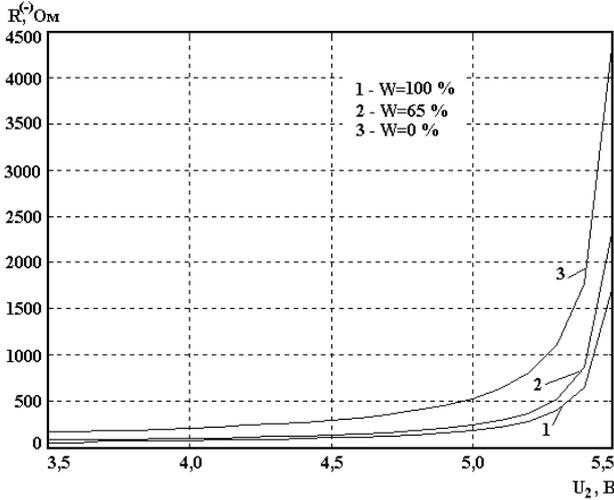


Рис.6. Теоретические зависимости активной составной полного сопротивления от напряжения питания при изменении относительной влажности окружающей среды

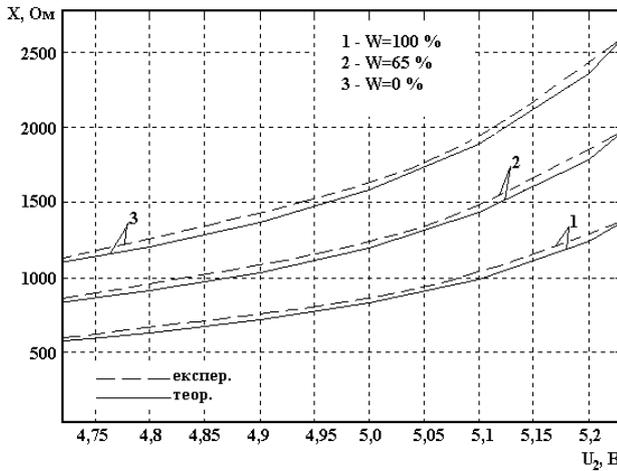


Рис.7. Экспериментальные и теоретические зависимости реактивной составной полного сопротивления от напряжения питания при разных значениях относительной влажности

На рис.10 и рис.11 представлены экспериментальные и теоретические зависимости частоты генерации от напряжения питания. Из рис.10 и рис.11 видно, что частота генерации уменьшается с увеличением напряжения питания. При напряжении управления (рис.10)  $U_1=5$  В ( кривая (5)), генератор продолжительно генерирует, то есть данный режим работы является более благоприятным. Диапазон генерации составляет – 67,2 кГц.

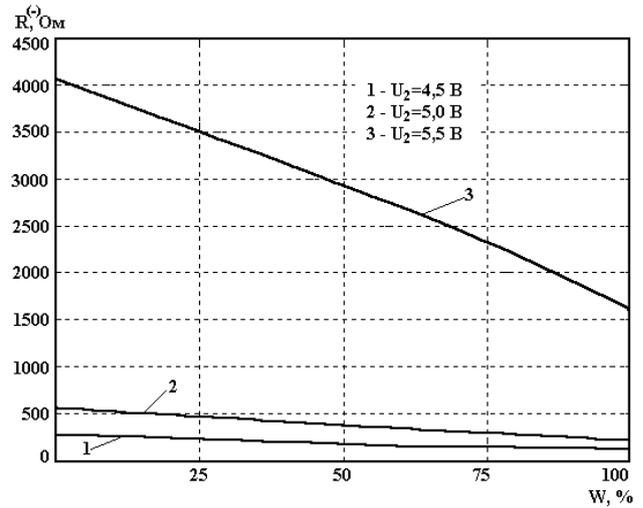


Рис.8. Теоретическая зависимость активной составляющей полного сопротивления от относительной влажности при разных напряжениях питания

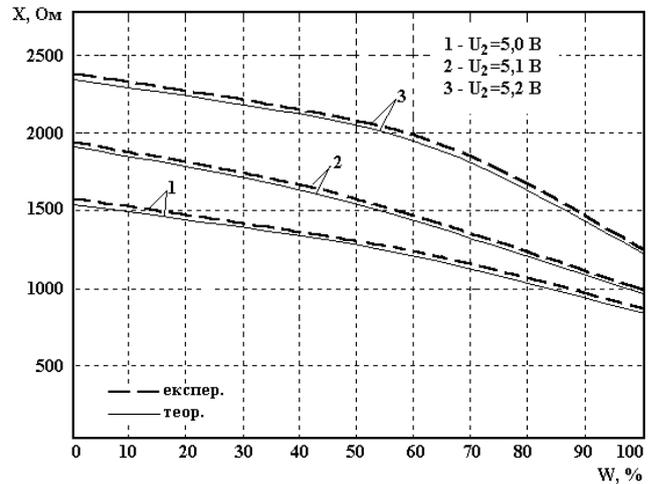


Рис.9. Экспериментальная и теоретическая зависимость реактивной составляющей полного сопротивления от относительной влажности при разных напряжениях питания

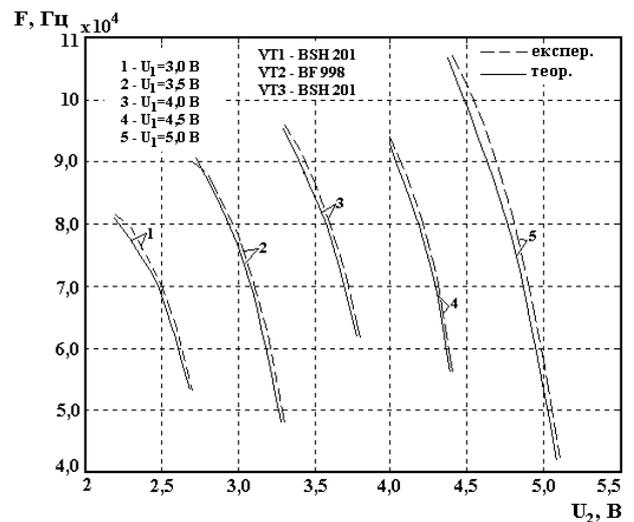


Рис.10. Экспериментальные и теоретические зависимости частоты генерации от напряжения питания при разных напряжениях управления

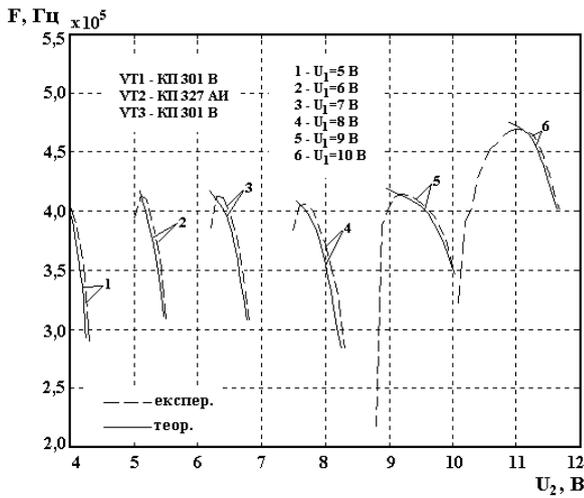
Функция преобразования частотного преобразователя влажности с активным индуктивным элементом описывается следующим выражением:

$$F_0 = - \left( \frac{C_8 C_{3B2} C_{TC} C_W(W) + C_6 C_{3B2} C_{TC} C_W(W)}{2\pi N_1} + \frac{C_6 C_8 C_{TC} C_W(W) + C_6 C_8 C_{3B2} C_W(W) + C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC}}{2\pi N_1} \right), \quad (2)$$

где

$$N_1 = E1C_W(W) - R_{CB4}E1C_W(W) - RS6E1C_W(W) - R_{П4}E1C_W(W) - (R_{CB2} + R_{CC} + R_{CB3})E1C_W(W),$$

$$E1 = C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC}.$$



**Рис.11.** Экспериментальные и теоретические зависимости частоты генерации от напряжения питания при разных напряжениях управления

На основе выражения (2) определена чувствительность преобразователя:

$$S_W^{F_0} = - \frac{C_8 C_{3B2} C_{TC} \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right) + C_6 C_{3B2} C_{TC} \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right)}{2\pi G_1} + \frac{C_6 C_8 C_{TC} \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right) + C_6 C_8 C_{3B2} \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right)}{2\pi G_1} + \frac{G_2 \left( C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right) - G_3 \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right) \right)}{2\pi G_1^2} - \frac{G_2 \left( G_4 \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right) - G_5 \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right) - G_6 \left( \frac{\partial C_W(W)}{\partial W} \right) \right)}{2\pi G_1^2}, \quad (3)$$

где

$$G_1 = C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} C_W(W) - C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} R_{CB4} C_W(W) - C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} RS6 C_W(W) - C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} R_{П4} C_W(W) - (R_{CB2} + R_{CC} + R_{CB3}) C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} C_W(W),$$

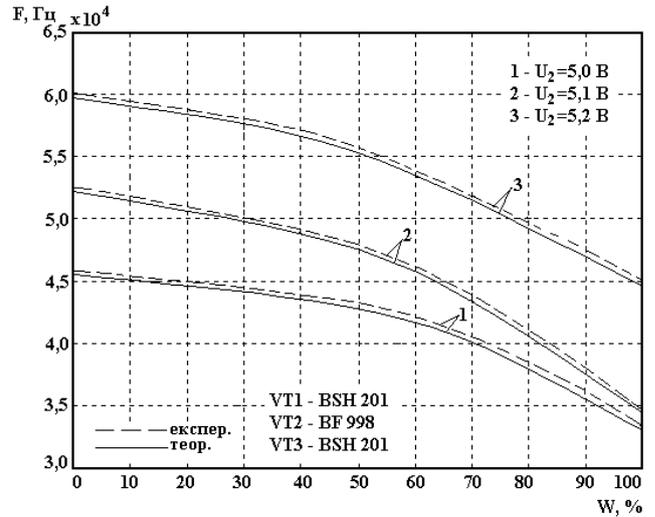
$$G_2 = C_8 C_{3B2} C_{TC} C_W(W) + C_6 C_{3B2} C_{TC} C_W(W) + C_6 C_8 C_{TC} C_W(W) + C_6 C_8 C_{3B2} C_W(W) + C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC},$$

$$G_3 = C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} R_{CB4}, \quad G_4 = C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} RS6,$$

$$G_5 = C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC} R_{П4},$$

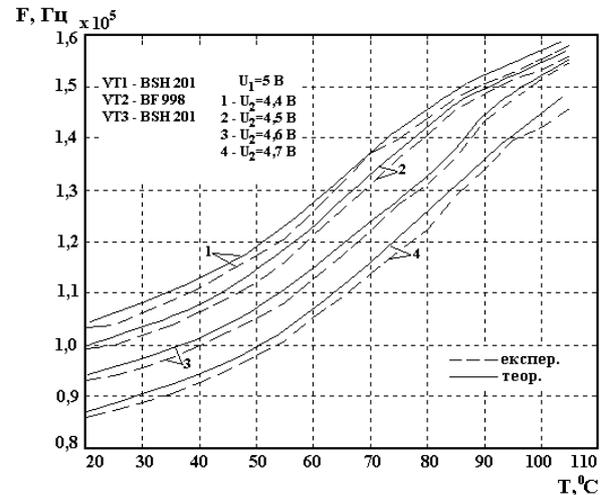
$$G_6 = (R_{CB2} + R_{CC} + R_{CB3}) C_6 C_8 C_{3B2} C_{TC}.$$

На рис.12 представлены зависимости частоты генерации от изменения относительной влажности окружающей среды. Как видно из графика, частота генерации уменьшается при увеличении относительной влажности.



**Рис.12.** Экспериментальные и теоретические зависимости частоты генерации от относительной влажности окружающей среды

На рис.13 представлены экспериментальные и теоретические зависимости частоты генерации от изменения температуры окружающей среды. Повышение температуры окружающей среды приводит к возрастанию частоты генерации колебательного контура.



**Рис.13.** Зависимость частоты генерации от температуры окружающей среды

## Выводы

Разработана математическая модель частотного преобразователя с двухзатворным влагочувствительным МДП - транзистором, на основе решения которой получена аналитическая зависимость функции преобразования, чувствительности, активной и реактивной составляющей полного сопротивления структуры от относительной влажности окружающей среды и режимов электрического питания. Предложена конструкция влагочувствительного двухзатворного МДП – транзистора, в котором влагочувствительный слой аморфной двуокиси кремния создан под вторым затвором транзистора. Экспериментальные исследования показали, что частотный преобразователь влажности с активным индуктивным элементом на основе транзисторных структур BSH201, BF998 более чувствительный к изменению относительной влажности окружающей среды по сравнению с преобразователем на основе транзисторных структур КП301В, КП327АИ, так для первой конструкции чувствительность составляет  $S_W^{f_0} = 1,55 \text{ кГц}/\%$ , а для второй -  $S_W^{f_0} = 290 \text{ Гц}/\%$ . Расхождение теоретических и экспериментальных исследований составляет  $\pm 3 \%$ .

## Литература

1. Патент В4 3 – 76860 Япония, МКИ G 01 N 27/22. Датчик для измерения физических величин на полевых транзисторах / Сяпу К.К. - № 59 – 99320; Заявлен 16.05.84; Оpubл. 06.12.91, Бюл. № 6 – 1922, (РЖ"ИСМ" 84-11-93).
2. Патент В4 4 – 15902 Япония, МКИ G 01 N 27/02. Гигрометрический датчик на полевом транзисторе / Сяпу К.К. - № 59 – 23598; Заявлен 10.02.84; Оpubл. 19.03.92, Бюл. № 6 – 398, (РЖ "ИСМ" 84-19-93).
3. Патент В4 4 – 15903 Япония, МКИ G 01 N 27/02. Гигрометрический датчик на полевом транзисторе / Сяпу К.К. - № 59 – 182088; Заявлен 29.08.84; Оpubл. 19.03.92; Бюл. № 6 – 398, (РЖ "ИСМ" 84-19-93).
4. Патент 46385 УКРАИНА, МКИ G 01 N 27/12. Измеритель влажности / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Л.В. Крылик (УКРАИНА). - № 2001074689; Заявлен 05.07.2001; Оpubл. 15.05.2002, Бюл. № 5.
5. Патент 46483 УКРАИНА, МКИ G 01 N 27/12. Полупроводниковое устройство для измерения влажности / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Л.В. Крылик (УКРАИНА). - № 2001075284; Заявлен 24.07.2001, Оpubл. 15.05.2002, Бюл. № 5.
6. Матсон Э.А., Крыжановский Д.В., Петкевич В.И. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА: Учебное пособие. – Минск:Вышэйшая школа, 1979. –192 с.
7. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем: Учебное пособие для вузов.– М.: Радио и связь, 1983.–323 с.
8. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. – Винница: "Универсум – Винница", 1999. – 275 с.
9. Осадчук О.В. Микроэлектронные частотные преобразователи на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением. – Винница: Универсум – Винница, 2000. – 303 с.

**Osadchuk V.S., Osadchuk A.V., Krylyk L.V. Mathematical model of a microelectronic frequency transducer with humidity sensitivity a MOSFET - transistor // Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija, 2003. № 3 (38). - P. 73-77 .**

The mathematical model of a frequency transducer with twain gate humidity sensitivity a MOSFET - transistor is designed, on the basis of which decision the analytical dependence of function of conversion, sensitivity, active and reactive component of a complete resistance of structure from a relative humidity of an environment and modes of electric supply is obtained. The construction humidity sensitivity twain gate a MOSFET - transistor is offered, in which humidity sensitivity the layer of an amorphous dioxide of silicon is created under the second lock of the transistor. The sensitivity of a converter on the basis of such structure makes  $S_W^{f_0} = 1,55 \text{ kHz}/\%$ .

**Осадчук В.С., Осадчук А.В., Крылик Л.В. Математическая модель микроэлектронного частотного преобразователя с влагочувствительным МДП – транзистором // Электроника и электротехника. – Каунас: Технологія, 2003. № 3 (38). – С.73-77.**

Разработана математическая модель частотного преобразователя с двухзатворным влагочувствительным МДП - транзистором, на основе решения которой получена аналитическая зависимость функции преобразования, чувствительности, активной и реактивной составляющей полного сопротивления структуры от относительной влажности окружающей среды и режимов электрического питания. Предложена конструкция влагочувствительного двухзатворного МДП – транзистора, в котором влагочувствительный слой аморфной двуокиси кремния создан под вторым затвором транзистора. Чувствительность преобразователя на основе такой структуры составляет  $S_W^{f_0} = 1,55 \text{ кГц}/\%$ .