

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 ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З КОНДЕНСАТОРНОЮ ЦИЛІНДРИЧНОЮ СТРУКТУРОЮ

Розроблено математичну модель частотного перетворювача вологості нафтопродуктів, яка дозволяє визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. Отримано залежності функції перетворення та чутливості перетворювача вологості.

Вступ

Вимірювання вологості є одним із поширених напрямків вимірювань. Суттєве значення має вимірювання вологості нафти, масел та нафтопродуктів. Саме наявність вмісту води в нафтопродуктах викликає зміну їх фізико-хімічних параметрів і тим самим зменшує строк їхньої служби [1]. Існуючі перетворювачі вологості нафтопродуктів мають меншу чутливість і точність вимірювання вологості нафтопродуктів та в десятки разів перевищують собівартість частотного перетворювача вологості нафтопродуктів (ЧПВН).

Теоретичні дослідження показали, що використання транзисторних структур з від'ємним опором суттєво підвищує чутливість і точність вимірювання досліджуваного сигналу, у нашому випадку вологості нафтопродуктів [2, 3]. З метою вивчення властивостей ЧПВН, вологочутливим елементом якого є конденсаторна циліндрична структура (КЦС) [4—7], необхідно розробити математичну модель, яка б дозволила отримати залежності функції перетворення та чутливості ЧПВН.

Математична модель

На рис. 1 показано електричну схему ЧПВН, у якій під час дії води на вологочутливу КЦС C_w змінюється ємнісна складова повного опору на електродах емітер-перший затвор транзисторів VT1 та VT2, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Для визначення функції перетворення та чутливості на рис. 2а показано еквівалентну схему

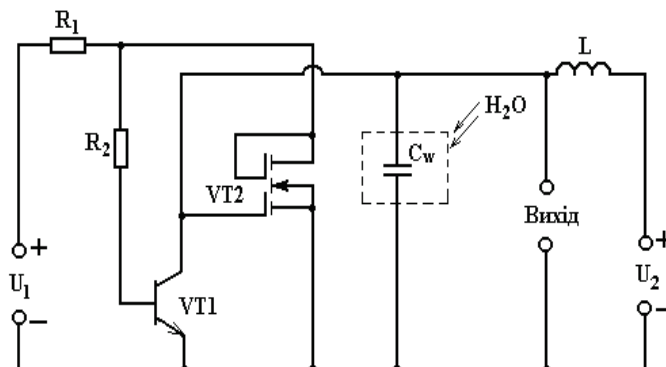


Рис. 1. Електрична схема частотного перетворювача вологості нафтопродуктів

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, на рис. 2б наведено перетворену еквівалентну схему ЧПВН.

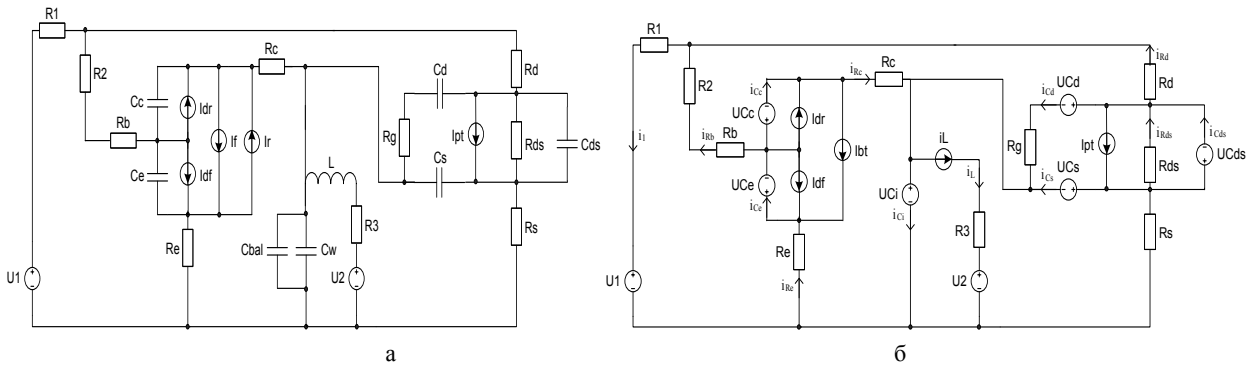


Рис. 2. Еквівалентні схеми ЧПВН

На основі вибраних напрямків струмів складено систему рівнянь Кірхгофа

$$\left\{ \begin{aligned} U_L &= U_{C_i} - (U_2 + i_L R_3); \\ i_{R_{ds}} &= \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}}; \\ i_{C_d} &= \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g}; \\ i_{R_b} &= \frac{-U_{C_e} - i_1 R_1 - U_1 - i_{R_e} R_e}{R_b + R_2}; \\ i_{C_{ds}} &= i_{R_d} + I_{pt} + i_{C_d} - i_{R_{ds}}; \\ i_{R_c} &= \frac{-U_{C_e} - U_{C_c} - U_{C_i} - i_{R_e} R_e}{R_c}; \\ i_{R_d} &= \frac{i_{R_b} (R_b + R_2) + U_{C_d} - U_{C_c} + i_{C_d} R_g - i_{R_c} R_c}{R_d}; \\ i_{R_e} &= i_{R_c} + i_{R_b}; \\ i_{C_s} &= i_{R_s} + I_{pt} - i_{C_{ds}} - i_{R_{ds}}; \\ i_{C_i} &= i_{R_c} + i_{C_s} + i_{C_d} - i_L; \\ i_{C_c} &= I_{bt} - I_{dr} + i_{R_c}; \\ i_{C_e} &= I_{bt} + I_{df} + i_{R_e}; \\ i_1 &= \frac{-U_1 - U_{C_{ds}} - i_{R_s} R_s - i_{R_d} R_d}{R_1}; \\ i_{R_s} &= \frac{-U_{C_i} - U_{C_s}}{R_s}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де R_1, R_2, R_3 — навантажувальні опори; $R_b, R_e, R_c, R_g, R_d, R_s$ — об’ємні опори бази, емітера, колектора, затвору, стоку та витоків; R_{ds} — опір стік-витік; C_e, C_c — ємності емітерного та колекторного переходів; C_d, C_s, C_{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 зворотний струми біполярного транзистора.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = U_{C_i} - (U_2 + i_L R_3); \\ i_{C_d} = \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g}; \\ i_{C_{ds}} = A_9 + \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_i}}{R_d} + \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g} - \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}} + I_{pt}; \\ i_{C_s} = -A_4 - A_9 + \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g}; \\ i_{C_i} = -i_L + A_8 + A_4 - A_9 + 2 \left(\frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g} \right); \\ i_{C_c} = A_8 + I_{bt} - I_{dr}; \\ i_{C_e} = \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} - \frac{U_1 + U_{C_e} + R_e \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} + A_7 R_1}{A_1} + I_{bt} + I_{df}. \end{array} \right. \quad (2)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_L(t)}{dt} = U_{C_i}(t) - (U_2 + i_L(t) R_3); \\ C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g}; \\ C_{ds} \frac{dU_{C_{ds}}(t)}{dt} = A_9 + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(t)}{R_d} + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g} - \frac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}} + I_{pt}; \\ C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} = -A_4 - A_9 + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g}; \\ C_i \frac{dU_{C_i}(t)}{dt} = -i_L + A_8 + A_4 - A_9 + 2 \left(\frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g} \right); \\ C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} = A_8 + I_{bt} - I_{dr}; \\ C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} = \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} - \frac{U_1 + U_{C_e}(t) + R_e \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} + A_7 R_1}{A_1} + I_{bt} + I_{df}, \end{array} \right. \quad (3)$$

де $A_1 = R_e + R_b + R_2$; $A_2 = R_c (R_e + R_b + R_2) + R_e (R_b + R_2)$;

$$A_3 = A_1 (-U_{C_i}(t) - U_{C_c}(t)) - U_{C_e}(t) (R_b + R_2) + R_e U_1; \quad A_4 = 2I_{pt} - 2 \frac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}} + \frac{-U_{C_i}(t) - U_{C_s}(t)}{R_s};$$

$$A_5 = (R_b + R_2) (U_{C_e}(t) A_2 + R_e A_3) + R_c A_1 A_3 + \\ + A_2 (U_1 (R_b + R_2 - A_1) + A_1 (U_{C_c}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_s}(t)));$$

$$A_6 = R_1 (A_2 A_1 + (-R_e^2 - A_2) (R_b + R_2) - R_e R_c A_1); \quad A_7 = \frac{A_5}{A_6};$$

$$A_8 = \frac{A_1(-U_{C_i}(t) - U_{C_c}(t)) - U_{C_e}(t)(R_b + R_2) + R_e(U_1 + A_7R_1)}{A_2};$$

$$A_9 = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_c}(t) - \frac{U_1 + U_{C_e}(t) + R_e \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} + A_7 R_1}{A_1} (R_b + R_2) - \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} R_c}{R_d}.$$

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 :

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

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

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

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

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

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 за схемою 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 складові. Розглянемо окремо ємність колекторного переходу C_c :

$$C_c = C_c dif + C_c bar; \quad (9)$$

$$C_c dif = \frac{(I_r + I_S)TR}{VT \cdot NR}; \quad (10)$$

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

Ємність емітерного переходу C_e запишеться

$$C_e = C_e dif + C_e bar; \quad (12)$$

$$C_e dif = \frac{(I_f + I_S)TF}{VT \cdot NF}; \quad (13)$$

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

де C_{cdif} , C_{cbar} , C_{edif} , C_{ebar} — дифузійні і бар'єрні ємності колекторного та емітерного переходів; TF , TR — час переносу заряду через базу в нормальному та інверсному режимі; CJE , CJC — ємність емітерного і колекторного переходів за нульового зміщення; 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 та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми в середовищі Maple 13. Розрахунок показує, що на виході ЧПВН дійсно будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде змінюватись зі зміною ємності КЦС. Так для $C_w = 30$ пФ частота $F = 1320$ кГц, а для $C_w = 300$ пФ — $F = 969$ кГц (рис 3).

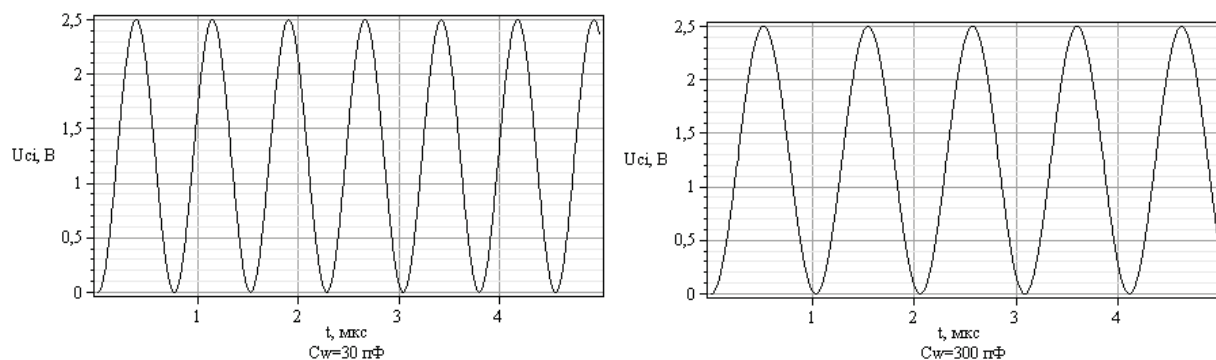


Рис. 3. Зміна величини напруги вихідного сигналу від часу

Експериментальні дослідження

Для проведення експериментальних досліджень у схемі, що показана на рис. 1, використано транзистори BF240 та BF998, як чутливий елемент використано по чергово КЦС: з сіткоподібними електродами [4] та з циліндричними електродами [5], математичні моделі яких описані в роботах [6, 7]. Так зі зміною 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. 4 показано експериментальні ВАХ досліджуваного перетворювача вологості.

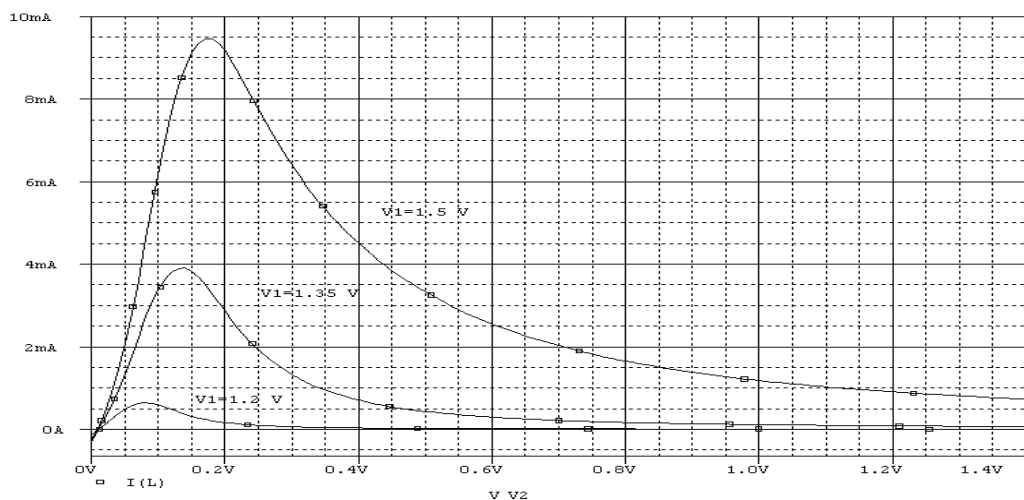


Рис. 4. Експериментальні ВАХ ЧПВН

З характеристики видно присутність ділянки від'ємного опору.

Знаючи частоту вихідного сигналу F для різних значень ємності C_w , можна отримати функцію перетворення для ЧПВН, показану на рис. 5 для $U_1 = U_2 = 1,25$ В.

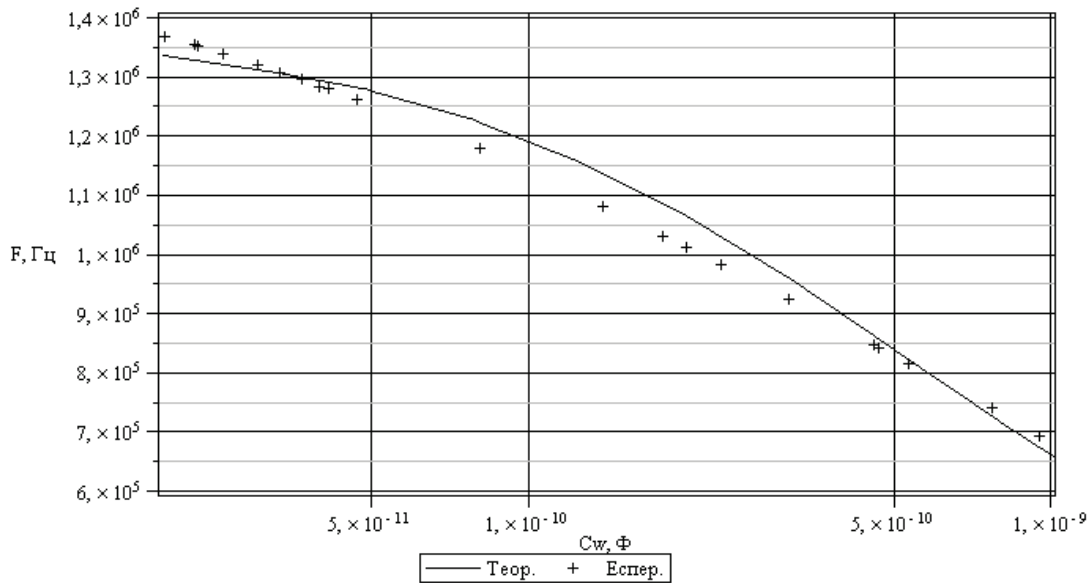


Рис. 5. Експериментальна та теоретична залежності частоти вихідного сигналу від вологочутливої ємності

З рис. 5 випливає, що відносна похибка для ЧПВН є різною для різних діапазонів C_w , але не перевищує 5 %.

На рис. 6 показано результати моделювання зміни відносної чутливості S_B [8] від ємності вологочутливого елемента.

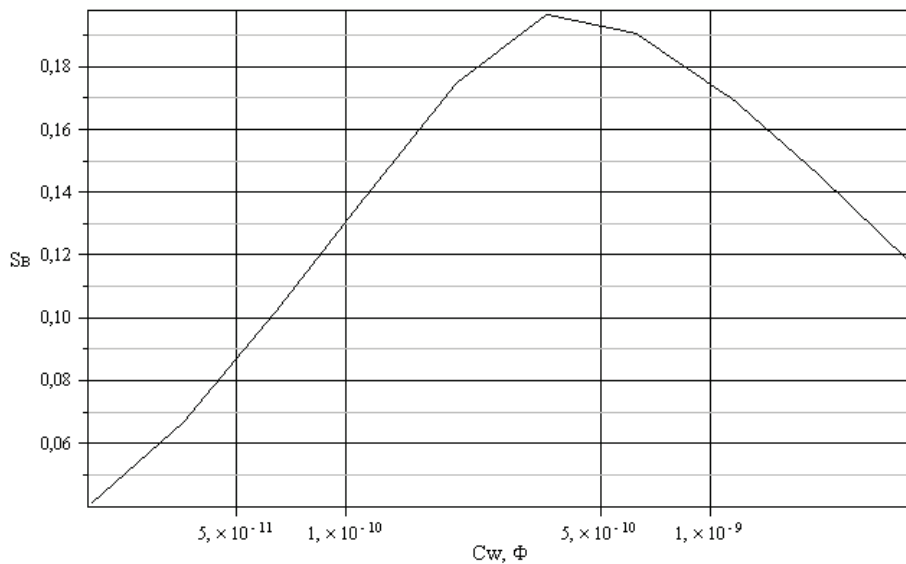


Рис. 6. Залежність чутливості ЧПВН від ємності чутливого елемента

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

де F_H — нормувальна частота; ΔC_w — мінімальна зміна C_w ; ΔF — зміна частоти за мінімальної зміни C_w .

Нормувальна частота $F_H = 1$ МГц. З рис. 6 випливає, що найбільше значення відносної чутливості спостерігається в діапазоні від 145 пФ до 1400 пФ, що є енергетично оптимальним режимом роботи ЧПВН.

Висновки

Показано можливість створення ЧПВН 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 та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. Отримано залежності функції перетворення та чутливості перетворювача вологості. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів складає 5 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором : моног. / Олександр Володимирович Осадчук. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 303 с.
3. Осадчук В. С.. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : навч. посіб. для студ. ВНЗ / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 275 с.
4. Патент 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.
5. Патент 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.
6. Осадчук О. В. Ємнісний сенсор для вимірювання вологості нафтопродуктів / Осадчук О. В., Звягін О. С., Євсєєва М. В. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2009. — № 2. — С. 40—43.
7. Осадчук О. В. Вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості нафтопродуктів / Осадчук О. В., Звягін О. С., Крилик Л. В. // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія : «Автоматика, вимірювання та керування». — 2010. — № 665. — С. 174—178.
8. Электрические измерения. Средства и методы измерений. : учеб. пос. для вузов / [Дьяченко К. П., Зорин Д. И., Новицкий П. В. и др.]; под ред. Е. Г. Шрамкова. — М. : Высшая школа, 1972. — 520 с.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 8.10.10
Рекомендована до друку 28.10.10

Осадчук Володимирович Степанович — професор кафедри електроніки;

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

Кафедра радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет