

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК: 621.382

В. С. Осадчук, д-р техн. наук, проф. ;
О. В. Осадчук, д-р техн. наук, проф. ;
О. С. Звягін, асп.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ

Розроблено математичну модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості, на основі якої отримано аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості. Чутливість розробленого перетворювача вологості зі зміною вологості від 0 % до 10 % складає 1,5 кГц / %, а в діапазоні зміни вологості від 10 % до 20 % дорівнює 2 кГц / %.

Вступ

Важливим різновидом вимірювальних перетворювачів є сенсори вологості, оскільки багато процесів залежать від вологості. На даний час в Україні вимірювання вологості є одним із поширених напрямків вимірювань. Це зумовлено потужним промисловим та науково-технічним потенціалом країни з переважним розвитком таких галузей як металургія, енергетика, машинобудування, авіаційна та космічна техніка, хімічна та нафтогазова промисловість, ефективність яких значною мірою залежить від точності вимірювань вологості, температури та інших характеристик. Суттєве значення має вимірювання вологості нафти, масел та нафтопродуктів. Контроль вологості нафти необхідний у процесах її видобування, зберігання, транспортування та переробки [1]. Необхідність контролю вологості масел викликана, по-перше, можливістю корозій деталей, що вступають в контакт з обводненим маслом, по-друге — тим, що в ізоляційних маслах волога, в кількості, що перевищує допустиму норму, може призвести до передчасного зносу масла та електричного пробую.

Теоретичні дослідження показали, що використання транзисторних структур з від'ємним опором і реактивних властивостей напівпровідникових приладів суттєво підвищує чутливість і точність вимірювання дослідженого сигналу, у нашому випадку вологості [2—4]. З метою вивчення властивостей частотного перетворювача вологості [4], вологочутливим елементом якого є циліндричний конденсатор [5], необхідно розробити математичну модель, яка б дозволяла отримати аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості.

Математична модель

На рис. 1 показано електричну схему мікроелектронного перетворювача вологості. Перетворювач вологості працює таким чином. В початковий момент часу волога не діє на вологочутливий конденсатор C_w . З підвищенням напруги джерела постійної напруги U_1 до величини, коли на електродах емітер-затвор транзисторів VT1 та VT2 виникає від'ємний опір, що приводить до виникнення електричних коливань в контурі, утвореному паралельним включенням повного опору з емнісною складовою на електродах емітер-затвор транзисторів VT1 та VT2 та

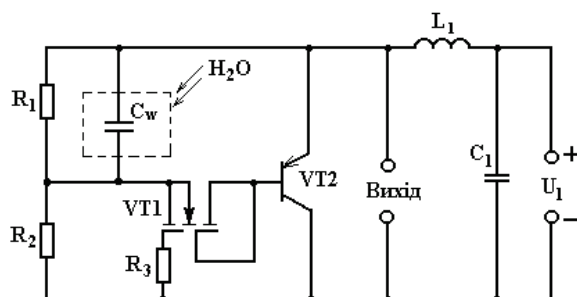


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості

індуктивності L_1 . В подальшому з дією вологи на вологочутливий конденсатор C_w змінюється ємнісна складова повного опору на електродах емітер-затвор транзисторів VT1 та VT2, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Визначимо функцію перетворення частотного перетворювача на основі еквівалентної схеми рис. 2, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни вологості. Для зручності розрахунків використаємо подану на рис. 3 перетворену еквівалентну схему мікроелектронного частотного перетворювача вологості.

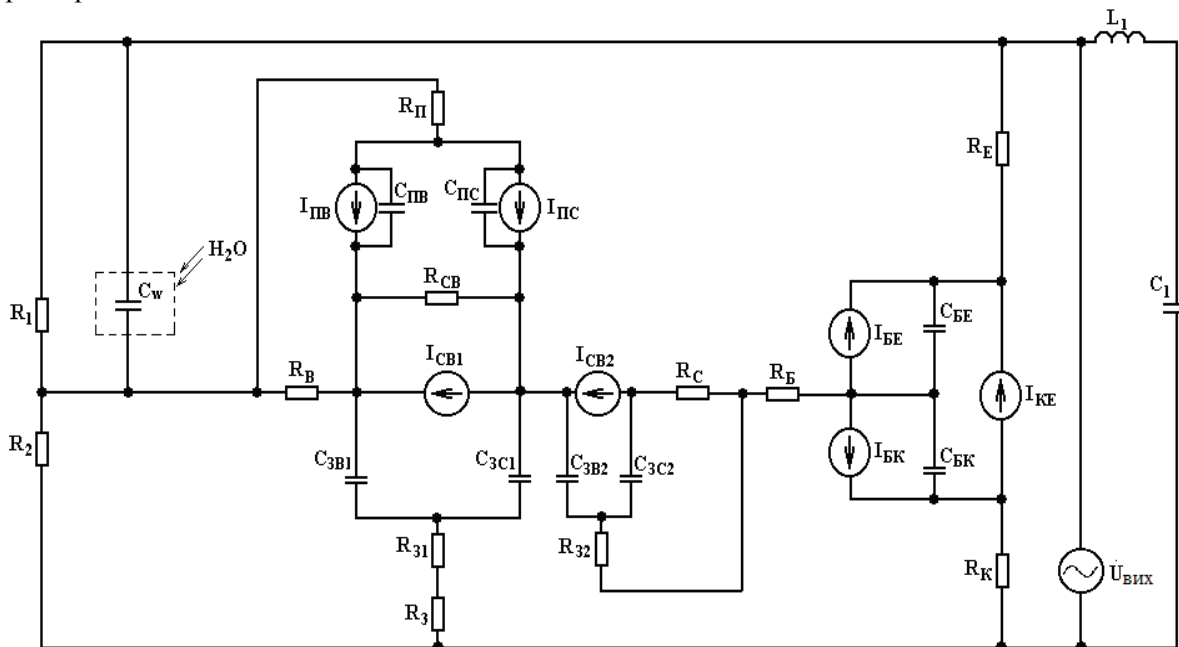


Рис. 2. Еквівалентна схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості

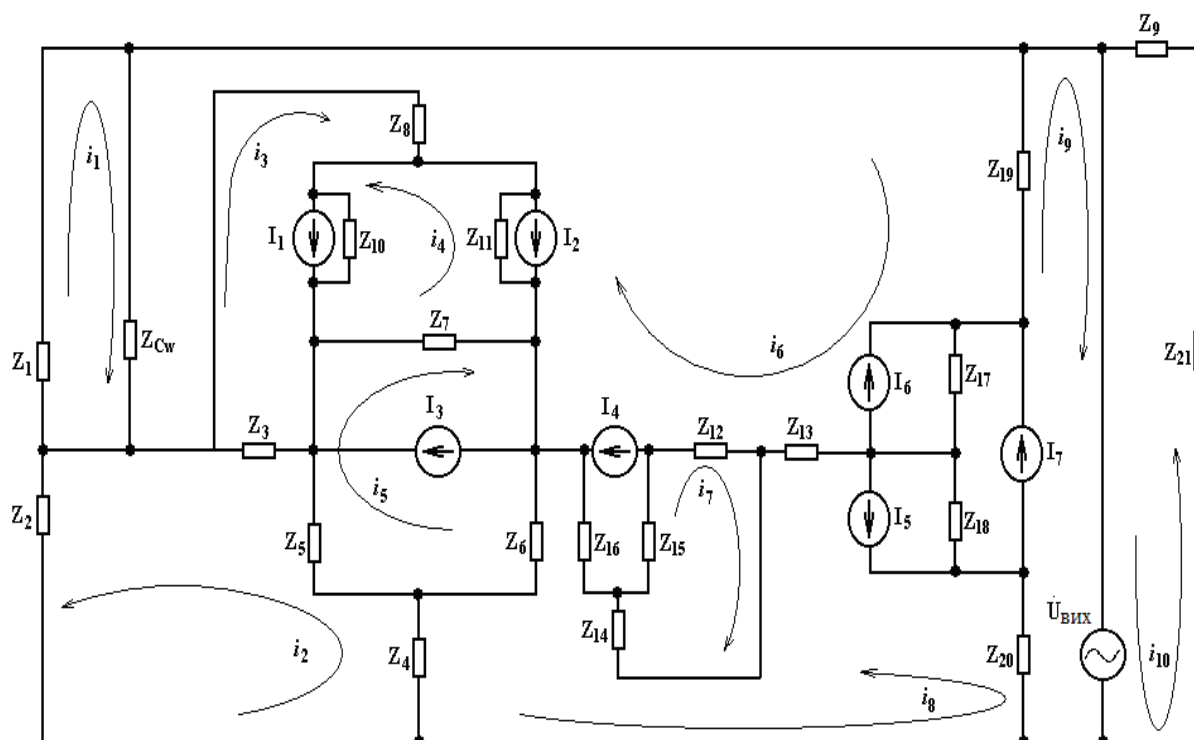


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості

Наведемо систему рівнянь Кірхгофа, складену на основі вибраних напрямків контурних струмів:

$$\begin{cases}
 0 = (Z_1 + Z_{Cw})i_1 - Z_{Cw}i_6; \\
 0 = (Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)i_2 + Z_3i_3 + Z_5i_5 - Z_4i_8; \\
 0 = (Z_3 + Z_8 + Z_{10})(i_3 - I_1) + Z_3i_2 - Z_8i_6 + Z_{10}(i_4 - I_1); \\
 0 = (Z_7 + Z_{10} + Z_{11})(i_4 - I_1 + I_2 + I_3) + Z_7(i_5 + I_3) + Z_{10} \cdot (i_3 - I_1) + Z_{11}(i_6 + I_2); \\
 0 = (Z_5 + Z_6 + Z_7)(i_5 + I_3) + Z_5i_2 + Z_6i_8 + Z_7(i_4 + I_3); \\
 0 = (Z_8 + Z_{11} + Z_{Cw} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{17} + Z_{19})(i_6 + I_6 - I_4 + I_2) - Z_8i_3 - Z_{Cw}i_1 + \\
 \quad + Z_{11}(i_4 + I_2) - (Z_{12} + Z_{15})i_7 + (Z_{13} + Z_{16})i_8 - Z_{17}(i_9 - I_7 - I_6) - Z_{19}i_9; \\
 0 = (Z_{12} + Z_{14} + Z_{15})i_7 - Z_{12}i_6 + Z_{14}i_8 - Z_{15}(i_6 - I_4); \\
 0 = (Z_4 + Z_6 + Z_{14} + Z_{16} + Z_{13} + Z_{18} + Z_{20})(i_8 + I_5) - Z_4i_2 + Z_6i_5 + Z_{16}(i_6 - I_4) + \\
 \quad + Z_{14}i_7 + Z_{13}i_6 + Z_{18}(i_9 - I_7 + I_5) + Z_{20}i_9; \\
 \dot{U}_{\text{вих}} = (Z_{17} + Z_{18} + Z_{19} + Z_{20})(i_9 - I_7 - I_6 + I_5) - Z_{19}i_6 + Z_{20}i_8 + Z_{18}(i_8 + I_5) - Z_{17}(i_6 + I_6); \\
 \dot{U}_{\text{вих}} = (Z_9 + Z_{21})i_{10}.
 \end{cases} \quad (1)$$

де $Z_1 = R_1$; $Z_2 = R_2$; $Z_3 = R_B$; $Z_{Cw} = \frac{1}{j\omega C_W}$; $Z_4 = R_3 + R_{31}$; $Z_5 = \frac{1}{j\omega C_{3B1}}$; $Z_6 = \frac{1}{j\omega C_{3C1}}$;
 $Z_7 = R_{CB}$; $Z_8 = R_{\Pi}$; $Z_9 = j\omega L_1$; $Z_{10} = \frac{1}{j\omega C_{\Pi B}}$; $Z_{11} = \frac{1}{j\omega C_{\Pi C}}$; $Z_{12} = R_C$; $Z_{13} = R_B$;
 $Z_{14} = R_{32}$; $Z_{15} = \frac{1}{j\omega C_{3C2}}$; $Z_{16} = \frac{1}{j\omega C_{3B2}}$; $Z_{17} = \frac{1}{j\omega C_{BE}}$; $Z_{18} = \frac{1}{j\omega C_{BK}}$; $Z_{19} = R_E$; $Z_{20} = R_K$;
 $Z_{21} = \frac{1}{j\omega C_1}$.

Функція перетворення мікроелектронного частотного перетворювача вологості в загальному вигляді описується виразом

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{ekv}(W)}}. \quad (2)$$

де $C_{ekv}(W)$ — еквівалентна ємність перетворювача вологості, яка залежить від зміни величини масової частки вологи W .

Підставивши значення для еквівалентної ємності перетворювача, отримаємо:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{A_1}{(C_{BK}C_{3B}C_{3C} + \sqrt{A_2})^2} + C_W(W)\right)}}. \quad (3)$$

де $A_1 = 4LC_{BK}^2C_{3B}^2C_{3C}^2$; $A_2 = C_{BK}^2C_{3B}^2C_{3C}^2 + 4LC_{BK}C_{3B}^2C_{3C}^2 + 4LC_{BK}^2C_{3B}C_{3C}^2 + 4LC_{BK}^2C_{3B}^2C_{3C}$.

На основі виразу (3) визначено чутливість перетворювача

$$S_W^F = \frac{dF}{dC_W(W)} = -\frac{L}{4\pi\left[L\left(\frac{A_1}{(C_{BK}C_{3B}C_{3C} + \sqrt{A_2})^2} + C_W(W)\right)\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (4)$$

Експериментальні дослідження

Для проведення експериментальних досліджень у схемі, що зображена на рис. 1, використано транзистори BC557 та КП350, циліндричний вологочутливий конденсатор [5] виготовлений з зовнішнім діаметром 50 мм, та довжиною 46 мм. Початкова ємність вологочутливого конденсатора за нульової вологості складала 145 пФ.

На рис. 4 показано експериментальну ВАХ досліджуваного перетворювача вологості. З характеристики видно присутність ділянки від'ємного опору з напругою живлення U_1 від 1,6 В до 4,0 В.

Експериментальну залежність частоти генерації F від напруги живлення U_1 подано на рис. 5. З графіка випливає, що зі збільшенням напруги живлення U_1 від 1,7 В до 4,0 В частота генерації зменшується від 542 кГц до 458 кГц.

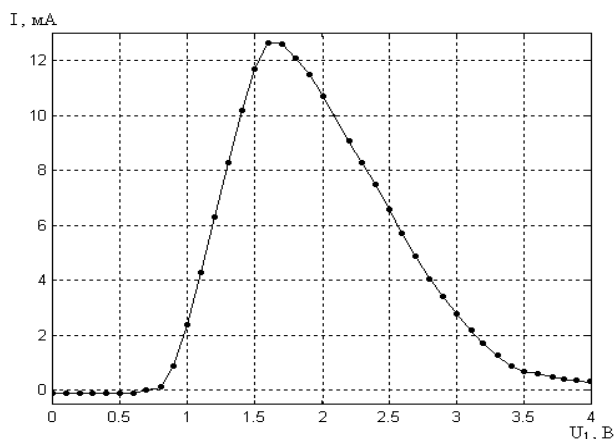


Рис. 4. Експериментальна ВАХ перетворювача вологості

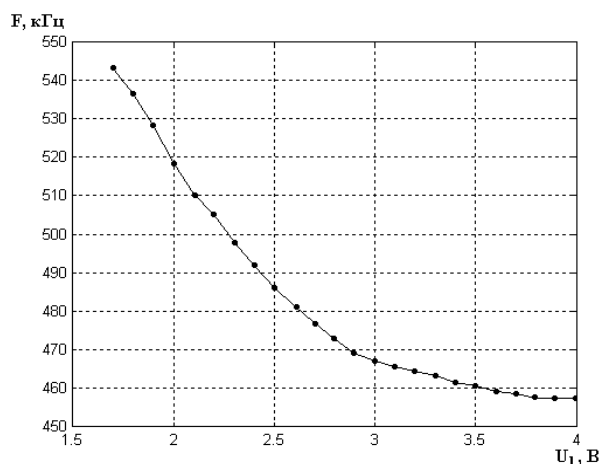


Рис. 5. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення

Експериментальну залежність еквівалентної ємності перетворювача $C_{екв}$ від напруги живлення U_1 показано на рис. 6.

З цього графіка видно, що зі збільшенням напруги живлення U_1 від 1,7 В до 4,0 В ємність перетворювача збільшується від 1,35 нФ до 1,89 нФ.

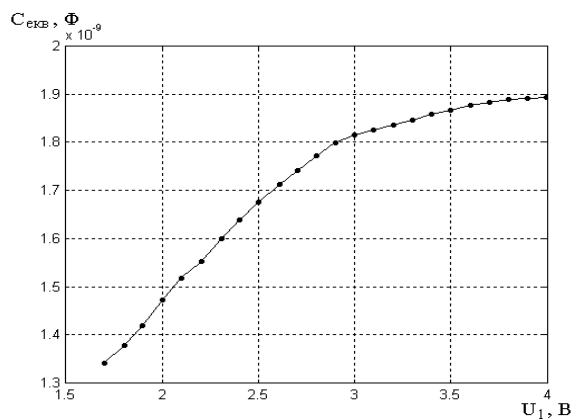


Рис. 6. Експериментальна залежність еквівалентної ємності перетворювача вологості від напруги живлення

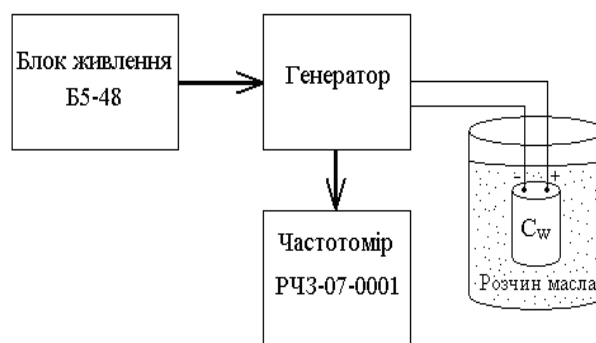


Рис. 7. Блок-схема вимірювальної установки для дослідження залежності частоти генерації перетворювача від масової частки вологості нафтопродуктів

На рис. 7 подано блок-схему вимірювальної установки для дослідження залежності частоти генерації перетворювача від вологості нафтопродуктів. В цьому випадку досліджувалась залежність частоти генерації від масової частки вологості мінерального масла «М8В». Під час експериментального дослідження залежності частоти генерації F від вологості мінерального масла «М8В» з різними напругами живлення було визначено, що найбільший діапазон зміни частоти існує для напруги живлення $U_1=1,7$ В. Для напруги живлення $U_1=1,7$ В частота F зменшується від 542 кГц

до 507 кГц.

З експериментальної та теоретичної залежностей частоти генерації від вологості, що подані на рис. 8, можна бачити, що розбіжність результатів складає близько 5 %.

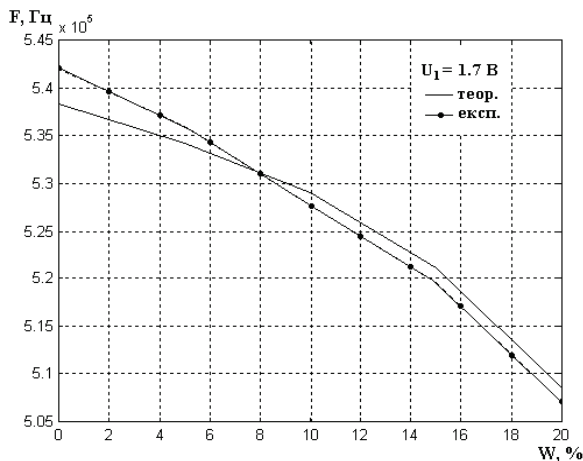


Рис. 8. Експериментальна та теоретична залежність частоти генерації від вологості мінерального масла «М8В»

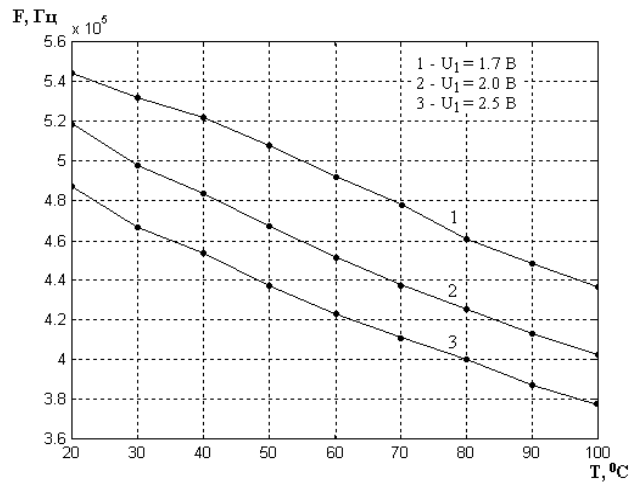


Рис. 9. Залежність частоти генерації від температури

Для визначення чутливості мікроелектронного перетворювача вологості нафтопродуктів застосуємо до функції перетворення кусково-лінійну апроксимацію. Так, чутливість перетворювача вологості зі зміною вологості від 0 % до 10 % складає 1,5 кГц/%, а в діапазоні зміни вологості від 10 % до 20 % чутливість рівна 2 кГц/%.

Зміна частоти генерації від температури навколишнього середовища для різних напруг живлення показана на рис. 9.

Висновки

Показана можливість створення мікроелектронного частотного перетворювача вологості на основі транзисторної структури з від'ємним опором та циліндричного вологочутливого конденсатора. Отримано аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів складає 5 %. Чутливість розробленого перетворювача вологості зі зміною вологості від 0 % до 10 % складає 1,5 кГц/%, а в діапазоні зміни вологості від 10 % до 20 % — рівна 2 кГц/%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 303 с.
2. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 275 с.
3. Пат. 32338 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Пристрій для контролю відносної вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін (УКРАЇНА). — № u200800395; Заявл. 11.01.2008; Опубл. 12.05.2008; Бюл. № 9. — 3 с.
4. Звягін О. С. Мікроелектронний частотний перетворювач для вимірювання вологості нафтопродуктів / О. С. Звягін, О. В. Осадчук // II-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology-2009): міжнар. наук.-техн. конф., Вінниця 23—26 вер. 2009 р. : тези допов. — IX., 2009. — С. 308—312.
5. Пат. 39894 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний сенсор для вимірювання вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін (УКРАЇНА). — №u200814033; Заявл. 05.12.2008; Опубл. 10.03.2009; Бюл. № 5. — 2 с.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Надійшла до редакції 26.10.09
Рекомендована до друку 16.12.09

Осадчук Володимирович Степанович — професор кафедри електроніки;

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри, **Звягін Олександр Сергійович** — аспірант.

Кафедра радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет