

Науковий журнал

4.2010

ВІСНИК

**Хмельницького
національного
університету**

Технічні науки

Хмельницький 2010

ВІСНИК

Хмельницького національного університету

Затверджений як фахове видання
Постановою президії ВАК України від 19.01.2006 № 2-05/1
(бюлетень ВАК України № 2 від 2006 р.)

Засновано в липні 1997 р.

Виходить 6 разів на рік

Хмельницький, 2010, № 4 (160)

**Засновник і видавець: Хмельницький національний університет
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)**

Головний редактор	Скиба М. Є. , заслужений працівник народної освіти України, д. т. н., професор, академік МАІ, академік УТА, ректор Хмельницького національного університету
Заступник головного редактора	Параска Г. Б. , д. т. н., професор, проректор Хмельницького національного університету
Голова редакційної колегії	Шинкарук О. М. , д. т. н., професор, завідувач кафедри радіотехніки та зв'язку Хмельницького національного університету
Відповідальний секретар	Гуляєва В. О. , завідувач відділом інтелектуальної власності Хмельницького національного університету

Ч л е н и р е д к о л е г і ї

Технічні науки

к.т.н. Баннова І.М., д.т.н. Гладкий Я.М., к.т.н. Домбровський А.Б., к.т.н. Драпак Г.М., д.т.н. Диха О.В., д.т.н. Калда Г.С., д.ф-м.н. Качурик І.І., д.т.н. Кіницький Я.Т., д.т.н. Ковтун В.В., д.т.н. Костогриз С.Г., д.т.н. Кострицький В.В., д.т.н. Кузьменко А.Г., д.т.н. Локазюк В.М., д.т.н. Либа В.П., д.т.н. Мазур М.П., к.т.н. Мандзюк І.А., д.т.н. Мясичев О.А., д.т.н. Олександренко В.П., д.т.н. Пастух І.М., д.т.н. Поморова О.В., д.т.н. Ройзман В.П., д.т.н. Рудницький В.Б., д.т.н. Сарібеков Г.С., д.т.н. Сілін Р.І., д.т.н. Семенюк М.Ф., д.т.н. Славинська А.Л., д.т.н. Стечишин М.С., к.т.н. Троцишин І.В., д.т.н. Шалапко Ю.І., д.т.н. Шевеля В.В.

Технічний редактор Горященко К. Л., к. т. н.

Редактор-коректор Броженко В. О.

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 2 від 22.09.2010 р.**

Адреса редакції: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"
Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11,
м. Хмельницький
Україна, 29016

☎ (038-22) 2-51-08
e-mail: vagvestnik@rambler.ru
patent_1@beta.tup.km.ua

web: <http://visniktup.narod.ru>
<http://vestnik.ho.com.ua>
http://library.tup.km.ua/visnyk_tup.htm

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ № 9722 від 29 березня 2005 року (перереєстровано)
Бюлетень ВАК №2, 2006

© Хмельницький національний університет, 2010
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2010

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ

Розроблено математичну модель частотного перетворювача вологості нафтопродуктів, яка дозволяє визначити значення напруги або струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. Отримано залежності функції перетворення та чутливості перетворювача вологості. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів складає 1,5 %.

The mathematical model of the frequency humidity transformer of petroleum products which allows to define value of the voltage or current in any point of the scheme during the definite moment of time is designed. The dependences of function of transformation and sensitivity of the humidity transformer are obtained. The divergence of theoretical and experimental results is 1,5 %.

Ключові слова: вологість, перетворювач вологості, від'ємний опір, нафтопродукт.

Вступ

Вимірювання вологості в Україні є одним із поширених напрямків вимірювань. Суттєве значення має вимірювання вологості нафти, масел та нафтопродуктів. Контроль вологості нафти необхідний у процесах її видобування, зберігання, транспортування та переробки. Саме наявність вмісту води в нафтопродуктах викликає зміну їх фізико-хімічних параметрів і тим самим зменшує строк їхньої служби [1].

Теоретичні дослідження показали, що використання транзисторних структур з від'ємним опором і реактивних властивостей напівпровідникових приладів, суттєво підвищує чутливість і точність виміру досліджуваного сигналу, в нашому випадку вологості нафтопродуктів [2, 3]. З метою вивчення властивостей частотного перетворювача вологості нафтопродуктів (ЧПВН), вологочутливим елементом якого є конденсаторна циліндрична структура (КЦС) [4, 5], необхідно розробити математичну модель, яка б дозволила отримати залежності функції перетворення та чутливості ЧПВН.

Математична модель

На рис. 1 зображено електричну схему ЧПВН, в якому при дії води на вологочутливу конденсаторну циліндричну структуру C_w змінюється ємнісна складова повного опору на електродах колектор-стік транзисторів $VT1$ та $VT2$, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Для визначення функції перетворення та чутливості на рис. 2 наведено еквівалентну схему ЧПВН, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни вологості нафтопродуктів.

Для зручності розрахунків об'єднавши паралельні ємності C_w і C_{bal} у $C_i = C_w + C_{bal}$, та струми I_f і I_r у $I_{bt} = (I_f - I_r)/QB$, а також скориставшись методом змінних станів наведемо на рис. 3 перетворену еквівалентну схему ЧПВН.

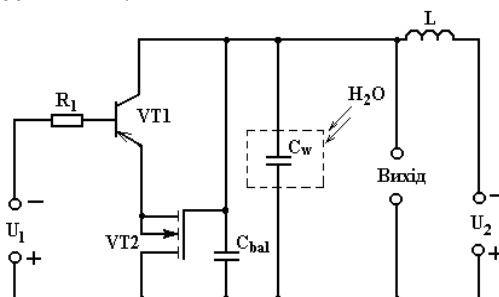


Рис. 1. Електрична схема ЧПВН

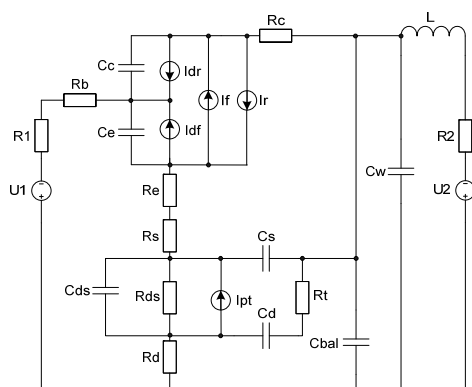


Рис. 2. Еквівалентна схема ЧПВН

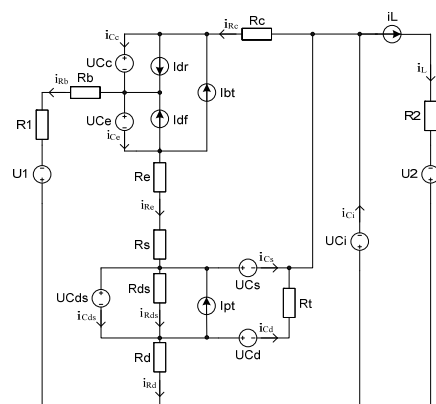


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема ЧПВН

На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = U_2 - (U_{C_i} + i_L R_2), \\ i_{R_{ds}} = \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}}, \\ i_{C_d} = \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_t}, \\ i_{R_b} = \frac{U_1 - U_{C_c} - U_{C_i} - i_{R_c} R_c}{R_b + R_1}, \\ i_{C_{ds}} = i_{R_d} + I_{pt} + i_{C_d} - i_{R_{ds}}, \\ i_{R_c} = \frac{-(U_{C_e} + U_{C_c} + U_{C_s} + i_{R_e} (R_e + R_s))}{R_c}, \\ i_{R_d} = \frac{U_{C_d} - U_{C_i} + i_{C_d} R_t}{R_d}, \\ i_{R_e} = i_{R_c} - i_{R_b}, \\ i_{C_s} = i_{R_e} + I_{pt} - i_{C_{ds}} - i_{R_{ds}}, \\ i_{C_i} = i_L + i_{R_c} - i_{C_s} - i_{C_d}, \\ i_{C_c} = i_{R_c} + I_{bt} - I_{dr}, \\ i_{C_e} = i_{R_e} + I_{bt} + I_{df}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де R_1 – навантажувальний опір;
 R_b, R_e, R_c, R_d, R_s – об'ємні опори бази, емітера, колектора, стоку та витоку;
 R_{ds} – опір стік-витік;
 C_e, C_c – ємності емітерного та колекторного переходів;
 C_d, C_s, \tilde{N}_{ds} – ємності затвор-стік, затвор-витік та стік-витік;
 C_{bal} – баластна ємність;
 C_w – ємність вологочутливої КЦС;
 L – індуктивність;
 U_1, U_2 – джерела живлення постійної напруги;
 I_{pt} – струм польового транзистора;
 I_{dr}, I_{df} – струми внутрішніх переходів база-колектор та база-емітер;
 I_f, I_r – прямий та зворотній струми біполярного транзистора.

Вважаючи заданими значення відповідних напруг на ємностях та струм через індуктивність розв'яжемо систему (1) відносно $U_L, i_{C_{ds}}, i_{C_d}, i_{C_s}, i_{C_i}, i_{C_e}, i_{C_c}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = U_2 - (U_{C_i} + i_L R_2), \\ i_{C_d} = \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_t}, \\ i_{C_{ds}} = \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_i}}{R_d} + \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_t} - \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}} + I_{pt}, \\ i_{C_s} = -A_5 - \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_i}}{R_d} - \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_t} - \frac{U_1 - U_{C_c} - U_{C_i} + A_5 R_c}{A_1}, \\ i_{C_i} = i_L + 2A_5 + \frac{U_1 - U_{C_c} - U_{C_i} + \frac{A_4 R_c}{3}}{A_1} + \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_i}}{R_d}, \\ i_{C_c} = A_5 + I_{bt} - I_{dr}, \\ i_{C_e} = A_5 - \frac{U_1 - U_{C_c} - U_{C_i} + A_5 R_c}{A_1} + I_{bt} + I_{df}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A_1 &= R_b + R_1, \\ A_2 &= R_e + R_t, \\ A_3 &= A_2 A_1 + R_c (A_2 + A_1), \\ A_4 &= A_1 (U_{C_c} + U_{C_e} + U_{C_s}) + A_2 (U_{C_c} - U_2 + U_{C_i}), \\ A_5 &= \frac{A_4}{A_3}. \end{aligned}$$

Проведемо заміну у лівій частині рівнянь системи рівнянь (2) у відповідності з виразами, які описують струми в ємностях $i_C(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}$ і напруги у індуктивностях $U_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$, а також врахуємо, що всі напруги та струми в системі змінюються в часі.

$$\left\{ \begin{aligned} L \frac{di_L(t)}{dt} &= U_2 - (U_{C_i}(t) + i_L(t) \cdot R_2), \\ C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} &= \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}, \\ C_{ds} \frac{dU_{C_{ds}}(t)}{dt} &= \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(t)}{R_d} + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} - \frac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}} + I_{pt}, \\ C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} &= -A_5 - \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(t)}{R_d} - \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} - \\ &\quad - \frac{U_1 - U_{C_c}(t) - U_{C_i}(t) + A_5 R_c}{A_1}, \\ C_i \frac{dU_{C_i}(t)}{dt} &= i_L(t) + 2A_5 + \frac{U_1 - U_{C_c}(t) - U_{C_i}(t) + \frac{A_4 R_c}{3}}{A_1} + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(t)}{R_d}, \\ C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} &= A_5 + I_{bt} - I_{dr}, \\ C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} &= A_5 - \frac{U_1 - U_{C_c}(t) - U_{C_i}(t) + A_5 R_c}{A_1} + I_{bt} + I_{df}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Система рівнянь (3) є нелінійною оскільки містить в собі нелінійні елементи, а саме джерела струмів I_{pt} , I_{dr} , I_{df} , $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$ та ємності C_c , C_e .

$$I_f = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{VT \cdot NF}} - 1 \right), \quad (4)$$

$$I_r = I_S \left(e^{\frac{V_{BC}}{VT \cdot NR}} - 1 \right), \quad (5)$$

$$I_{df} = \frac{I_f}{BF}, \quad (6)$$

$$I_{dr} = \frac{I_r}{BR}, \quad (7)$$

$$I_{pt} = \begin{cases} 0, & V_{GS} - V_{TO} \leq 0 \\ \beta \cdot (V_{GS} - V_{TO})^2, & V_{GS} - V_{TO} \leq V_{DS} \\ \beta \cdot V_{DS} \cdot [2 \cdot (V_{GS} - V_{TO}) - V_{DS}], & V_{GS} - V_{TO} > V_{DS} \end{cases}, \quad (8)$$

де I_S – струм насичення біполярного транзистора;
 V_{BE}, V_{BC} – напруги на внутрішніх точках база-емітер, база-колектор;
 VT – температурний потенціал;
 NF, NR – коефіцієнти неідеальності в нормальному та інверсному режимах;
 BF, BR – максимальні коефіцієнти передачі струму по схемі з загальним емітером в нормальному та інверсному режимах;
 QB – коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора;

V_{TO} – порогова напруга;

β – крутизна прохідної характеристики;

V_{GD}, V_{GS}, V_{DS} – напруги на внутрішніх точках затвор-стік, затвор-витік та стік-витік.

Ємності біполярного транзистора мають дифузійну та бар'єрну складову. Розглянемо окремо ємність колекторного переходу C_c :

$$C_c = C_{c,dif} + C_{c,bar}, \quad (9)$$

$$C_{c,dif} = \frac{(I_r + I_s) \cdot TR}{VT \cdot NR}, \quad (10)$$

$$C_{c,bar} = \begin{cases} \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{JC}}\right)^{MJC}}, & V_{BC} < 0 \\ CJC, & V_{BC} \geq 0. \end{cases} \quad (11)$$

Ємність емітерного переходу запишеться C_e :

$$C_e = C_{e,dif} + C_{e,bar}, \quad (12)$$

$$C_{e,dif} = \frac{(I_f + I_s) \cdot TF}{VT \cdot NF}, \quad (13)$$

$$C_{e,bar} = \begin{cases} \frac{CJE}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{JE}}\right)^{MJE}}, & V_{BE} < 0 \\ CJE, & V_{BE} \geq 0, \end{cases} \quad (14)$$

де $C_{c,dif}, C_{c,bar}, C_{e,dif}, C_{e,bar}$ – дифузійні і бар'єрні ємності колекторного та емітерного переходів;

TF, TR – час переносу заряду через базу в нормальному та інверсному режимах;

CJE, CJC – ємність емітерного і колекторного переходів при нульовому зміщенні;

V_{JE}, V_{JC} – контактна різниця потенціалів переходів;

MJE, MJC – коефіцієнти плавності переходів.

Система рівнянь (3) є динамічною математичною моделлю ЧПВН, яка дозволяє визначити значення напруги або струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми в середовищі Maple. Розрахунок показує, що на виході ЧПВН дійсно будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде змінюватись із зміною ємності конденсаторної циліндричної структури. Так при $C_w = 20$ пФ частота $F = 1650$ кГц, а при $C_w = 200$ пФ частота $F = 1110$ кГц.

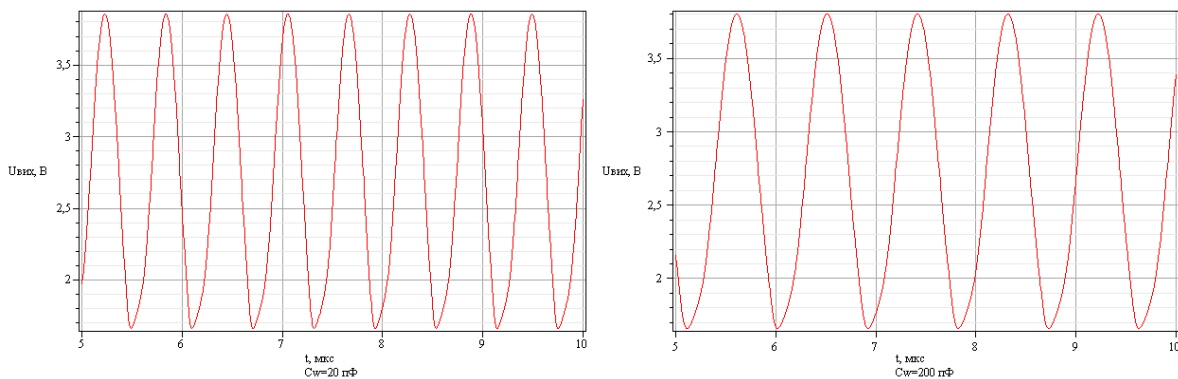


Рис. 4. Зміна величини напруги вихідного сигналу від часу

Експериментальні дослідження

Для проведення експериментальних досліджень у схемі, що зображена на рис. 1 було використано транзистори КТ3107 та КП313, в якості чутливого елементу було використано почергово КЦС: з сіткоподібними електродами [4] та з циліндричними електродами [5]. Так при зміні вологості мінерального масла М8В від 0 % до 30 % ємність КЦС з сіткоподібними електродами змінюється від 20 пФ до 45 пФ, а для КЦС з циліндричними електродами від 145 пФ до 1105 пФ.

На рис. 5 зображено експериментальну ВАХ досліджуваного перетворювача вологості. З характеристики видно присутність ділянки від'ємного опору.

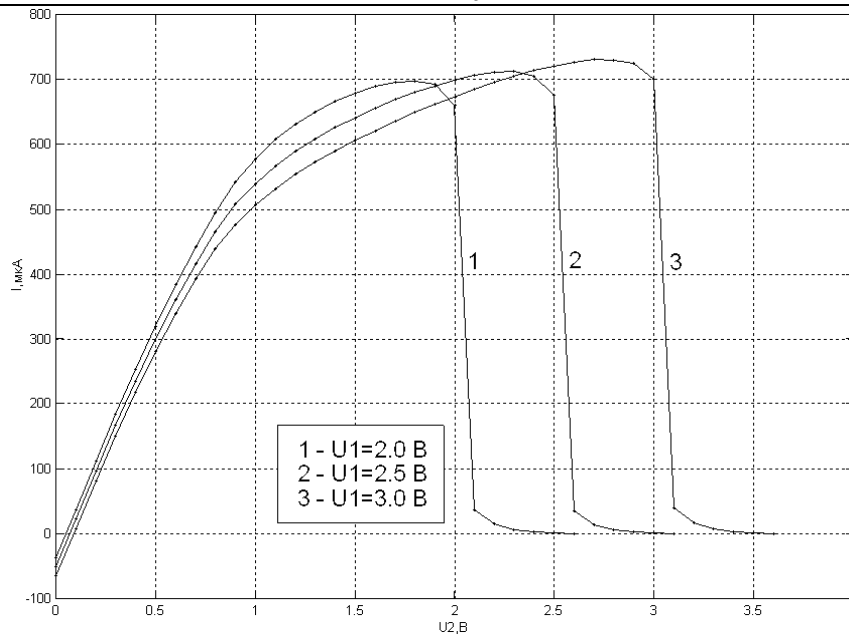


Рис. 5. Експериментальна ВАХ ЧПВН

Знаючи значення частоти вихідного сигналу F при різних значеннях ємності C_w можна отримати функцію перетворення для ЧПВН, що зображена на рис. 6 при $U_2=2,7$ В.

З рис. 6 можна бачити, що відносна похибка для ЧПВН є різною при різних діапазонах C_w , але не перевищує 1,5 %.

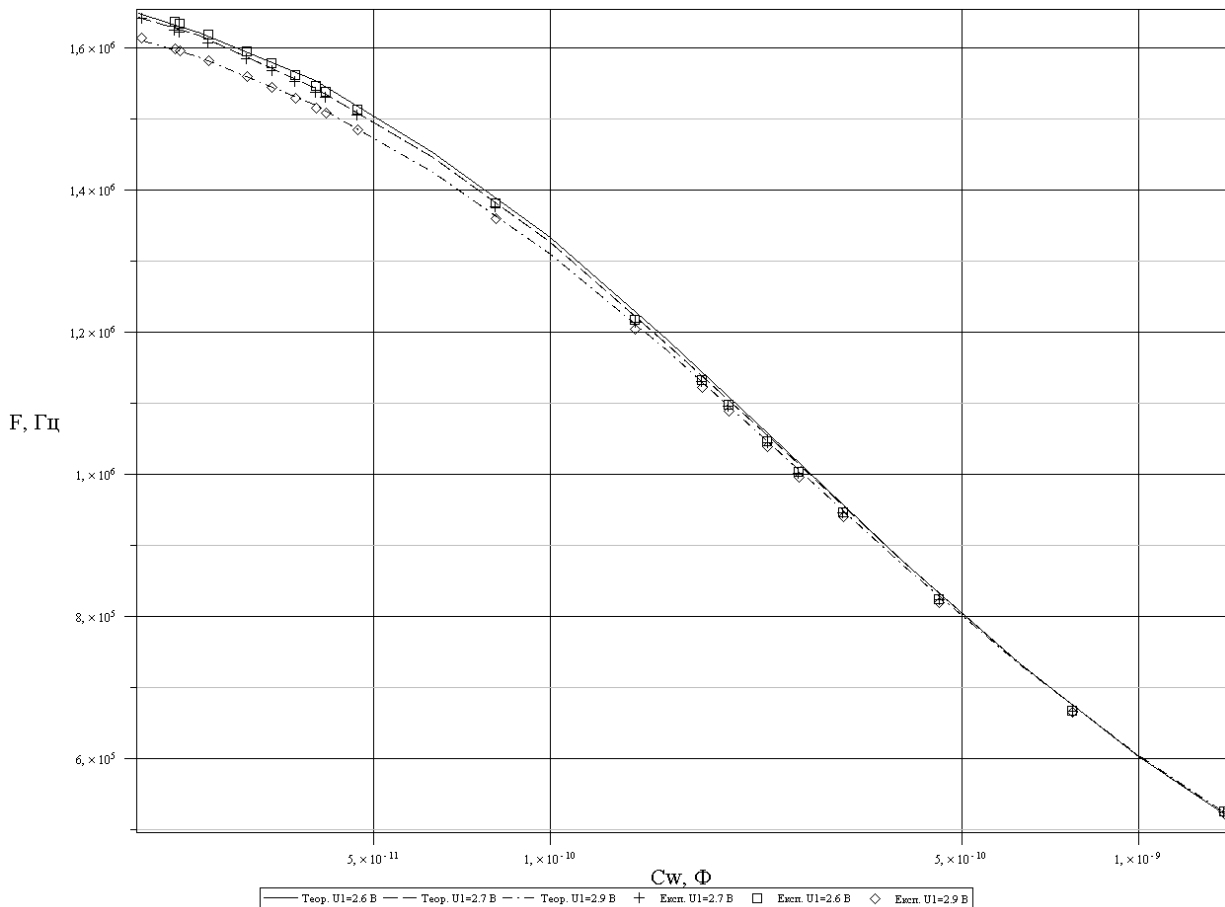


Рис. 6. Експериментальна та теоретична залежність частоти вихідного сигналу від вологості мінерального масла М8В

На рис. 7 наведено результати моделювання зміни відносної чутливості S_B [6] від ємності вологочутливого елемента.

$$S_B = \frac{\Delta F / F_H}{\Delta C_w / C_w}, \quad (15)$$

де F_i – нормувальна частота;
 ΔC_w – мінімальна зміна C_w ;
 ΔF – зміна частоти при мінімальній зміні C_w .

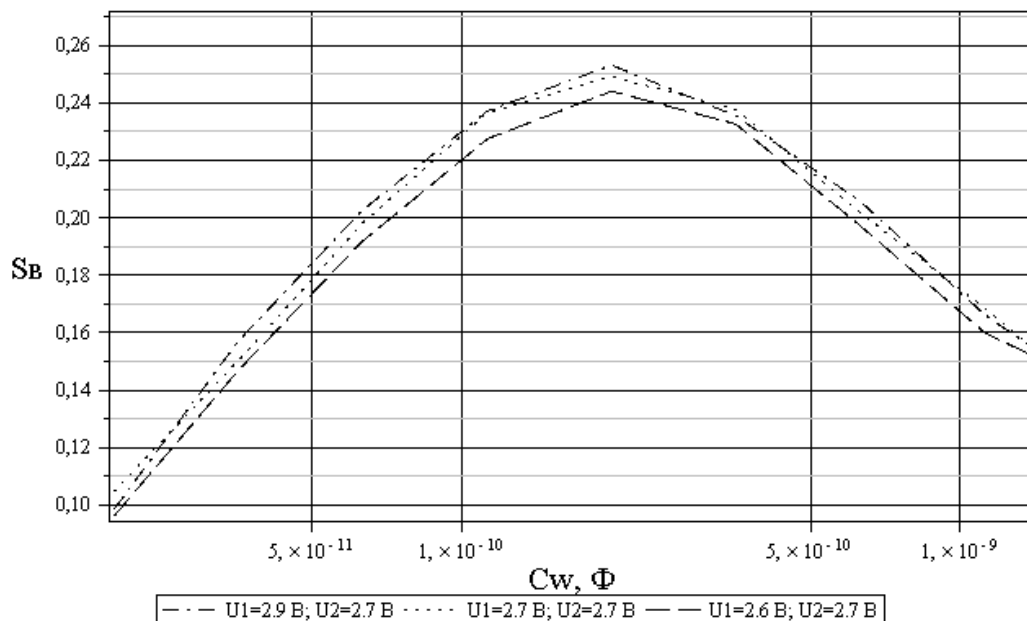


Рис. 7. залежність чутливості ЧПВН від ємності чутливого елемента

Нормувальна частота $F_n=1$ МГц. З рис. 7 видно, що найбільше значення відносної чутливості спостерігається в діапазоні від 100 пФ до 500 пФ, що є енергетично оптимальним режимом роботи ЧПВН.

Висновки

Показано можливість створення частотного перетворювача вологості нафтопродуктів на основі транзисторної структури з від'ємним опором у поєднанні з вологочутливими КЦС. Розроблено математичну модель частотного перетворювача вологості нафтопродуктів, яка дозволяє визначити значення напруги або струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. Отримано залежності функції перетворення та чутливості перетворювача вологості. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів складає 1,5 %.

Література

- Осадчук В. С. Проблеми вимірювання вологості нафтопродуктів та метод підвищення його точності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – 2010. – № 1. – С. 135– 139.
- Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Осадчук О. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 303 с.
- Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 275 с.
- Пат. 40284 Україна, МКІ G 01 N 27/22. Сенсор для вимірювання вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О.С. Звягін (Україна). – № 200814052; заявл. 05.12.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6. – 2 с.
- Пат. 39894 Україна, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний сенсор для вимірювання вологості / В.С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін (Україна). – № 200814033; заявл. 05.12.2008; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5. – 2 с.
- Шрамков Е. Г. Электрические измерения. Средства и методы измерений / Шрамков Е. Г. – М.: Высшая школа, 1972. – 520 с.

Надійшла 16.9.2010 р.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису

<http://visniktup.narod.ru/rules/>

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 2 від 22.09.2010 р.

Підп. до друку 23.09.2010 р. Ум.друк.арк. 18,26 Обл.-вид.арк. 22,65
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63