

К. О. Коваль

АКТИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ РАДІОВІМІРЮВАЛЬНИХ ПРИБЛІДІВ НА БІПОЛЯРНІЙ ТРАНЗИСТОРНІЙ СТРУКТУРІ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Запропоновано дослідження та комп'ютерне моделювання активного елемента радіовимірювальних приладів на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором. Отримано залежності повного опору та його дійсної й уявної частини від напруг живлення та керування, використовуючи еквівалентну схему, частотну залежність еквівалентної ємності активного елемента на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором.

Ключові слова: біполярна транзисторна структура, від'ємний опір, радіовимірювальний прилад, еквівалентна ємність, дійсна частина повного опору, уявна частина повного опору.

Актуальність

Відомо, що розробка сучасних радіовимірювальних приладів проводиться із використанням новітньої елементної бази, що дозволяє суттєво спрощувати класичні схеми радіовимірювальних приладів (РВП). Завдяки застосуванню оригінальних схемотехнічних рішень, можна досягти значного розширення функціональних властивостей таких РВП [1]. Електричне керування параметрами функціональних вузлів РВП здійснюється переважно за допомогою варикапів. Проте ці пристрої мають відносно невеликий коефіцієнт перелаштування (від 1 до 50), значення еквівалентної ємності (від 1 до 500 пФ) і добротність (від 10 до 100) [2, 3]. Наведених недоліків не мають електрично керовані еквіваленти ємностей на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором (БТСВО) за рахунок фактичного використання в них чотирьох *p-n*-переходів [4, 5]. Для використання таких елементів важливо мати уявлення про фізику процесів, на яких ґрунтується їхня робота і вміти моделювати їхні електричні характеристики.

Тому **метою** цієї **статті** є дослідження активного елемента радіовимірювальних приладів на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**: 1) отримати залежності повного опору активного елемента РВП та його активного й реактивного складників на БТСВО від напруг живлення та керування з урахуванням фізичних процесів, які в ній відбуваються; 2) виконати моделювання залежностей вольт-амперної характеристики, еквівалентної ємності, дійсної та уявної частин повного опору в частотному діапазоні та від зміни напруг живлення й керування активного елемента РВП на БТСВО; 3) провести моделювання впливу дестабілізуючих чинників на перераховані вище параметри активного елемента РВП на БТСВО.

Розробка та дослідження активного елемента РВП на БТСВО

Внутрішній позитивний зв'язок у біполярній транзисторній структурі (рис. 1а), який призводить до появи від'ємного опору, дозволяє отримати електрично керований еквівалент ємності, величину якої можна змінювати напругами керування та живлення [5]. Наочне представлення такої можливості спостерігається з ВАХ активного елемента БТСВО. На виводах колектор – колектор транзисторів VT1, VT2 наявний повний опір складається з дійсного складника, який має від'ємне значення, та уявного складника, який має ємнісний ефект.

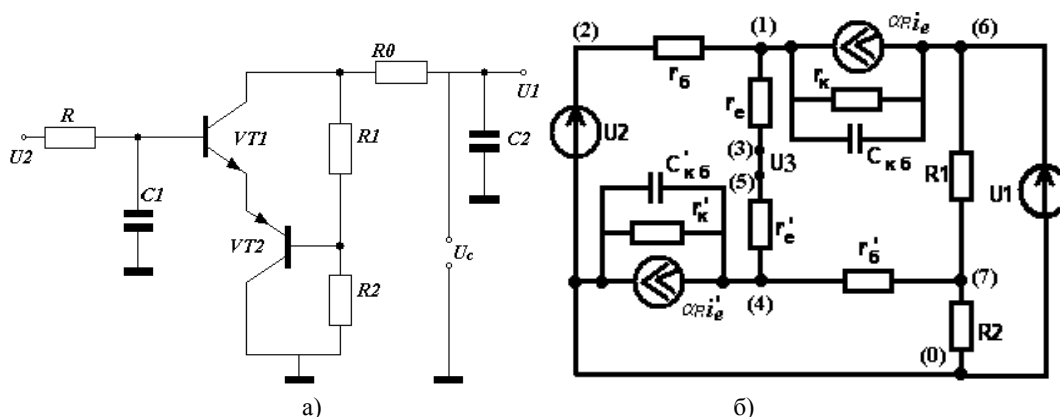


Рис. 1. Електрична схема (а) та еквівалентна схема заміщення (б) активного елемента РВП на БТСВО

Представлений активний елемент РВП на БТСВО складається з двох комплементарних біполярних транзисторів $VT1$, $VT2$; двох джерел $U1$ – живлення, $U2$ – керування; фільтруючих ланок живлення $RC1$, $RC2$; подільника напруги $R1$, $R2$, що визначає місцерозташування робочої точки на вольт-амперній характеристиці цього еквівалента ємності відносно напруги живлення. Для виведення залежності дійсного та уявного складників повного опору від напруг живлення та керування складемо еквівалентну схему заміщення активного елемента для РВП на БТСВО, використовуючи модель Еберса – Мола для біполярних транзисторів (рис. 1б).

Скориставшись пакетом прикладних математичних досліджень Maple та його спеціалізованим додатком Syrup для символічних розрахунків електричних схем, проведемо обчислення повного опору активного елемента для РВП на БТСВО. Опис еквівалентної схеми (рис. 1б) активного елемента для РВП на БТСВО представимо в символічному вигляді.

```
> bb4 :=
"
```

```
V1 6 0
R8 4 7
R7 4 0
R6 7 0
R5 6 7
R4 1 6
R3 5 4
R2 1 3
R1 2 1
C1 6 1
C2 4 0
V2 2 0
V3 3 5 0
F 1 6 V3 a1
F1 0 4 V3 a2
.end";
syrup(bb4, ac, 'curr');
```

Отриманий символічний результат повного опору спростимо та перетворимо, використовуючи спеціалізований математичний пакет WolframMathematica,

$$Z = \frac{iR_2(B_1 + B_2R_3 + B_2R_4) - R_1(-iB_7 + B_{12}B_4C_2R_5\omega + R_2(iB_{10} - i(1+a1)(R_7 + R_8) + B_{15}\omega) - iB_4(1+a1+iB_{12} + C_1\omega))}{-iB_{14} + R_1(B_{16} + (C_1R_2(B_{11} + B_4 + B_5 + B_{13}R_3) + C_2R_5(B_9 + B_8(R_6 + R_8)))\omega + iB_9C_1C_2R_2R_5\omega^2)}$$

де $B_1 = (1+a2)R_5(R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8))$, $B_{16} = -i(B_{11} + B_5 + B_{13}B_8 + B_{13}R_3 + R_6R_7 + R_6R_8 + R_7R_8)$,

$$\begin{aligned}
B_2 &= R_7 R_8 + R_6 (R_7 + R_8) + R_5 (R_7 + R_8 + i C_2 (R_7 R_8 + R_6 (R_7 + R_8))) \omega, \quad B_3 = R_3 (R_5 + R_6 + R_7) R_8, \\
B_4 &= R_7 R_8 + R_6 (R_7 + R_8), \quad B_5 = R_4 (R_5 + R_6 + R_8), \quad B_6 = (R_5 + R_6) R_7, \quad B_{13} = R_5 + R_6 + R_8, \\
B_7 &= B_1 + B_3 + B_6 R_3 + B_6 R_4 + R_4 (R_5 + R_6 + R_7) R_8, \quad B_8 = (1 + a_1) R_2, \\
B_9 &= R_6 (R_3 + R_4 + R_7) + (R_3 + R_4 + R_6 + R_7) R_8, \quad B_{10} = B_4 C_1 C_2 (R_3 + R_4) \omega^2, \quad B_{11} = R_5 (R_6 + a_2 R_6 + R_7), \\
B_{14} &= B_1 + B_2 R_3 + B_2 R_4 + R_2 (-B_{10} R_5 + R_3 R_5 + R_4 R_5 + R_3 R_6 + R_4 R_6 + R_5 R_6 + a_2 R_5 R_6 + R_3 R_8 + \\
&+ R_4 R_8 + R_5 R_8 + a_1 R_5 R_8 + a_2 R_5 R_8 + i (B_7 C_1 + B_{12} C_2 R_5 (R_6 + R_8))) \omega, \\
B_{15} &= (1 + a_1) B_4 C_2 + C_1 (B_{12} + R_6 + a_2 R_6) R_7 + C_1 (B_{12} + (1 + a_2) (R_6 + R_7)) R_8, \quad B_{12} = R_3 + R_4.
\end{aligned}$$

Використовуючи спеціалізований математичний пакет WolframMathematica, виконаємо розкладення та спрощення отриманого виразу повного опору активного елемента РВП на БТСВО на дійсну та уявну частини. Дійсна частина активного елемента РВП на БТСВО

$$\operatorname{Re}[Z] = \frac{-(D + D_1) R_2}{D + 2D_1 + R_2^2 (2D_3 R_3 R_5 + R_3^2 (C_1 D_2 + D_4 + (R_6 + R_8)^2 + 2R_5 (R_6 + R_8 + C_1^2 D_3 (R_7 + R_8)^2 \omega^2)))},$$

$$\text{де } D_4 = R_5^2 (1 + (2C_1 C_2 R_8^2 + C_1^2 (R_7 + R_8)^2 + C_2^2 (C_1^2 D_2 + (R_6 + R_8)^2)) \omega^2),$$

$$D = (R_3 (R_5 + R_6) R_7 + R_3 (R_5 + R_6 + R_7) R_8 + (1 + a_2) R_5 (R_7 R_8 + (R_6 (R_7 + R_8)))^2 + C_2^2 R_3^2 R_5^2 (R_7 R_8 + (R_6 (R_7 + R_8))^2 \omega^2),$$

$$D_1 = R_2 ((1 + a_2) R_5^2 ((1 + a_2) R_6 + (1 + a_1 + a_2) R_8) (R_7 R_8 + (R_6 (R_7 + R_8))) + R_3 R_5 ((2(1 + a_2) R_6 + 2(1 + a) R_3 \cdot (R_7 R_8 + (R_6 (R_7 + R_8))) + R_5 (2(1 + a_2) R_6 (R_7 + R_8) + R_8 ((2 + a_1 + 2a_2) R_7 + (1 + a_1 + a_2) R_8))) + R_3^2 ((R_5 + R_6 + R_8) (R_5 + R_6) R_7 + (R_5 + R_6 + R_7) R_8) + C_2^2 R_5^2 (R_6 + R_8) (R_7 R_8 + (R_6 (R_7 + R_8))^2 \omega^2)),$$

$$D_2 = (R_7 R_8 + (R_6 (R_7 + R_8)))^2 \omega^2, \quad D_3 = (R_7 R_8 + (R_6 (R_7 + R_8))) \omega^2,$$

$$D_5 = ((1 + a_2) C_1^2 D_2 + (R_6 + R_8) ((1 + a_2) R_6 + (1 + a_1 + a_2) R_8) + R_5 (R_6 + a_2 R_6 + R_8 + a_1 R_8 + a_2 R_8 + C_1 D_3 (-a_1 C_2 R_8 + (1 + a_2) C_1 (R_7 + R_8))))),$$

$$D_6 = 2(1 + a_2) R_6 R_8 (1 + a_1 + a_2 + (1 + a_2) C_1^2 R_7 (R_7 + R_8) \omega^2).$$

Уявна частина повного опору активного елемента РВП на БТСВО

$$\operatorname{Im}[Z] = \frac{R_2^2 (C_1 F_2 + C_2 R_3 R_5^2 R_8 (-a_1 F_3 + R_3 R_8)) \omega}{F_2 + F_7 R_2^2 + 2R_2 (F_8 + (1 + a_2) F_1 F_3 R_5^2 + R_3 R_5 (F_3 (2(1 + a_2) R_6 + (2 + a_1 + 2a_2) R_8) + R_5 F_9))},$$

$$\text{де } F = (R_3 (R_5 + R_6) R_7 + R_3 (R_5 + R_6 + R_7) R_8 + (1 + a_2) R_5 (R_7 R_8 + R_6 (R_7 + R_8)))^2,$$

$$F_1 = (1 + a_2) R_6 + (1 + a_1 + a_2) R_8, \quad F_2 = F + C_2^2 R_3^2 R_5^2 (R_7 R_8 + R_6 (R_7 + R_8))^2 \omega^2,$$

$$F_3 = R_7 R_8 + R_6 (R_7 + R_8), \quad F_4 = R_5^2 (1 + \omega^2 (2C_1 C_2 R_8^2 + C_1^2 (R_7 + R_8)^2 + C_2^2 ((R_6 + R_8)^2 + C_1^2 F_3^2 \omega^2))),$$

$$F_5 = R_6 + a_2 R_6 + R_8 + a_1 R_8 + a_2 R_8 + C_1 F_3 (-a_1 C_2 R_8 + (1 + a_2) C_1 (R_7 + R_8)) \omega^2,$$

$$F_6 = R_8^2 ((1 + a_1 + a_2)^2 + (1 + a_2)^2 C_1^2 R_7^2 \omega^2) + 2(1 + a_2) R_6 R_8 (1 + a_1 + a_2 + (1 + a_2) C_1^2 R_7 (R_7 + R_8) \omega^2) + (1 + a_2)^2 R_6^2 (1 + C_1^2 (R_7 + R_8)^2 \omega^2),$$

$$F_7 = (F_6 R_5^2 + 2R_3 R_5 (F_5 R_5 + F_1 (R_6 + R_8)) + (1 + a_2) C_1^2 F_3^2 \omega^2) + R_3^2 (F_4 + (R_6 + R_8)^2 + C_1^2 F_3^2 \omega^2 + 2R_5 (R_6 + R_8 + C_1^2 F_3 (R_7 + R_8))),$$

$$F_8 = R_3^2 ((R_5 + R_6 + R_8) (R_5 + R_6) R_7 + (R_5 + R_6 + R_7) R_8) + C_2^2 F_3 R_5^2 (R_6 + R_8) \omega^2,$$

$$F_9 = R_8 ((2 + a_1 + 2a_2) R_7 + (1 + a_1 + a_2) R_8) + 2(1 + a_2) R_6 (R_7 + R_8).$$

Проведемо імітаційне моделювання досліджуваного активного елемента РВП на БТСВО за допомогою програми комп'ютерного моделювання електричних схем MicroCAP [6]. Електричну схему досліджуваного активного елемента в середовищі MicroCAP наведено на рис. 2.

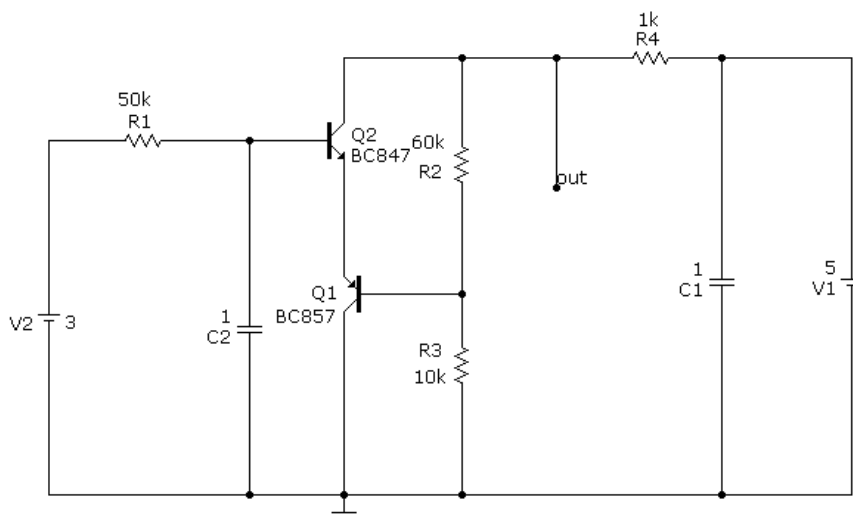


Рис. 2. Електрична схема активного елемента РВП на БТСВО в середовищі MicroCAP

Вольт-амперну характеристику активного елемента РВП на БТСВО відносно напруги живлення джерела V1 при різних напругах керування (1,5...3,5 В) представлено на рис. 3. При збільшенні напруги керування спостерігається збільшення максимального струму ВАХ, відповідно збільшується протяжність спадаючої ділянки, на якій утворюється від'ємний диференційний опір біполярної транзисторної структури. При напрузі керування 1,5 В від'ємний опір спостерігається в діапазоні напруг 1 – 2,8 В. При напрузі керування 3,5 В від'ємний опір спостерігається в діапазоні напруг 1 – 20 В. Кут нахилу ВАХ майже однаковий при різних напругах керування, тобто значення від'ємного опору є також постійним і наближено дорівнює 2 кОм. Маючи наочне представлення ВАХ, легко обрати необхідний діапазон напруг керування та живлення з метою утримання робочої точки на ділянці існування еквівалента ємності (на спадаючій ділянці ВАХ).

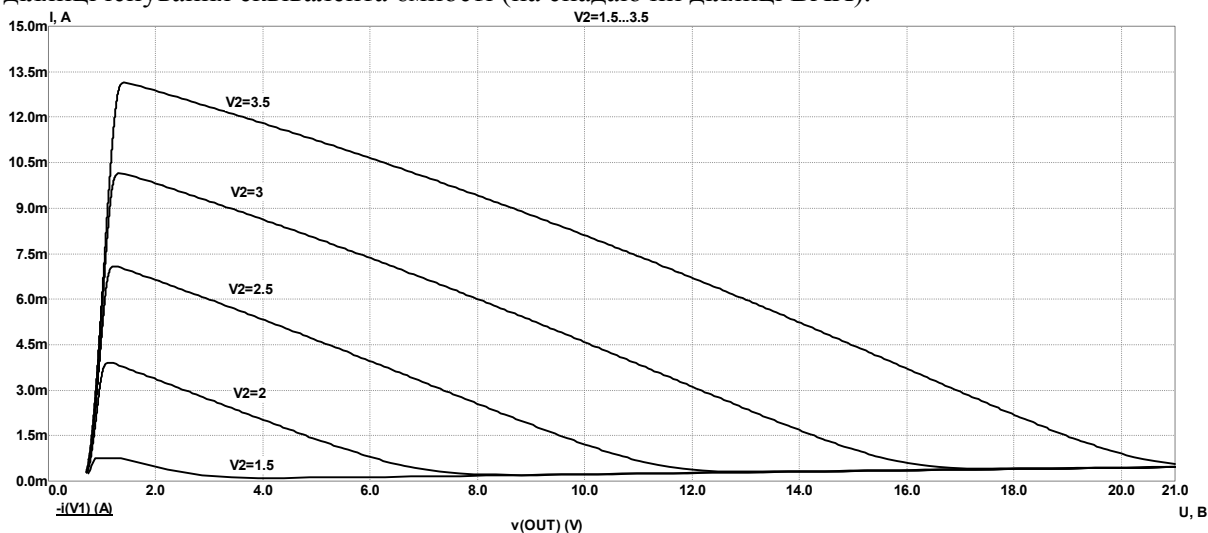


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика досліджуваного еквівалента ємності на біполярній транзисторній структурі з від'ємними опором

Частотну залежність дійсного та уявного складників повного опору активного елемента РВП на БТСВО представлено на рис. 4. З цього графіка видно, що робочий діапазон частот існування еквівалента ємності для зазначених умов аналізу відповідає частотам від 1 кГц до 455 кГц. Від'ємний складник повного опору є постійним у діапазонах частот (1 кГц...20 кГц) і складає близько 2 кОм. Перехідна ділянка плавного зростання лежить у межах від 20 кГц до 455 кГц. Реактивна складова повного опору має форму перевернутого дзвона, точка Наукові праці ВНТУ, 2010, № 1

мінімуму утворюється на частоті 87,3 кГц.

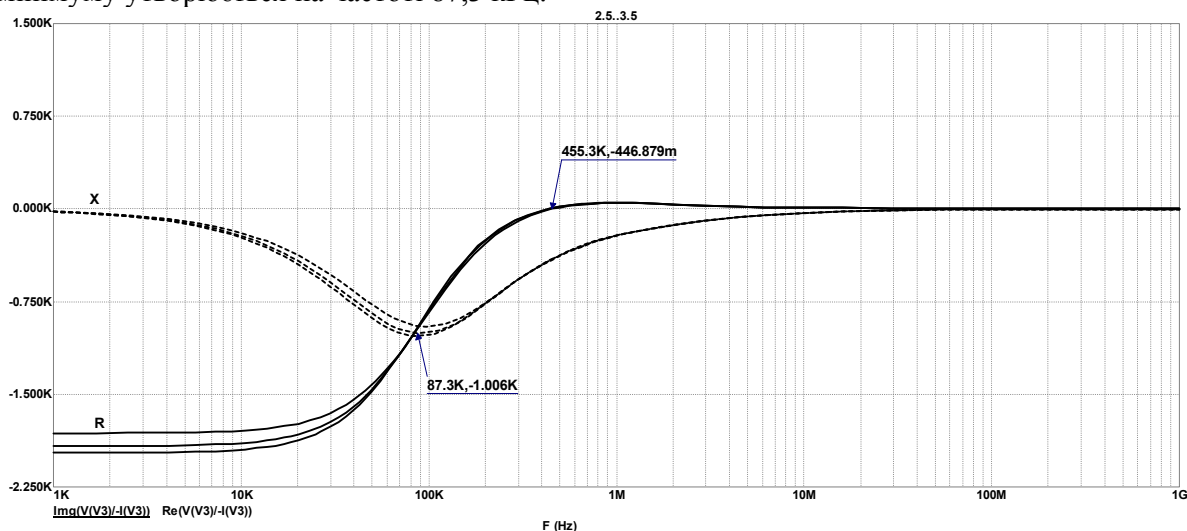


Рис. 4. Частотна залежність активного та реактивного складників повного опору активного елемента РВП на БТСВО

Залежність зміни еквівалентної ємності досліджуваного активного елемента РВП на БТСВО від частоти при різних напругах керування (2...4 В) наведено на рис. 5. Отримана залежність еквівалентної ємності майже не змінюється в широкому частотному діапазоні (50 кГц...1 МГц) і варіюється в межах (1,2...0,85 нФ).

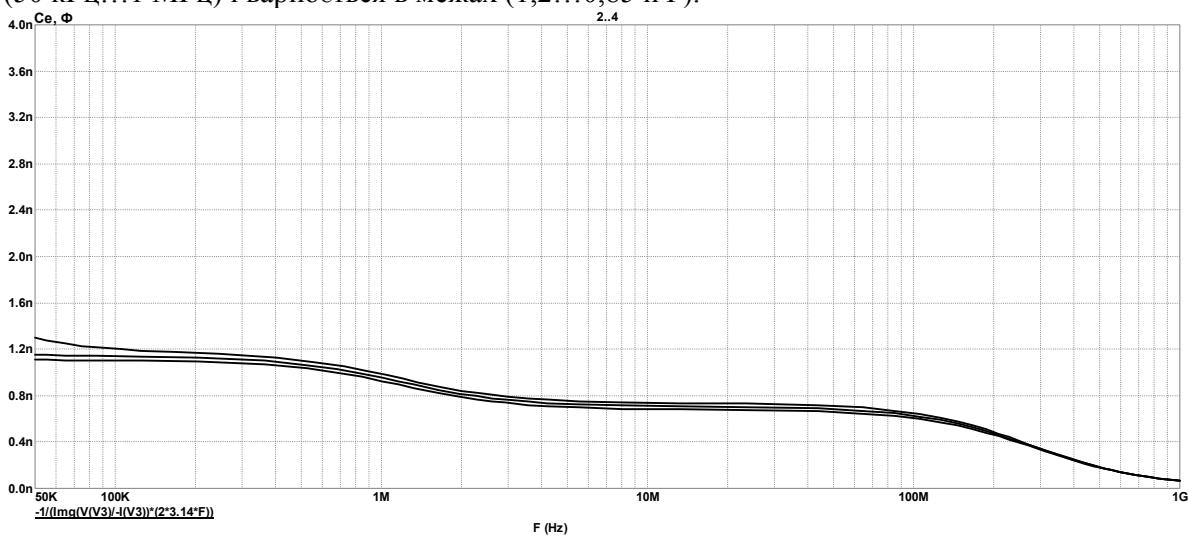


Рис. 5. Залежність зміни еквівалентної ємності активного елемента РВП на БТСВО від частоти

Зміну еквівалентної ємності від напруги живлення (2,5...6 В) при різних напругах керування (3...5 В) представлено на рис. 6. Максимальний коефіцієнт перекриття ємності складає 30 при напрузі керування 3 В та експериментальній частоті 100 кГц.

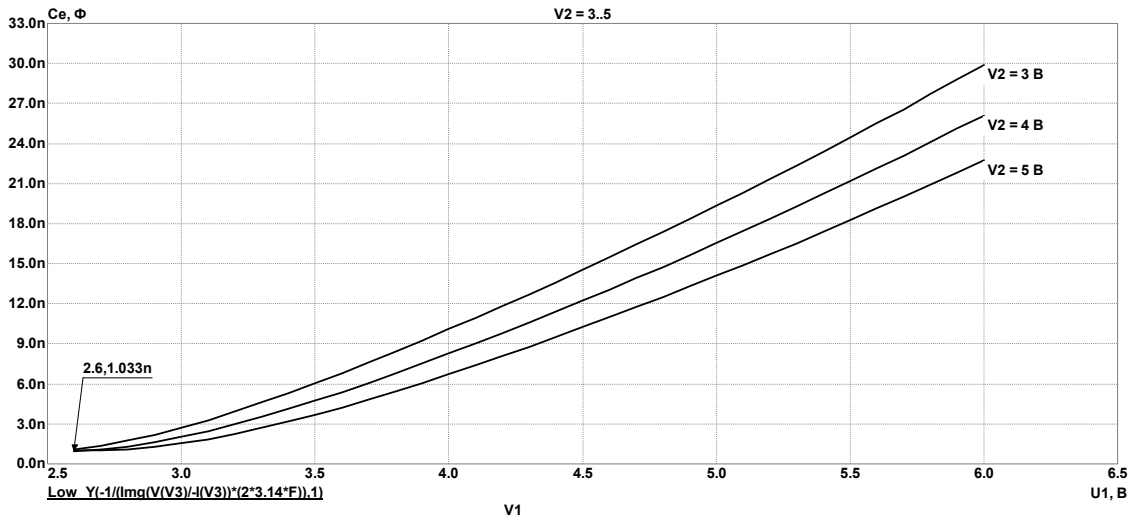


Рис. 6. Залежність зміни еквівалентної ємності активного елемента РВП на БТСВО від напруги живлення при різних напругах керування 3...5 В

Вплив дестабілізуючого чинника (зміни температури навколишнього середовища) на ВАХ і частотну залежність зміни еквівалентної ємності активного елемента РВП на БТСВО представлено на рис. 7 та рис. 8 відповідно. Як видно з рисунка, при збільшенні температури максимальний струм збільшується на 0,34 мА та 1,12 мА для $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно.

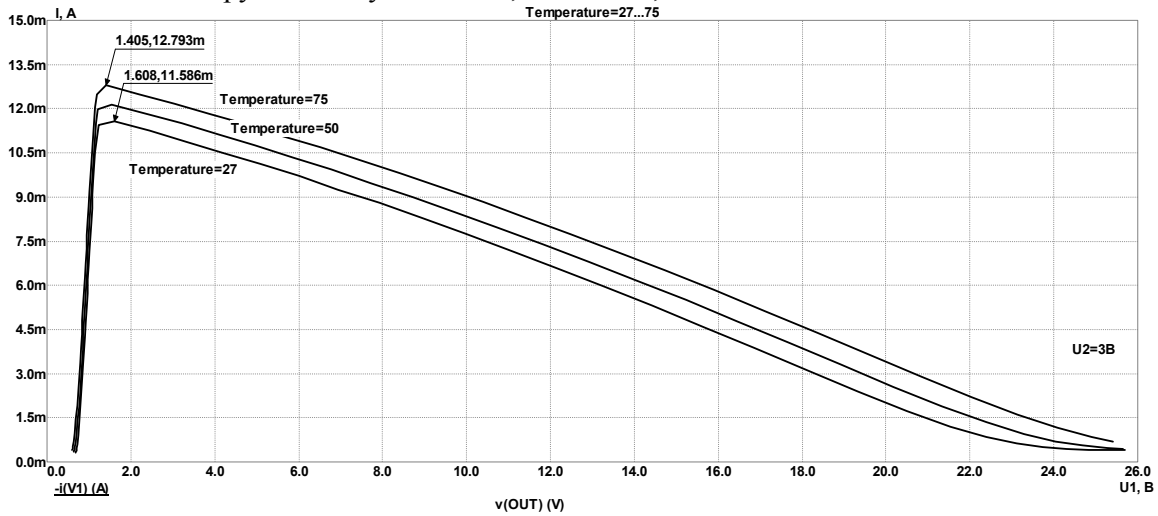


Рис. 7. ВАХ активного елемента РВП на БТСВО при різних робочих температурах, при напрузі керування 3 В

Еквівалентна ємність активного елемента РВП на БТСВО на частоті 50 кГц змінюється на 0,6 нФ та на 1 нФ для $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно. Цей вплив температури на характер частотної залежності при різних температурах навколишнього середовища спостерігається в діапазоні частот (50...250 кГц). Результати імітаційного моделювання активного елемента РВП на БТСВО наведено в таблиці.

Таблиця

Отримані результати імітаційного моделювання активного елемента РВП на БТСВО

Параметр	Величина від'ємного опору	Діапазон зміни еквівалентної ємності	Частотний діапазон	Діапазон робочих напруг	Коефіцієнт перелаштування
Значення	кОм	нФ	кГц	В	одиниць
	2	1 – 30	1 – 455	1.8 – 6	30

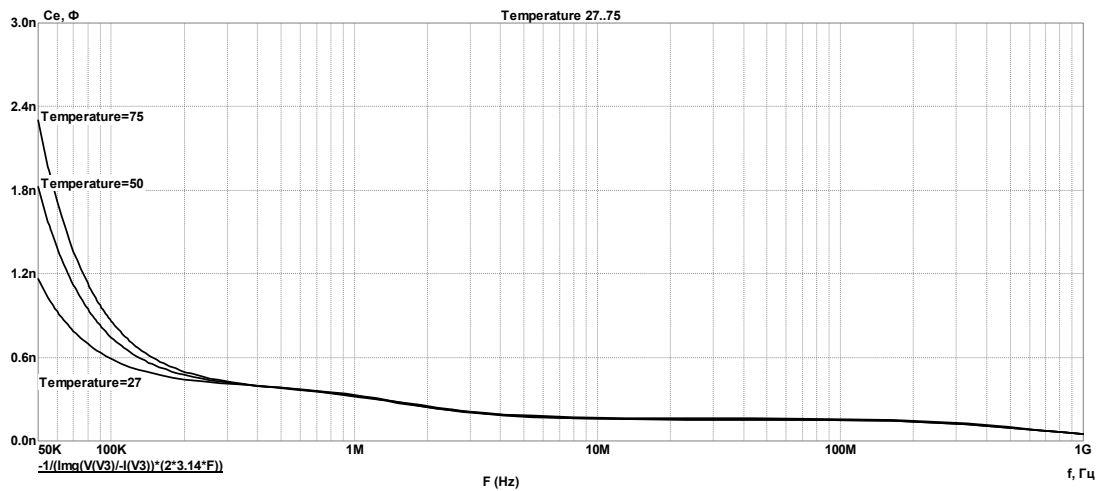


Рис. 8. Залежність зміни еквівалентної ємності активного елемента РВП на БТСВО від частоти при 27, 50, 75 °С

Висновки

Досліджено активний елемент РВП на БТСВО з можливістю електричного керування її еквівалентною ємністю з коефіцієнтом перелаштування 30. Отримано аналітичні залежності активного та реактивного складників повного опору активного елемента РВП на БТСВО. За допомогою комп'ютерного моделювання отримано сімейство вольт-амперних характеристик, частотні залежності дійсної та уявної частини повного опору, еквівалентної ємності БТСВО та вплив дестабілізуючого чинника на ці параметри досліджуваного активного елемента РВП.

Використання розробленого активного елемента для РВП на БТСВО дозволить спростити класичні схеми РВП, покращити електричну керованість РВП і виконати їх в інтегральному вигляді.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Нефедов В. И. Метрология и радиоизмерения: Учеб. пособие для вузов / В. И. Нефедов, А. С. Сигов, В. К. Битюков, В. И. Хахин – М.: Высш. шк., 2006. – 526 с.
2. Берман Л.С. Нелинейная полупроводниковая емкость / Л. С. Берман – М.: Физматиздат, 1963. – 135 с.
3. Аксенов А. И. Отечественные полупроводниковые приборы. Справочник / А. И. Аксенов, А. В. Нефедов. – М.: СОЛОН-Прес, 2005. – 584 с.
4. Коваль К. О. Електрично керована еквівалентна ємність на основі транзисторної структури з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – 2008. – Вип. 1 (25). – С. 159 – 164.
5. Koval K. Mathematical model of transistor equivalent of electrical controlled capacity / O. Osadchuk, K. Koval, A. Semenov, M. Prutyla // Modern problems of Radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the international conference, 19 – 23 February 2008. – Lviv-Slavsko, 2008. – P. 35 – 36.
6. Коваль К. О. Імітаційне моделювання активного елемента радіовимірювальних приладів на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором / К. О. Коваль // “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”: Міжнародна науково-технічна конференція, 08 – 10 жовтня 2009 р.: матеріали конф. – Вінниця, 2009. – Ч. 2. – С. 69.

Коваль Костянтин Олегович – асистент кафедри радіотехніки, e-mail: kost_kok@ukr.net.
Вінницький національний технічний університет.