

К. О. Коваль

## АКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА БИПОЛЯРНОЙ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

*Предложены исследование и компьютерное моделирование активного элемента радиоизмерительных приборов на биполярной транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением. Получены зависимости полного сопротивления и его действительной и мнимой составляющих от напряжений питания и управления, используя эквивалентную схему, частотную зависимость эквивалентной ёмкости активного элемента на биполярной транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением.*

**Ключевые слова:** биполярная транзисторная структура, отрицательное сопротивление, радиоизмерительный прибор, эквивалентная ёмкость, действительная часть полного сопротивления, мнимая часть полного сопротивления.

### Актуальность

Известно, что разработка современных радиоизмерительных приборов проводится с использованием новейшей элементной базы, что позволяет существенно упрощать классические схемы радиоизмерительных приборов (РВП). Используя оригинальные схемотехнические решения, можно достичь расширения функциональных возможностей таких РВП [1]. Электрическое управление параметрами функциональных узлов РВП в основном осуществляется с помощью варикапов. Однако данные устройства имеют относительно небольшой коэффициент перестройки (от 1 до 50), значение эквивалентной ёмкости (от 1 пФ до 500 пФ) и добротность (от 10 до 100) [2, 3]. Представленных недостатков не имеют электрически управляемые эквиваленты ёмкостей на биполярной транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением (БТСОС) за счёт фактического использования в них четырёх *p-n*-переходов [4, 5]. Но для использования таких элементов важно иметь представление о физике процессов, на которых базируется их работа, и уметь моделировать электрические характеристики.

Поэтому **целью** данной **статьи** является исследование активного элемента радиоизмерительных приборов на биполярной транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением. Для достижения поставленной цели необходимо решить такие **задачи**: 1) вывести зависимость полного сопротивления активного элемента РВП и его активной и реактивной составляющих на БТСОС от напряжений питания и управления с учетом физических процессов, которые в них происходят; 2) провести моделирование зависимостей вольт-амперной характеристики, эквивалентной ёмкости, действительной и мнимой частей полного сопротивления в частотном диапазоне, а также от изменения напряжений питания и управления активного элемента РВП на БТСОС; 3) провести моделирование влияния дестабилизирующих факторов на перечисленные выше параметры активного элемента РВП на БТСВО.

### Разработка и исследование активного элемента РВП на БТСОС

Внутренняя позитивная связь в биполярной транзисторной структуре (рис. 1а), вызывающая появление отрицательного сопротивления, позволяет получить электрически управляемый эквивалент ёмкости, величину которой можно изменять напряжениями управления и питания [5]. Наглядное представление данной возможности наблюдается с её ВАХ активного элемента БТСОС. На выводах коллектор – коллектор транзисторов VT1, VT2

существующее полное сопротивление состоит из действительной части, имеющей отрицательную величину, и мнимой, владеющей емкостным эффектом.

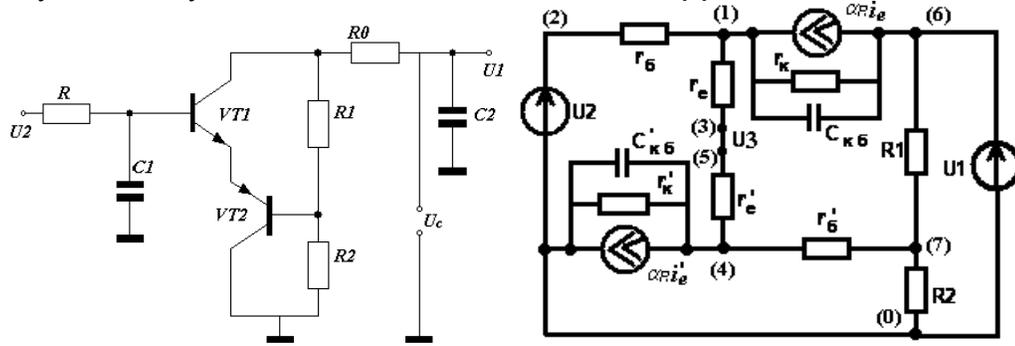


Рис. 1. Электрическая схема (а) и эквивалентная схема замещения (б) активного элемента РВП на БТСОС

Данный активный элемент РВП на БТСОС состоит из двух комплементарных биполярных транзисторов VT1, VT2; двух источников U1 – питание, U2 – управление; фильтрующих цепей питания RC1, R0C2; делителя напряжения R1, R2, определяющего место расположения рабочей точки на вольт-амперной характеристике данного эквивалента ёмкости относительно напряжения питания. Для получения зависимостей действительной и мнимой частей полного сопротивления от напряжений питания и управления составим эквивалентную схему замещения активного элемента для РВП на БТСОС, используя модель Эберса – Мола для пары биполярных транзисторов (рис. 1б).

Воспользовавшись пакетом прикладных математических исследований Maple и его специализированным приложением Syrup для символьных расчетов электрических схем, проведем расчет полного сопротивления активного элемента для РВП на БТСВО. Описание эквивалентной схемы (рис. 1б) активного элемента для РВП на БТСОС представим в символьном виде.

```
> 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');
```

Полученный символьный результат полного сопротивления упростим и преобразуем, используя специализированный математический пакет WolframMathematica,

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

где  $B_1 = (1+a2)R_5(R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8))$ ,  $B_3 = R_3(R_5 + R_6 + R_7)R_8$ ,  $B_4 = R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8)$ ,

$$\begin{aligned}
B_5 &= R_4(R_5 + R_6 + R_8), \quad B_2 = R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8) + R_5(R_7 + R_8 + iC_2(R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8))\omega), \\
B_6 &= (R_5 + R_6)R_7, \quad B_7 = B_1 + B_3 + B_6R_3 + B_6R_4 + R_4(R_5 + R_6 + R_7)R_8, \quad B_8 = (1 + a1)R_2, \\
B_9 &= R_6(R_3 + R_4 + R_7) + (R_3 + R_4 + R_6 + R_7)R_8, \quad B_{10} = B_4C_1C_2(R_3 + R_4)\omega^2, \quad B_{11} = R_5(R_6 + a2R_6 + R_7), \\
B_{12} &= R_3 + R_4, \quad B_{15} = (1 + a1)B_4C_2 + C_1(B_{12} + R_6 + a2R_6)R_7 + C_1(B_{12} + (1 + a2)(R_6 + R_7))R_8, \\
B_{13} &= R_5 + R_6 + R_8, \quad B_{16} = -i(B_{11} + B_5 + B_{13}R_8 + B_{13}R_3 + R_6R_7 + R_6R_8 + R_7R_8), \\
B_{14} &= B_1 + B_2R_3 + B_2R_4 + R_2(-B_{10}R_5 + R_3R_5 + R_4R_5 + R_3R_6 + R_4R_6 + R_5R_6 + a2R_5R_6 + R_3R_8 + \\
&+ R_4R_8 + R_5R_8 + a1R_5R_8 + a2R_5R_8 + i(B_7C_1 + B_{12}C_2R_5(R_6 + R_8))\omega).
\end{aligned}$$

Используя специализированный математический пакет WolframMathematica, проведем разложение и упрощение полученного выражения полного сопротивления активного элемента РВП на БТСОС на действительную и мнимую части.

$$\operatorname{Re}[Z] = \frac{-(D + D_1)R_2}{D + 2D_1 + R_2^2(2D_3R_3R_5 + R_3^2(C_1D_2 + D_4 + (R_6 + R_8)^2 + 2R_5(R_6 + R_8 + C_1^2D_3(R_7 + R_8)^2\omega^2)))},$$

где  $D_4 = R_5^2(1 + (2C_1C_2R_8^2 + C_1^2(R_7 + R_8)^2 + C_2^2(C_1^2D_2 + (R_6 + R_8)^2))\omega^2)$ ,  $D_3 = (R_7R_8 + (R_6(R_7 + R_8))\omega^2)$ ,

$$D = (R_3(R_5 + R_6)R_7 + R_3(R_5 + R_6 + R_7)R_8 + (1 + a2)R_5(R_7R_8 + (R_6(R_7 + R_8)))^2 + C_2^2R_3^2R_5^2(R_7R_8 + (R_6(R_7 + R_8))^2\omega^2),$$

$$D_1 = R_2((1 + a2)R_5^2((1 + a2)R_6 + (1 + a1 + a2)R_8)(R_7R_8 + (R_6(R_7 + R_8))) + R_3R_5((2(1 + a2)R_6 + 2(1 + a)R_3 \cdot (R_7R_8 + (R_6(R_7 + R_8))) + R_5(2(1 + a2)R_6(R_7 + R_8) + R_8((2 + a1 + 2a2)R_7 + (1 + a1 + a2)R_8))) + R_3^2((R_5 + R_6 + R_8)((R_5 + R_6)R_7 + (R_5 + R_6 + R_7)R_8) + C_2^2R_5^2(R_6 + R_8)(R_7R_8 + (R_6(R_7 + R_8))\omega^2))),$$

$$D_2 = (R_7R_8 + (R_6(R_7 + R_8))^2\omega^2), \quad D_6 = 2(1 + a2)R_6R_8(1 + a1 + a2 + (1 + a2)C_1^2R_7(R_7 + R_8)\omega^2),$$

$$D_5 = ((1 + a2)C_1^2D_2 + (R_6 + R_8)((1 + a2)R_6 + (1 + a1 + a2)R_8) + R_5(R_6 + a2R_6 + R_8 + a1R_8 + a2R_8 + C_1D_3(-a1C_2R_8 + (1 + a2)C_1(R_7 + R_8))))),$$

$$D_6 = 2(1 + a2)R_6R_8(1 + a1 + a2 + (1 + a2)C_1^2R_7(R_7 + R_8)\omega^2).$$

Мнимая часть полного сопротивления активного элемента РВП на БТСОС

$$\operatorname{Im}[Z] = \frac{R_2^2(C_1F_2 + C_2R_3R_5^2R_8(-a1F_3 + R_3R_8))\omega}{F_2 + F_7R_2^2 + 2R_2(F_8 + (1 + a2)F_1F_3R_5^2 + R_3R_5(F_3(2(1 + a2)R_6 + (2 + a1 + 2a2)R_8) + R_5F_9))},$$

где  $F = (R_3(R_5 + R_6)R_7 + R_3(R_5 + R_6 + R_7)R_8 + (1 + a2)R_5(R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8)))^2$ ,

$$F_1 = (1 + a2)R_6 + (1 + a1 + a2)R_8, \quad F_2 = F + C_2^2R_3^2R_5^2(R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8))^2\omega^2, \quad F_3 = R_7R_8 + R_6(R_7 + R_8)$$

$$F_4 = R_5^2(1 + \omega^2(2C_1C_2R_8^2 + C_1^2(R_7 + R_8)^2 + C_2^2((R_6 + R_8)^2 + C_1^2F_3^2\omega^2))),$$

$$F_5 = R_6 + a2R_6 + R_8 + a1R_8 + a2R_8 + C_1F_3(-a1C_2R_8 + (1 + a2)C_1(R_7 + R_8))\omega^2,$$

$$F_6 = R_8^2((1 + a1 + a2)^2 + (1 + a2)^2C_1^2R_7^2\omega^2) + 2(1 + a2)R_6R_8(1 + a1 + a2 + (1 + a2)C_1^2R_7(R_7 + R_8)\omega^2) + (1 + a2)^2R_6^2(1 + C_1^2(R_7 + R_8)^2\omega^2),$$

$$F_7 = (F_6R_5^2 + 2R_3R_5(F_5R_5 + F_1(R_6 + R_8)) + (1 + a2)C_1^2F_3^2\omega^2) + R_3^2(F_4 + (R_6 + R_8)^2 + C_1^2F_3^2\omega^2 + 2R_5(R_6 + R_8 + C_1^2F_3(R_7 + R_8))),$$

$$F_8 = R_3^2((R_5 + R_6 + R_8)((R_5 + R_6)R_7 + (R_5 + R_6 + R_7)R_8) + C_2^2F_3R_5^2(R_6 + R_8)\omega^2),$$

$$F_9 = R_8((2 + a1 + 2a2)R_7 + (1 + a1 + a2)R_8) + 2(1 + a2)R_6(R_7 + R_8).$$

Проведем имитационное моделирование исследованного активного элемента РВП на БТСОС с помощью программ компьютерного моделирования электрических схем MicroCAP [6]. Электрическая схема исследованного активного элемента РВП в среде MicroCAP представлена на рис. 2.

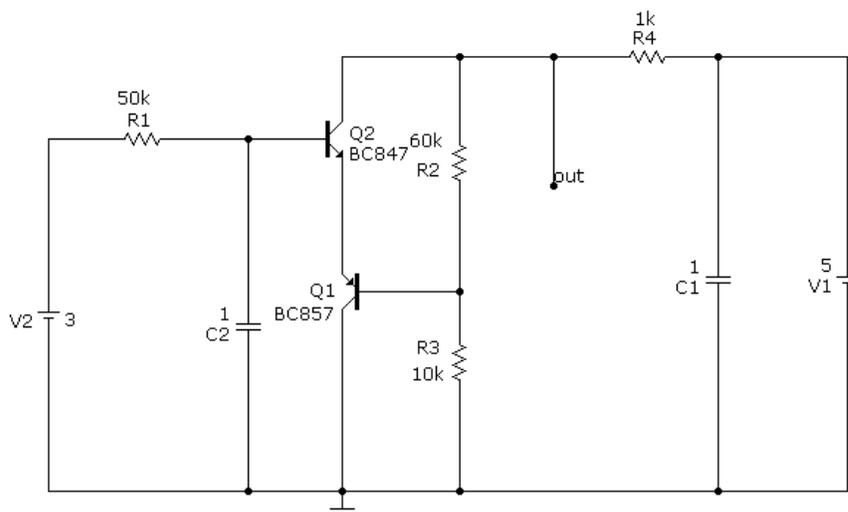


Рис. 2. Электрическая схема активного элемента РВП на БТСОС в среде MicroCAP

Вольт-амперная характеристика активного элемента РВП на БТСОС относительно напряжения питания источника V1 при разных напряжениях управления (1,5...3,5 В) представлена на рис. 3.

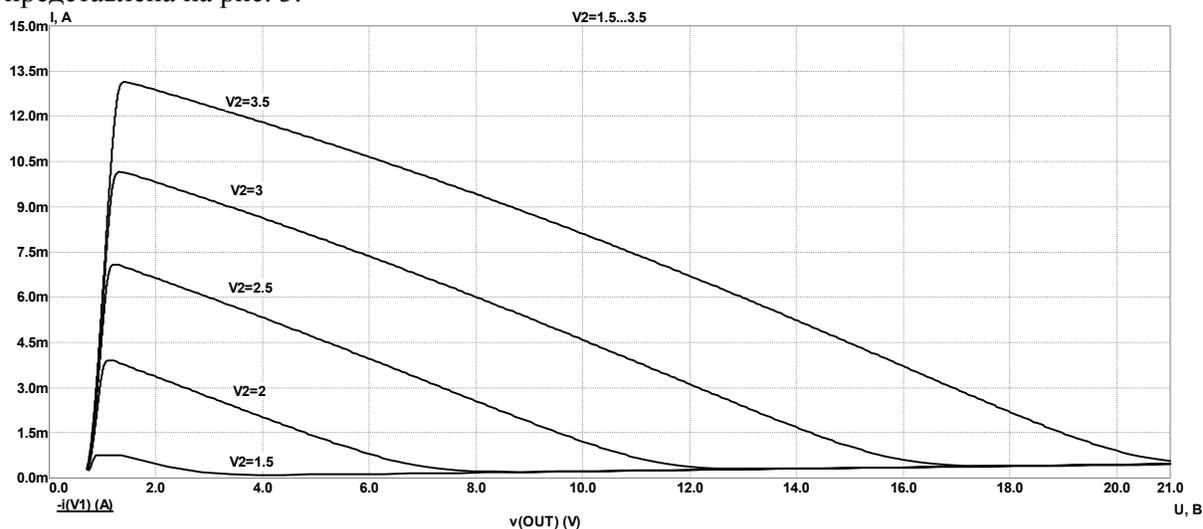


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика исследованного эквивалента ёмкости на биполярной транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением

При увеличении напряжения управления увеличивается максимальный ток ВАХ, соответственно увеличивается протяженность с падающего участка, на котором существует отрицательное дифференциальное сопротивление биполярной транзисторной структуры. При напряжении управления 1,5 В отрицательное сопротивление наблюдается в диапазоне напряжений 1 – 2,8 В. При напряжении управления 3,5 В отрицательное сопротивление наблюдается в диапазоне напряжений 1 – 20 В. Угол наклона ВАХ практически одинаковый при разных напряжениях управления, то есть значение отрицательного сопротивления также является постоянным и приблизительно равно 2 кОм. Имея наглядное представление ВАХ, легко выбрать необходимый диапазон напряжений управления и питания с целью удержания рабочей точки в зоне существования эквивалента ёмкости (на спадающей части ВАХ).

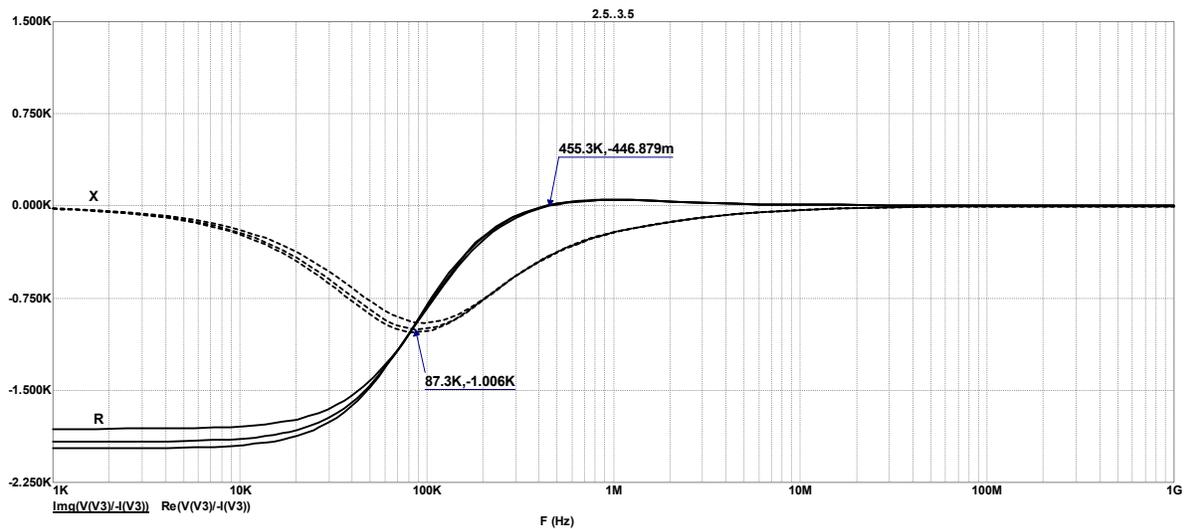


Рис. 4. Зависимость активной и реактивной составляющих полного сопротивления активного элемента РВП на БТСОС

Частотная зависимость действительной и мнимой составляющих полного сопротивления активного элемента РВП на БТСОС представлена на рис. 4. Из данного графика видно, что рабочий диапазон частот существования эквивалента ёмкости для данных условий анализа соответствует частотам от 1 кГц до 455 кГц. Отрицательная составляющая полного сопротивления является постоянной в диапазонах частот (1...20 кГц) и составляет около 2 кОм. Переходная область плавного увеличения находится в пределах от 20 кГц до 455 кГц. Реактивная составляющая полного сопротивления биполярной транзисторной структуры имеет форму перевернутого колокола, минимальная точка которой находится на частоте 87,3 кГц.

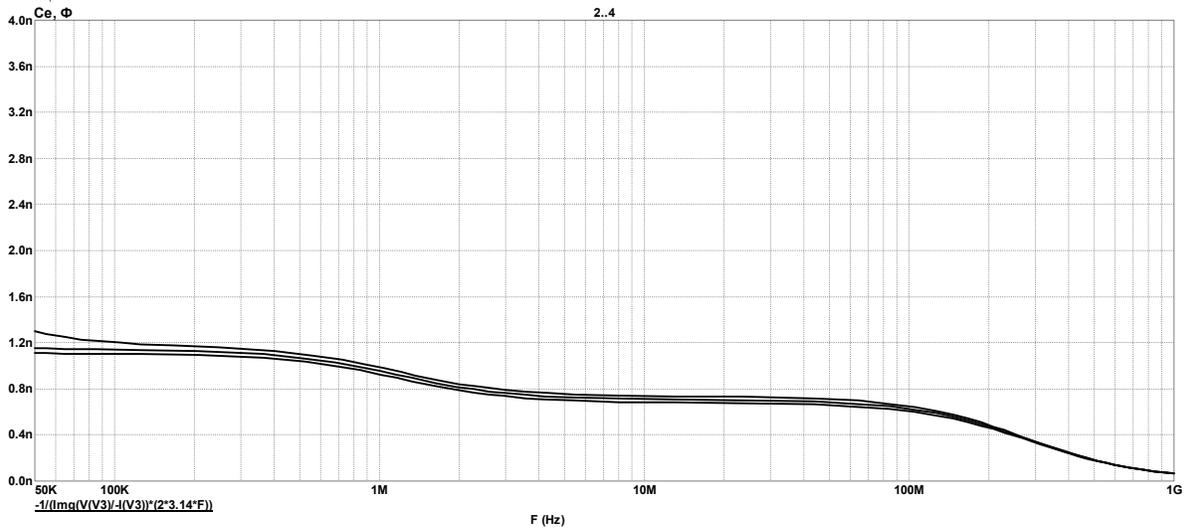


Рис. 5. Зависимость эквивалентной ёмкости активного элемента РВП на БТСОС от частоты

Зависимость изменения эквивалентной ёмкости исследованного активного элемента РВП от частоты при разных напряжениях управления (2...4 В) представлена на рис. 5. Полученная зависимость эквивалентной емкости практически не изменяется в широком диапазоне частот (50 кГц...1 МГц) и варьируется в пределах (1,2 нФ...0,75 нФ).

Изменения эквивалентной ёмкости от напряжения питания (2,5...6 В) при разных напряжениях управления (3...5 В) представлена на рис. 6. Максимальный коэффициент перекрытия ёмкости составляет 30 при напряжении управления 3 В и экспериментальной

частоте 100 кГц.

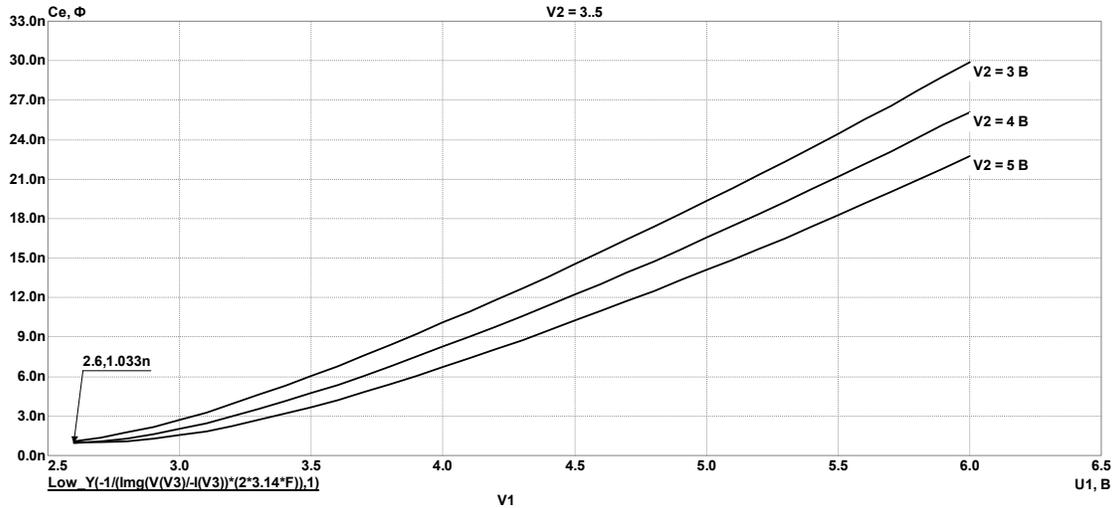


Рис. 6. Зависимость эквивалентной ёмкости активного элемента РВП на БТСОС от напряжения питания при разных напряжениях управления 3...5 В

Влияние дестабилизирующего фактора (температуры окружающей среды) на ВАХ и частотная зависимость изменения эквивалентной ёмкости активного элемента РВП на БТСОС представлены на рис. 7 и рис. 8 соответственно. Как видно на рисунке, при увеличении температуры максимальный ток увеличивается на 0,34 мА и 1,12 мА для  $T=50$  °С и  $75$  °С соответственно.

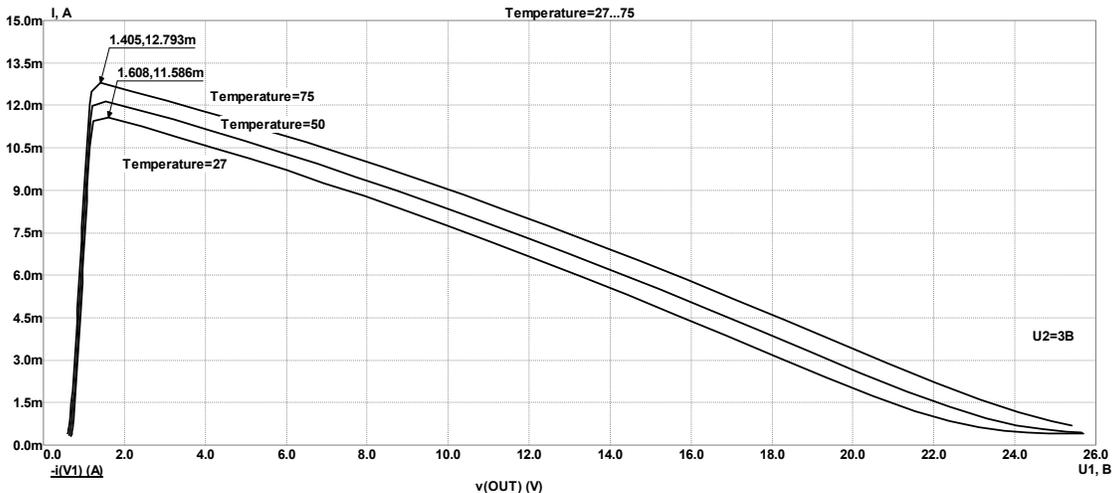


Рис. 7. ВАХ активного элемента РВП на БТСОС при разных рабочих температурах, при напряжении управления 3 В

Эквивалентная ёмкость активного элемента РВП на БТСОС на частоте 50 кГц изменяется на 0,6 нФ и 1 нФ для  $T=50$  °С та  $75$  °С соответственно. Данное влияние температуры на характер частотной зависимости при разных температурах окружающей среды наблюдается в диапазоне частот (50...250 кГц). Результаты имитационного моделирования представлены в таблице.

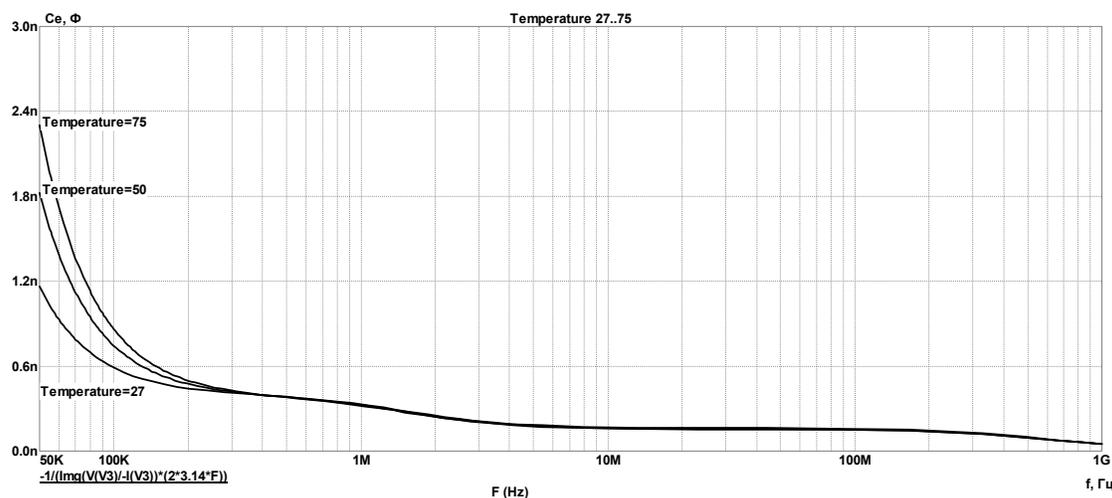


Рис. 8. Зависимость изменения эквивалентной ёмкости активного элемента РВП на БТСОС от частоты при 27, 50, 75 °С

Таблица

#### Полученные результаты имитационного моделирования активного элемента РВП на БТСОС

Параметр	Величина отрицательного сопротивления	Диапазон изменения эквивалентной ёмкости	Частотный диапазон	Диапазон рабочих напряжений	Коэффициент перестройки
Значения	кОм 2	нФ 1 – 30	кГц 1 – 455	В 1.8 – 20	единиц 30

#### Выводы

Исследован активный элемент РВП на БТСОС с возможностью электрического управления эквивалентной ёмкостью с коэффициентом перестройки 30. Получены аналитические зависимости активной и реактивной составляющих полного сопротивления активного элемента РВП на БТСОС. С помощью компьютерного моделирования получены семейства вольт-амперных характеристик, частотные зависимости действительной и мнимой частей полного сопротивления, эквивалентной ёмкости БТСОС и влияния дестабилизирующего фактора на эти параметры исследованного активного элемента.

Использование разработанного активного элемента для РВП на БТСОС позволит упростить классические схемы РВП, улучшить электрическую управляемость РВП и выполнить их в интегральном виде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 ёмкость / 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 Константин Олегович** – ассистент кафедры радиотехники, e-mail: kost\_kok@ukr.net.  
Винницкий национальный технический университет.