

УДК 621.396

А. В. Осадчук, д. т. н., проф.; А. А. Семенов, к. т. н., доц.;
А. А. Лазарев, к. т. н., доц.; К. О. Коваль, к. т. н.

ЁМКОСТНОЙ АКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Представлены результаты исследования ёмкостного активного элемента на полевой транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением. Получены аналитические зависимости полного сопротивления от напряжений питания и управления. Исследованы вольт-амперная, частотная и вольт-фарадная зависимости эквивалентной ёмкости активного элемента на полевой транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением.

Ключевые слова: полевая транзисторная структура, отрицательное сопротивление, радиоизмерительный прибор, эквивалентная ёмкость, полное сопротивление.

Актуальность

Известно, что разработку современных радиоизмерительных приборов проводят с использованием новейшей элементной базы, что позволяет значительно упрощать классические схемы радиоизмерительных приборов. Кроме того, благодаря использованию оригинальных схемотехнических решений, стало возможным одновременное расширение их функциональных возможностей [1]. Электрическое управление параметрами функциональных узлов радиотехнических устройств и радиоизмерительных приборов осуществляется чаще всего с помощью варикапов. Однако эти устройства имеют относительно небольшой коэффициент перестройки (от 1 до 50), низкие значения эквивалентной ёмкости (от 1 до 500 пФ), высокие значения напряжений управления (от 5 до 25 В) и низкую добротность (от 10 до 50) [2, 3]. Указанные недостатки отсутствуют в разработанном ёмкостном активном элементе на полевой транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением [4, 5]. Чтобы использовать такие электрически управляемые эквиваленты ёмкостей, важно знать физические процессы, на которых основывается их работа.

Поэтому **целью** этой **статьи** является исследование ёмкостного активного элемента на полевой транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением (ЕАЭ на ПТСОС). Для достижения поставленной цели необходимо решить такие **задачи**: вывести уравнение полного сопротивления ЕАЭ на ПТСОС; выполнить моделирование зависимостей вольт-амперной характеристики ПТСОС, действительной и мнимой частей полного сопротивления ЕАЭ на ПТСОС в частотном диапазоне, зависящих от изменений напряжений питания и управления; получить графики частотных характеристик эквивалентной ёмкости; исследовать влияние дестабилизирующих факторов на приведенные выше параметры ЕАЭ на ПТСОС.

Исследование ЕАЭ на ПТСОС

Внутренняя позитивная связь в полевой транзисторной структуре (рис. 1а), которая приводит к появлению отрицательного сопротивления, позволяет получить электрически управляемый эквивалент ёмкости, величину которой можно изменять напряжениями управления и питания [5]. На выводах сток-сток транзисторов VT1, VT2 налицо полное сопротивление, которое является суммой действительной составляющей, имеющей отрицательное значение, и мнимой составляющей с ёмкостным характером (эффектом).

Представлены ЕАЭ на ПТСОС состоит из двух комплементарных полевых транзисторов VT1, VT2; двух источников: U1 – питание, U2 – управления. Его эквивалентная схема (рис. 1б) по переменному току включает в себя схемы замещения первого и второго транзисторов соответственно: R1, R4 – сопротивление затвор-исток, R2, R3 – сопротивление сток-исток, C1, C6 – ёмкость затвор-исток, C2, C4 – ёмкость затвор-сток, C3, C5 – ёмкость сток-исток, g, g1 – источники напряжения, управляемые напряжениями на затворах транзисторов VT1, VT2 соответственно. Эквивалентная ёмкость возникает на выводах Uc, а её величину можно изменять напряжениями управления и питания.

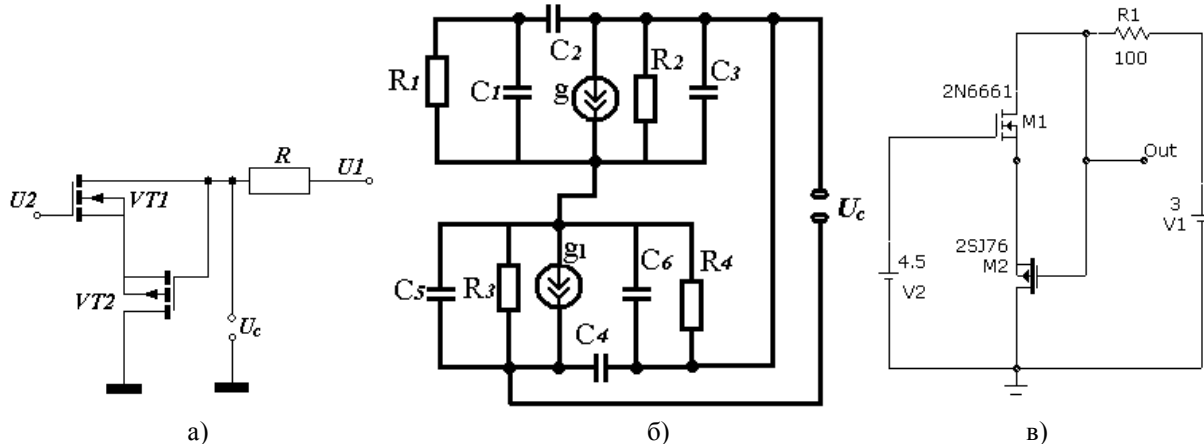


Рис. 1. Схемы ЕАЭ на ПТСВО: электрическая (а), эквивалентная по переменному току (б), в среде MicroCAP (в)

Для выведения аналитических зависимостей действительной и мнимой частей полного сопротивления от напряжений питания и управления использовался пакет прикладных математических исследований Maple и его специализированное приложение Syrup для символьных расчетов электрических схем. Получена аналитическая зависимость ЕАЭ на ПТСОС.

$$\dot{Z} = \frac{-(U_1(-jB_1 + jB_2 + ((C_1 + C_3 + C_5 + C_6)R_1R_2R_3R_4 + (B_6R_1R_2R_3 + (B_8 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6)R_1R_2)R_4)R_5)\omega))}{B_4 - jB_7R_3 + R_1(-j(1 + g_1R_3)R_4U_1 + R_2(jB_3 + B_5 - j(U_1 + g_1R_3U_1 - gR_4U_2)) + R_3R_4(B_6U_1 - (C_1 + C_2)U_2)\omega)},$$

где

$$B_1 = R_1R_2R_3 + R_1R_2R_4 + R_1R_3R_4 + R_2R_3R_4 + (R_1 + R_3 + gR_1R_3)(R_2 + R_4)R_5,$$

$$B_2 = (C_3(C_4 + C_5) + C_5C_6 + C_1(C_2 + C_3 + C_4 + C_6) + C_4(C_5 + C_6) + C_2(C_3 + C_5 + C_6))R_1R_2R_3R_4R_5\omega^2,$$

$$B_3 = R_3R_4(C_1(C_2 + C_3 + C_4 + C_6)U_1 + (C_3(C_4 + C_5) + C_5C_6 + C_4(C_5 + C_6))U_1 + C_2(C_3 + C_5 + C_6)(U_1 - U_2) - C_1(C_2 + C_3 + C_6)U_2)\omega^2, B_4 = R_2R_3R_4((C_2 + C_3 + C_4 + C_6)U_1 - (C_2 + C_3 + C_6)U_2)\omega,$$

$$B_5 = (((C_1 + C_2 + C_4 + C_5)R_3 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6 + (C_3 + C_6)g_1R_3)R_4)U_1 - ((C_1 + C_2)R_3 + (C_2 + (C_1 + C_5)gR_3)R_4)U_2)\omega, B_6 = C_1 + C_2 + C_4 + C_5, B_7 = (R_2 + R_4)U_1 - (R_2 + R_4 + gR_2R_4)U_2, B_8 = (B_6R_1 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6 + (C_3 + C_6)g_1R_1)R_2)R_3.$$

Выполнено разложение полного сопротивления ЕАЭ на ПТСОС на действительную и мнимую составляющие, используя специализированный математический пакет WolframMathematica [5]. Полученные уравнения являются громоздкими, их решение возможно при помощи современной вычислительной техники с использованием специализированных математических пакетов программ. Детальное их исследование и решение приводится в монографии [5].

Электрическая схема ЕАЭ на ПТСОС в среде MicroCAP представлена на рис. 1 в. Проведено имитационное моделирование с помощью программы компьютерного моделирования электрических схем MicroCAP. Вольт-амперная характеристика ЕАЭ на ПТСОС относительно напряжения питания источника V1 при разных напряжениях

управления (2...9 В) представлена на рис. 2. При увеличении напряжения управления наблюдается увеличение протяженности спадающего участка полученной зависимости, на котором возникает отрицательное дифференциальное сопротивление полевой транзисторной структуры. При напряжении управления 3 В отрицательное сопротивление наблюдается в диапазоне напряжений 0,5 – 1,5 В. При напряжении управления 6 В отрицательное сопротивление наблюдается в диапазоне напряжений 2 – 4,5 В. Имея наглядное представление ВАХ, легко выбрать необходимый диапазон напряжений управления и питания с целью удержания рабочей точки на участке существования эквивалента ёмкости (на спадающем участке ВАХ).

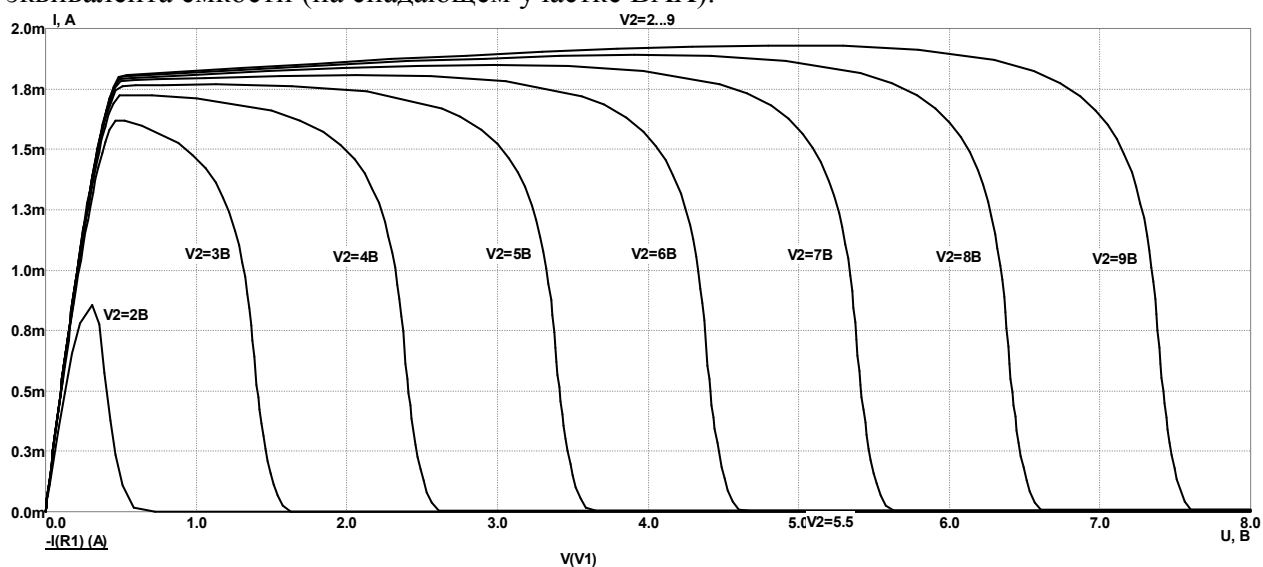


Рис. 2. Семейство вольт-амперных характеристик ЕАЭ на ПТСОС при разных напряжениях управления 2 – 8 В

Частотная зависимость действительной и мнимой составляющих полного сопротивления ЕАЭ на ПТСОС при разных напряжениях управления (4,75; 5; 5,25; 5,5 В) представлена на рис. 3. Напряжением управления обеспечивается возможность изменения абсолютных значений действительной и мнимых составляющих, а также частотное размещение качественных (характерных) точек этих зависимостей (рис. 3). В частности, для действительной составляющей полного сопротивления ЕАЭ на ПТСОС значение отрицательного сопротивления изменяется от 1 кОм до 6 кОм, который наблюдается в частотном диапазоне от 38 МГц до 100 МГц соответственно для напряжений 4,75 В и 5,5 В. А мнимая составляющая полного сопротивления ЕАЭ на ПТСВО с ёмкостным характером имеет форму перевернутого колокола, экстремум которой с возрастанием напряжения управления увеличивает свое абсолютное значение, при этом смещаясь в низкочастотную область (832 кГц...8,3 МГц).

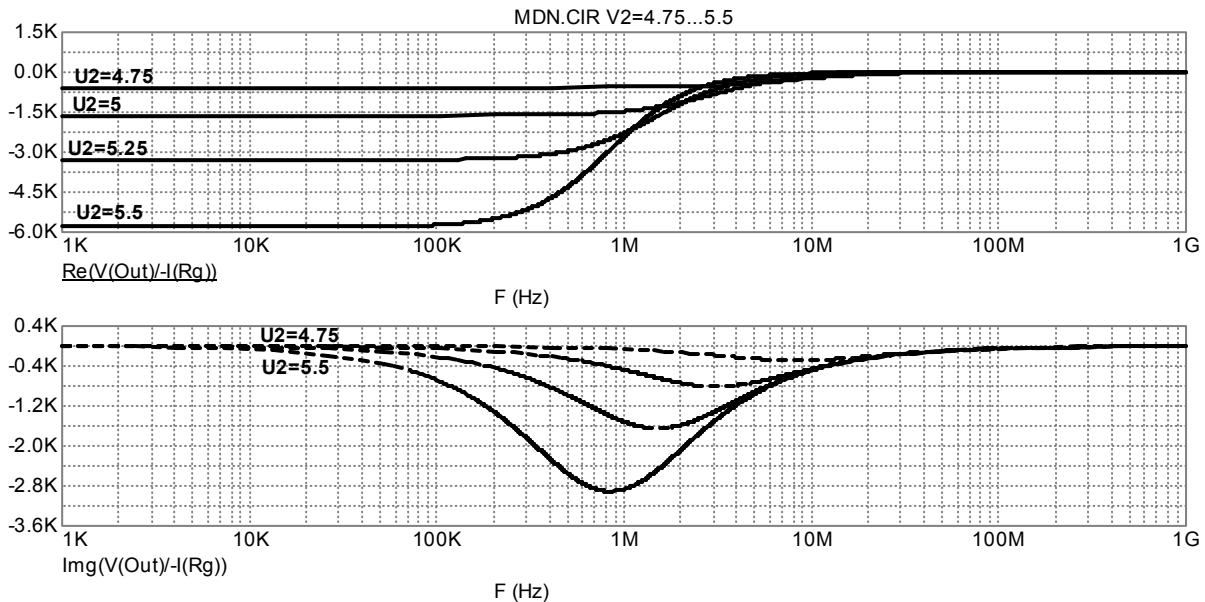


Рис. 3. Частотная зависимость активной и реактивной составляющих полного сопротивления ЕАЭ на ПТСОС

Частотная зависимость эквивалентной ёмкости исследованного ЕАЭ на ПТСОС при напряжении управления 4,5 В приведена на рис. 4. На полученной зависимости характерными являются две области. Первая – значительного изменения эквивалентной ёмкости от 1090 пФ до 43 пФ ЕАЭ на ПСОТ. На второй – эквивалентная ёмкость, практически неизменяемая в широком частотном диапазоне от 500 кГц до 1 ГГц, варьируется в пределах от 43 пФ до 32 пФ.

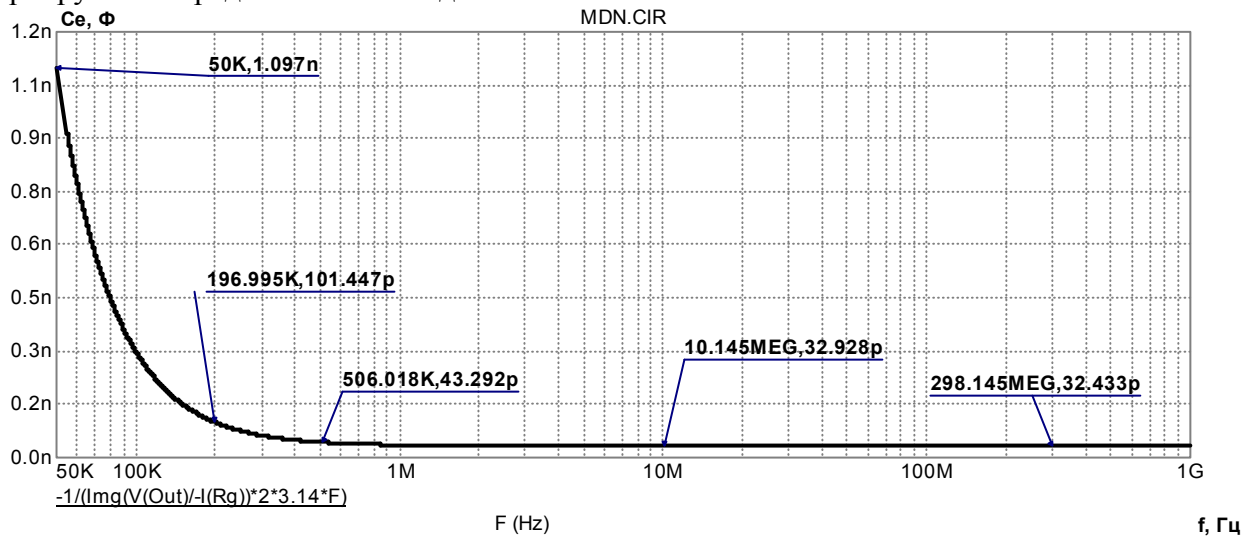


Рис. 4. Частотная зависимость эквивалентной ёмкости ЕАЭ на ПТСОС

График зависимости изменения эквивалентной ёмкости ЕАЭ на ПТСОС от напряжения питания (0...4 В) при разных напряжениях управления (3...5 В) представлен на рис. 5 (вольт-фарадная характеристика). Максимальный коэффициент перекрытия ёмкости составляет 139 (10,506 нФ / 75,504 пФ) при напряжении питания 3,31 В (напряжение питания 5 В, экспериментальная частота 500 кГц).

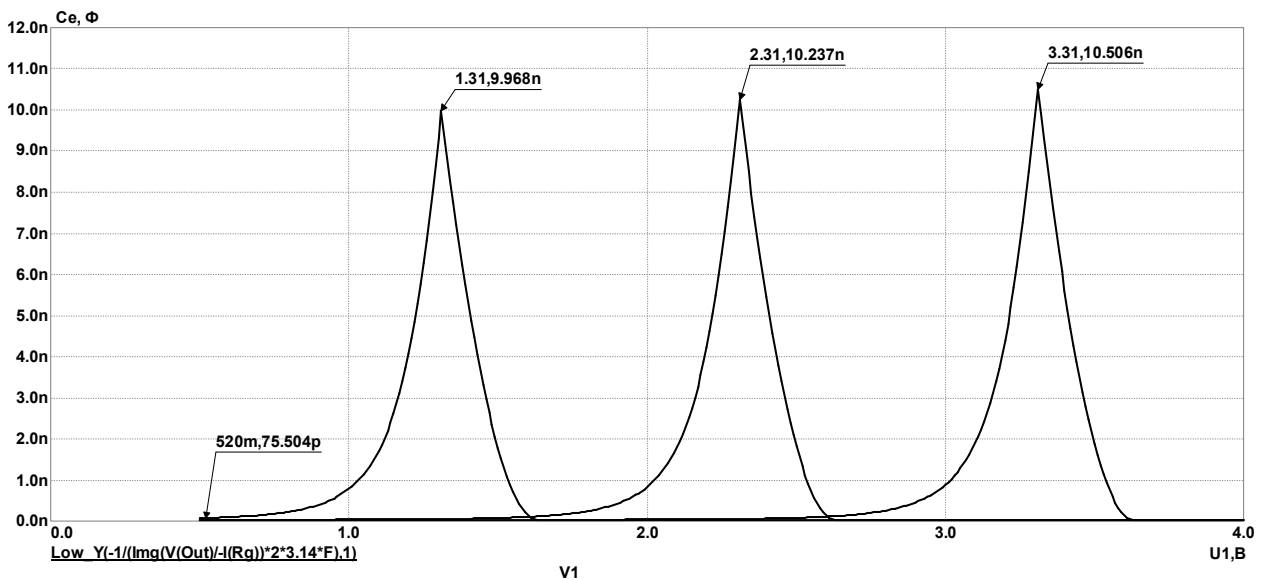


Рис. 5. Зависимость величины эквивалентной ёмкости ЕАЭ на ПТСОС от напряжения управления (напряжения питания 3...5 В)

Влияние дестабилизирующего фактора (изменения температуры окружающей среды) на частотную зависимость изменения эквивалентной ёмкости ЕАЭ на ПТСВО представлено на рис. 6. При увеличении температуры окружающей среды абсолютное значение эквивалентной ёмкости ЕАЭ на ПТСВО уменьшается. Температурный коэффициент ёмкости разработанного ЕАЭ на ПТСВО находится в пределах $2 - 3 \cdot 10^{-4} (1/^{\circ}\text{C})$, как и у современных варикапов.

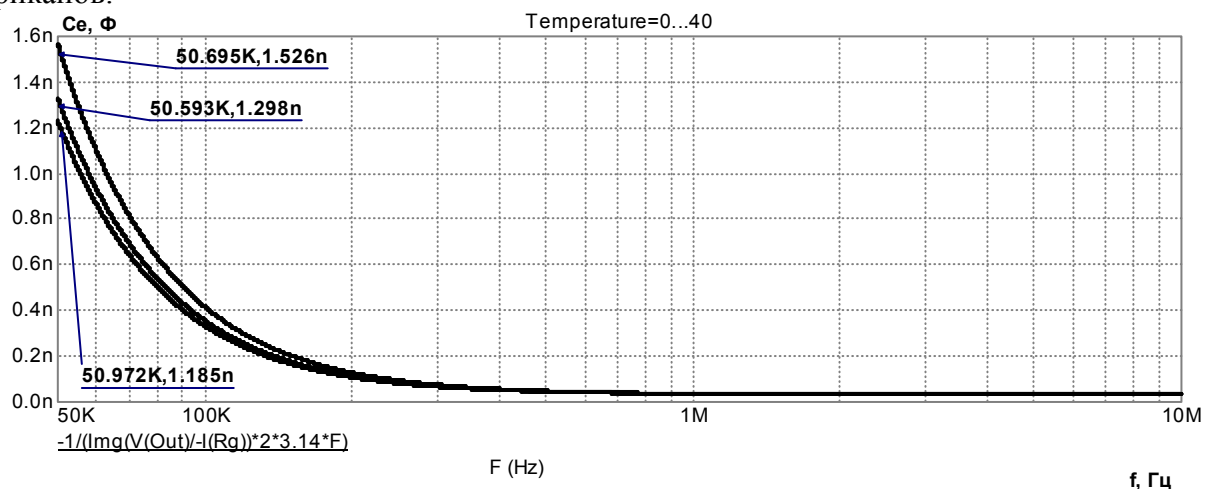


Рис. 6. Частотная зависимость эквивалентной ёмкости ЕАЭ на ПТСОС при изменении температуры окружающей среды

Обобщенные результаты имитационного моделирования ЕАЭ на ПТСОС представлены в таблице.

Таблица

Результаты имитационного моделирования активного элемента РВП на ПТСОС

Параметр	Величина отрицательного сопротивления (кОм)	Диапазон изменений эквивалентной ёмкости (нФ)	Частотный диапазон (МГц)	Диапазон рабочих напряжений (В)	Коэффициент перестройки (единиц)
Значение	1 – 6	0,075 – 10,5	0,001 – 31	0,5 – 8	139

Используя ёмкостной эффект ЕАЭ на ПТСОС разработаны и исследованы однозвенный и двухзвенный электрические фильтры. Проведено моделирование их основных

характеристик и параметров (частот среза, полос пропускания, крутизны угасания за полосами пропусканий) в зависимости от влияния напряжений управления и питания. ЕАЭ на ПТСОС в разработанном ФНЧ (рис. 7) создается транзисторной структурой VT1, VT2 (2N6804 и 2N6661), полное сопротивление которого создается суммой действительной и мнимой составляющих, имеющих отрицательное сопротивление и ёмкостной характер соответственно. Значения составляющих полного сопротивления можно изменять напряжениями управления и питания, что влияет на рабочие параметры и характеристики ФНЧ на ПТСОС в целом.

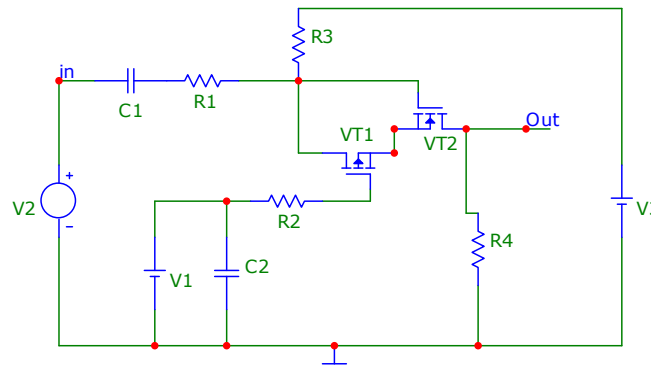


Рис. 7. Электрическая схема однозвенного ФНЧ на ПТСОС

Полученные результаты моделирования АЧХ та ФЧХ (рис. 8) разработанного ФНЧ при разных напряжениях управления (2...5 В) подтверждают возможность управления частотой среза (при увеличении напряжения управления возрастает значение частоты среза) в диапазоне от 0,5 ... 5 МГц, при максимальном затухании вне полосы пропускания до 20 дБ/октава.

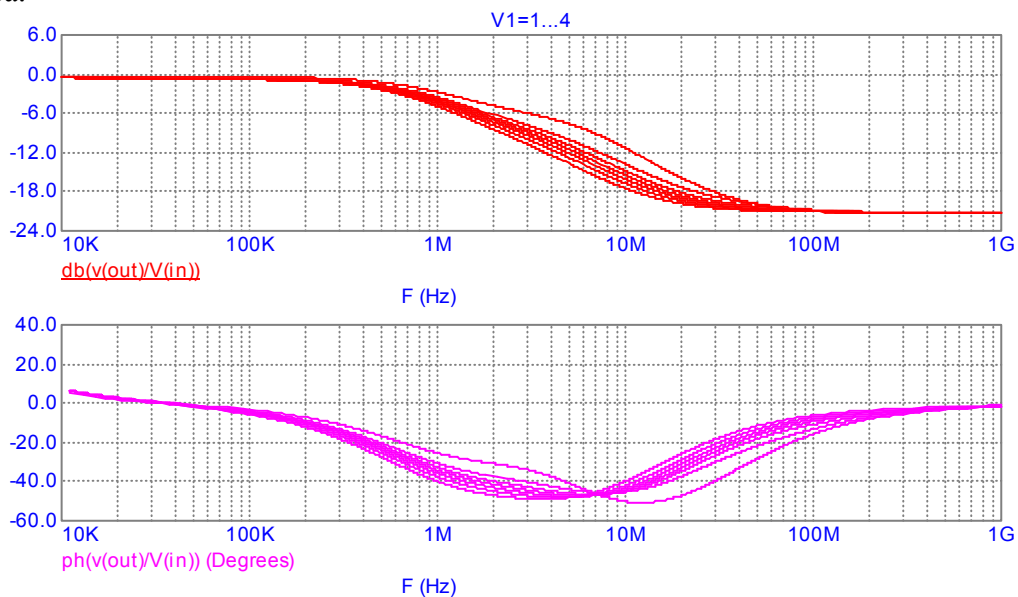


Рис. 8. АЧХ и ФЧХ однозвенного ФНЧ на ПТСОС при разных напряжениях управления (1 – 4 В)

С целью улучшения рабочих характеристик исследованного ФНЧ на ПТСОС целесообразно увеличить количество активных звеньев и провести анализ рабочих параметров двухзвенного ФНЧ на ПТСОС, электрическая схема которого будет содержать два, представленных на рис. 7, фильтрующих звена. Результаты моделирования АЧХ двухзвенного ФНЧ на ПТСОС представлены на рис. 9.

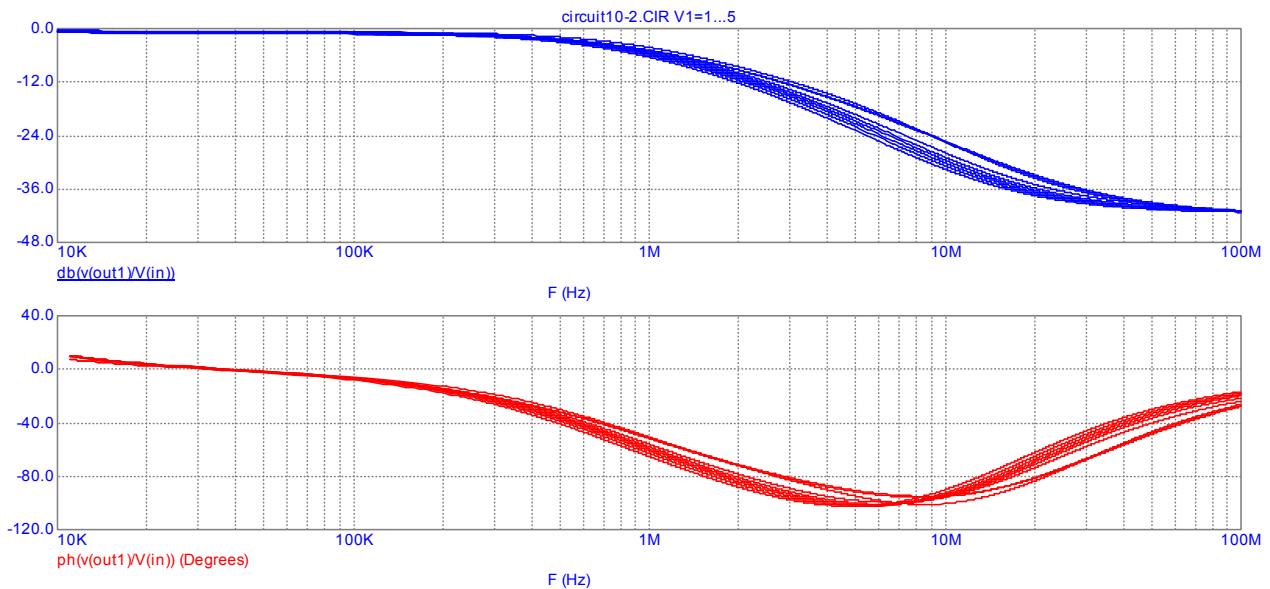


Рис. 9. АЧХ и ФЧХ двухзвенного ФНЧ на ПТСОС при разных напряжениях управления (1 – 5 В)

Полученная АЧХ подтверждает возможность управления частотой среза (при увеличении напряжения управления возрастает значение частоты среза) в диапазоне от 700 кГц до 2 МГц при изменении напряжения управления от 1 – 5 В, с увеличением вдвое ослабления вне полосы пропускания (максимальное 40 дБ).

Выводы

Исследован ёмкостной активный элемент на полевой транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением, в котором возможно электрически управлять величиной его эквивалентной ёмкости с коэффициентом перестройки до 139 единиц при напряжении управления 3,31 В (напряжение питания 5 В и экспериментальной частотой 500 кГц). При этом отрицательная составляющая полного сопротивления ЕАЭ на ПТСОС изменяется в диапазоне 1 – 6 кОм, абсолютное изменение его эквивалентной ёмкости соответствует 0,075 – 10,5 нФ, а частотный рабочий диапазон находится в пределах 0,001 – 31 МГц. Исследование однозвенного и двухзвенного ФНЧ с использованием ЕАЭ на ПТСОС подтвердили электрическую управляемость полосой пропускания (частотой среза), возможность управления частотой среза в диапазоне от 0,5...5 МГц (700 кГц ... 2 МГц), а также то, что при максимальном затухании вне полосы пропускания составляет до 20 дБ/октава (40 дБ/октава) для однозвенного и двухзвенного ФНЧ с ЕАЭ на ПТСОС. Использование разработанного ЕАЭ на ПТСОС позволит упростить классические схемы радиоизмерительных приборов и радиотехнических устройств, улучшая при этом их электрическую управляемость и обеспечивая возможность 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 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. Осадчук В. С. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі ємнісного ефекту транзисторних структур з від'ємним опором: монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов,

К. О. Коваль. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011. – 336 с.

Осадчук Александр Владимирович – заведующий кафедрой радиотехники, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

Семенов Андрей Александрович – доцент кафедры радиотехники, e-mail: semenov79@ukr.net.

Лазарев Александр Александрович – доцент кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры, e-mail: laalex@mail.ru.

Коваль Константин Олегович – старший преподаватель кафедры радиотехники, e-mail: vsort11@gmail.com.

Винницкий национальный технический университет.