УДК 621.396

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

ЄМНІСНИЙ АКТИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ НА ПОЛЬОВІЙ ТРАНЗИСТОРНІЙ СТРУКТУРІ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Представлено результати дослідження ємнісного активного елемента на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором. Отримано аналітичні залежності повного опору від напруг живлення та керування. Досліджено вольт-амперну, частотну та вольт-фарадну залежності еквівалентної ємності активного елемента на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором.

***Ключові слова**: польова транзисторна структура, від'ємний опір, радіовимірювальний прилад, еквівалентна ємність, повний опір.*

Актуальність

Відомо, що розробку сучасних радіовимірювальних приладів проводять із використанням новітньої елементної бази, що дозволяє значно спрощувати класичні схеми радіотехнічних пристроїв і радіовимірювальних приладів. Крім того, завдяки застосуванню оригінальних схемотехнічних рішень, стало можливим одночасне розширення їхніх функціональних властивостей [1]. Електричне керування параметрами функціональних вузлів радіотехнічних пристроїв і радіовимірювальних приладів здійснюють переважно за допомогою варикапів. Проте ці пристрої мають відносно невеликий коефіцієнт перелаштування (від 1 до 50), низькі значення еквівалентної ємності (від 1 до 500 пФ), високі значення напруг керування (від 5 до 25 В) і низьку добротність (від 10 до 50) [2, 3]. Зазначені недоліки відсутні в розробленому ємнісному активному елементі на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором [4, 5]. Щоб використовувати такі електрично керовані еквіваленти ємностей, важливо знати фізичні процеси, на яких ґрунтується їхня робота.

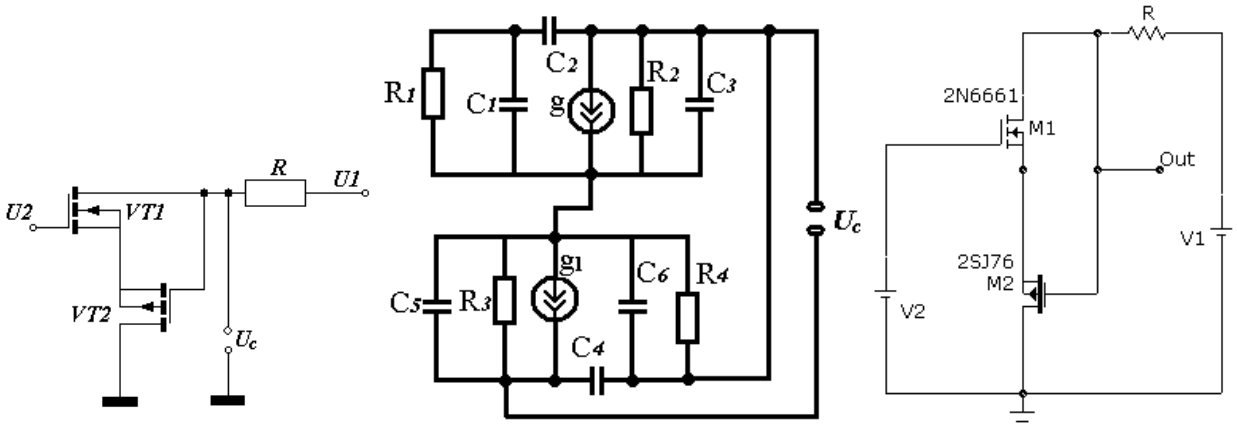
Тому **метою статті** є дослідження ємнісного активного елемента на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором (ЄАЕ на ПТСВО). Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**: вивести рівняння повного опору ЄАЕ на ПТСВО; виконати моделювання залежностей вольт-амперної характеристики ПТСВО, дійсної та уявної частин повного опору ЄАЕ на ПТСВО в частотному діапазоні, які залежатимуть від змін напруг живлення й керування; отримати графіки частотних характеристик еквівалентної ємності; дослідити вплив дестабілізуючих чинників на перераховані вище параметри ЄАЕ на ПТСВО.

Дослідження ЄАЕ на ПТСВО

Внутрішній позитивний зв'язок у польовій транзисторній структурі (рис. 1а), який призводить до появи від'ємного опору, дозволяючи отримати ємнісний активний елемент, величину ємності якого можна змінювати напругами керування та живлення [5]. На виводах стік-стік транзисторів VT1, VT2 наявний повний опір, який є сумою дійсного складника, що має від'ємне значення, та уявного складника з ємнісним характером (ефектом).

Представлений ЄАЕ на ПТСВО складається з двох комплементарних польових транзисторів VT1, VT2; двох джерел: U1 – живлення, U2 – керування. Його еквівалентна схема (рис. 1 б) за змінним струмом містить схеми заміщення першого та другого транзисторів відповідно: R1, R4 – опір затвор-витік, R2, R3 – опір стік-витік, C1, C6 – ємність затвор-витік, C2, C4 – ємність затвор-стік, C3, C5 – ємність стік-витік, g, g1 –

джерела напруги, керовані напругами на затворах транзисторів VT1, VT2 відповідно. Еквівалентна ємність виникає на виводах Uc, а її величину можна змінювати напругами керування та живлення.



а) б) в)

Рис. 1. Схеми ЄАЕ на ПТСВО: електрична (а), еквівалентна за змінним струмом (б), у середовищі MicroCAP (в)

Для виведення аналітичних залежності дійсного та уявного складників повного опору від напруг живлення та керування використано пакет прикладних математичних досліджень Maple та його спеціалізований додаток Syrup для символьних розрахунків електричних схем. Отримано аналітичну залежність повного опору ЄАЕ на ПТСВО

$$\dot{Z} = \frac{-(U_1(-jB_1 + jB_2 + ((C_1 + C_3 + C_5 + C_6)R_1R_2R_3R_4 + (B_6R_1R_2R_3 + (B_8 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6)R_1R_2)R_4)R_5)\omega))}{B_4 - jB_7R_3 + R_1(-j(1+g1R_3)R_4U_1 + R_2(jB_3 + B_5 - j(U_1 + g1R_3U_1 - gR_4U_2)) + R_3R_4(B_6U_1 - (C_1 + C_2)U_2)\omega)},$$

де

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

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

$$B_3 = R_3R_4(C_1(C_2 + C_3 + C_4 + C_6)U_1 + (C_3(C_4 + C_5) + C_5C_6 + C_4(C_5 + C_6))U_1 + C_2(C_3 + C_5 + C_6)(U_1 - U_2) -$$

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

$$B_5 = (((C_1 + C_2 + C_4 + C_5)R_3 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6 + (C_3 + C_6)g1R_3)R_4)U_1 -$$

$$-((C_1 + C_2)R_3 + (C_2 + (C_1 + C_5)gR_3)R_4)U_2)\omega,\ B_6 = C_1 + C_2 + C_4 + C_5,\ B_7 = (R_2 + R_4)U_1 -$$

$$-(R_2 + R_4 + gR_2R_4)U_2,\ B_8 = (B_6R_1 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6 + (C_3 + C_6)g1R_1)R_2)R_3.$$

Виконано розкладення повного опору ЄАЕ на ПТСВО на дійсний та уявний складники використовуючи спеціалізований математичний пакет Mathematica. Отримані рівняння є громіздкими, їхнє розв'язання можливе за допомогою сучасної обчислювальної техніки з використанням спеціалізованим математичних пакетів програм. Детальний їхній розгляд та розв'язання наведено в монографії [5].

Електричну схему ЄАЕ на ПТСВО в середовищі MicroCAP наведено на рис. 1 в. Проведено його імітаційне моделювання за допомогою програми комп'ютерного моделювання електричних схем MicroCAP. Вольт-амперну характеристику ЄАЕ на ПТСВО щодо напруги живлення джерела V1 при різних напругах керування (2...9 В) представлено на рис. 2. При збільшені напруги керування спостерігається збільшення протяжності спадної ділянки отриманої залежності, на якій виникає від'ємний диференційний опір польової транзисторної структури. При напрузі керування 3 В від'ємний опір спостерігається в діапазоні напруг 0,5 – 1,5 В. При напрузі керування 6 В від'ємний опір спостерігається в діапазоні напруг 2 – 4,5 В. Маючи наочне представлення ВАХ, зручно обрати необхідний

діапазон напруг керування та живлення з метою утримання робочої точки на ділянці наявності еквівалента ємності (на спадній ділянці ВАХ).

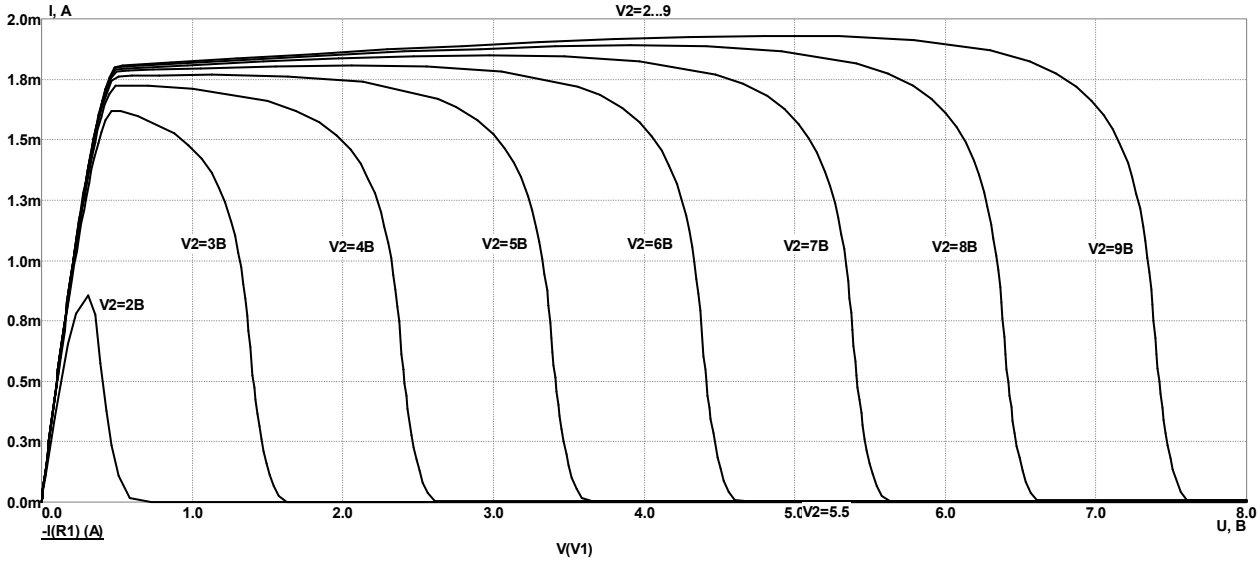


Рис. 2. Сімейство вольт-амперних характеристик ЄАЕ на ПТСВО при різних напругах керування 2 – 8 В

Частотну залежність дійсних та уявних складників повного опору ЄАЕ на ПТСВО при різних напругах керування (4,75; 5; 5,25; 5,5 В) представлено на рис. 3. Напругою керування забезпечується можливість зміни абсолютних значень дійсного та уявного складників, а також частотне розташування якісних (характерних) точок цих залежностей (рис. 3). Зокрема, для дійсного складника повного опору ЄАЕ на ПТСВО значення від'ємного опору змінюються від 1 кОм до 6 кОм, що спостерігається в частотному діапазоні від 38 МГц до 100 МГц відповідно для напруг 4,75 В та 5,5 В. А уявний складник повного опору ЄАЕ на ПТСВО з ємнісним характером має форму перегорнутого дзвону, екстремум якого зі зростанням напруги керування збільшує своє абсолютне значення, при цьому зміщуючись у низькочастотну область (832 кГц…8,3 МГц).

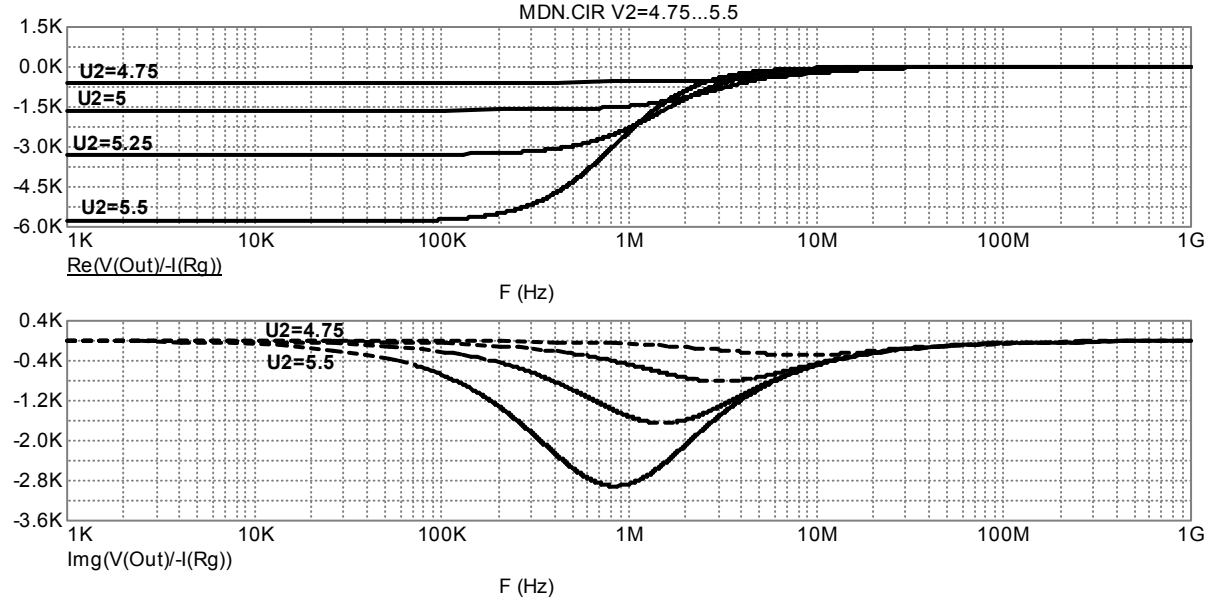


Рис. 3. Частотна залежність активного та реактивного складників повного опору ЄАЕ на ПТСВО при різних напругах керування

Частотну залежність еквівалентної ємності досліджуваного ЄАЕ на ПТСВО при напрузі керування 4,5 В наведено на рис. 4. На отриманій залежності характерними є дві ділянки.

Перша – значної зміни еквівалентної ємності від 1090 пФ до 43 пФ ЄАЕ на ПТСВО. На другій – еквівалентна ємність, майже не змінювана в широкому частотному діапазоні від 500 кГц до 1 ГГц, варіюється в межах від 43 пФ до 32 пФ.

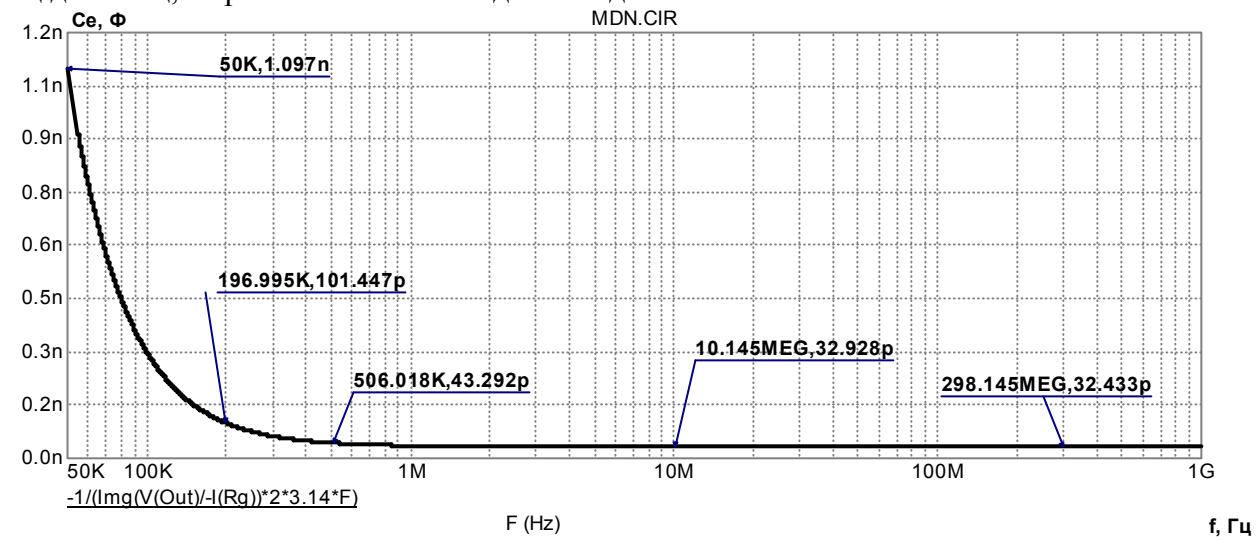


Рис. 4. Частотна залежність еквівалентної ємності ЄАЕ на ПТСВО

Графік залежності зміни еквівалентної ємності ЄАЕ на ПТСВО від напруги керування (0...4 В) при різних напругах живлення (3…5 В) представлено на рис. 5 (вольт-фарадна характеристика). Максимальний коефіцієнт перекриття ємності складає 139 (10,506 нФ / 75,504 пФ) одиниць при напрузі живлення 3,31 В (напруга керування 5 В, експериментальна частота 500 кГц).

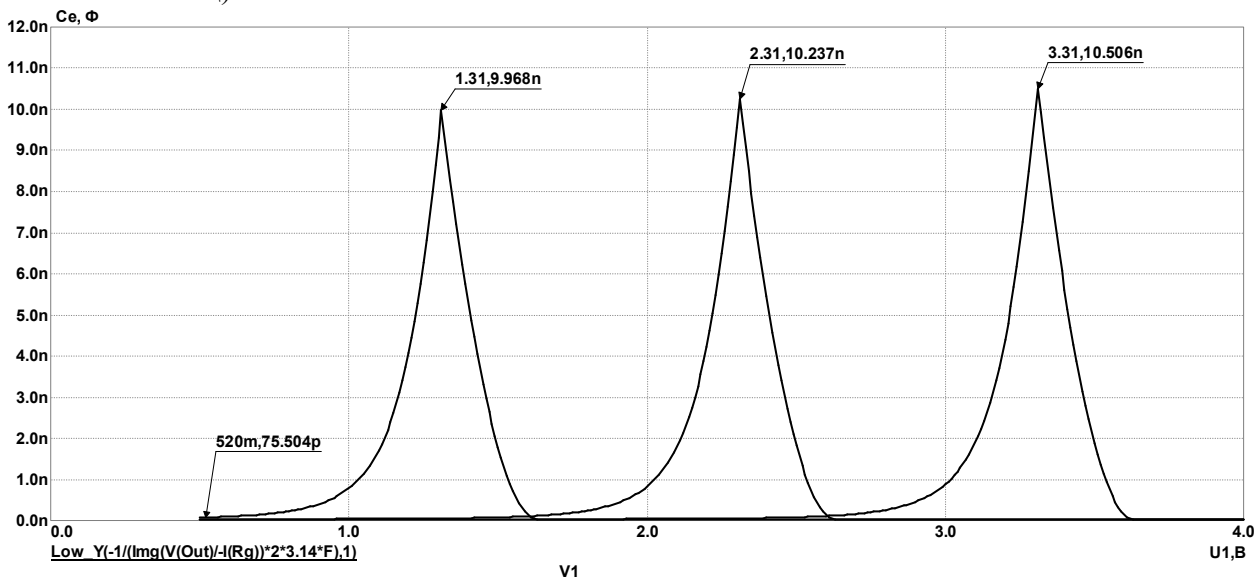


Рис. 5. Залежність значення еквівалентної ємності ЄАЕ на ПТСВО від напруги керування (напруги живлення 3…5 В)

Уплив дестабілізуючого чинника (зміни температури навколишнього середовища) на частотну характеристику еквівалентної ємності ЄАЕ на ПТСВО представлено на рис. 6. При збільшенні температури навколишнього середовища абсолютне значення еквівалентної ємності ЄАЕ на ПТСВО зменшується. Температурний коефіцієнт ємності розробленого ЄАЕ на ПТСВО у межах $2 – 3*10^{-4}$ ($1/^{o}C$), як і сучасних варікапів.

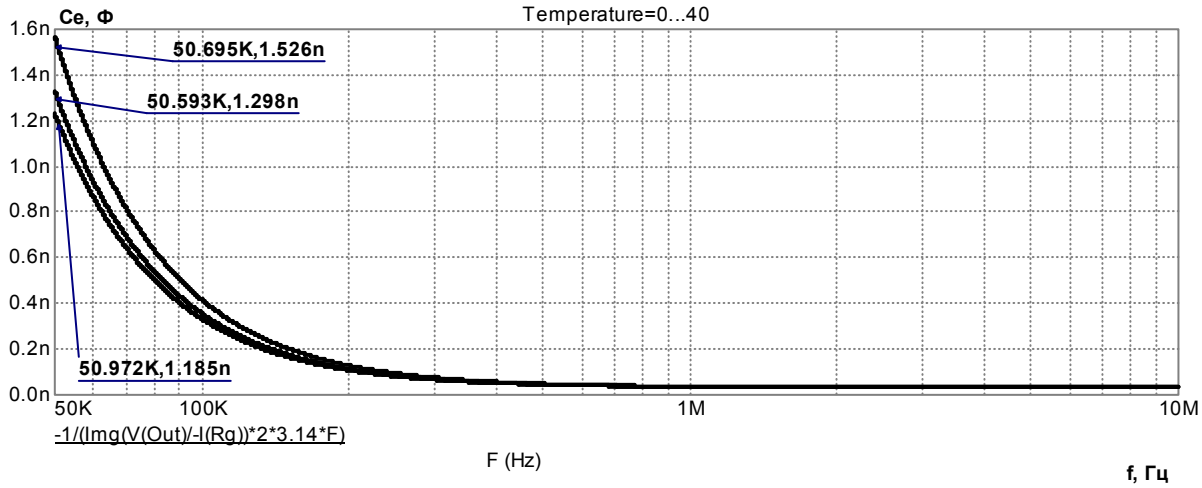


Рис. 6. Частотна залежність еквівалентної ємності ЄАЕ на ПТСВО при зміні температури навколишнього середовища

Узагальнені результати імітаційного моделювання ЄАЕ на ПТСВО наведено в таблиці.

Таблиця

Результати імітаційного моделювання ЄАЕ на ПТСВО

Параметр	Величина від'ємного опору (кОм)	Діапазон зміни еквівалентної ємності (нФ)	Частотний діапазон (МГц)	Діапазон робочих напруг (В)	Коефіцієнт перелаштування (одиниць)
Значення	1 – 6	0,075 – 10,5	0,001 – 31	0,5 – 8	139

Використовуючи ємнісний ефект ЄАЕ на ПТСВО, розроблено та досліджено одноланковий і дволанковий електричні фільтри. Проведено моделювання їхніх основних характеристик і параметрів (частот зрізу, смуг пропускання, крутостей згасання поза смугами пропускання) залежності від упливу напруг керування та живлення. ЄАЕ на ПТСВО в розробленому ФНЧ (рис. 7) утворюється транзисторною структурою VT1, VT2 (2N6804 та 2N6661), повний опір якого утворюється сумою дійсного та уявного складників, які мають від'ємний опір та ємнісний характер відповідно. Значення складників повного опору можна змінювати напругами керування та живлення, що впливає на робочі параметри та характеристики цього ФНЧ на ПТСВО загалом.

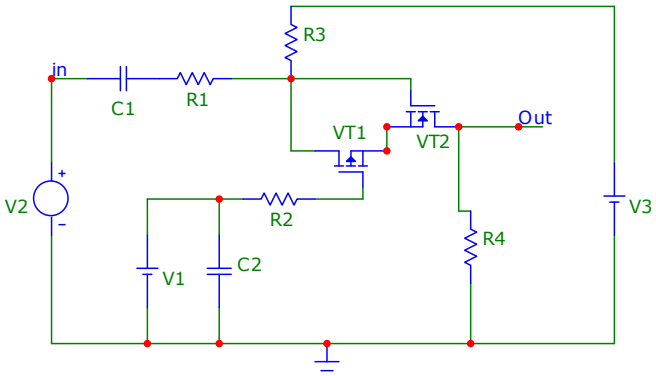


Рис. 7. Електрична схема одноланкового ФНЧ на ПТСВО

Отримані результати моделювання АЧХ та ФЧХ (рис. 8) розробленого ФНЧ при різних напругах керування (2…5 В) засвідчують можливість керування частотою зрізу (при збільшені напруги керування зростає частота зрізу) у діапазоні від 0,5…5 МГц, при максимальному згасанні поза смугою пропускання складає до 20 дБ/октава.

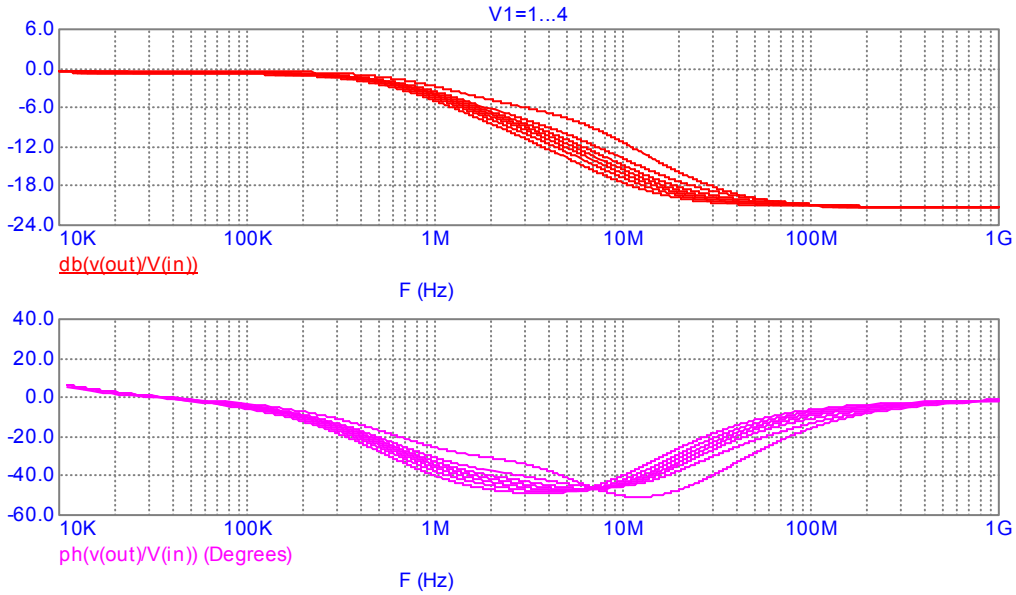


Рис. 8. АЧХ та ФЧХ одноланкового ФНЧ на ПТСВО при різних напругах керування (1 – 4 В)

З метою покращення робочих характеристик досліджуваного ФНЧ на ПТСВО доцільно збільшити кількість активних ланок і провести аналіз робочих параметрів дволанкового ФНЧ на ПТСВО, електрична схема якого міститиме дві, представлені на рис. 7, фільтрувальні ланки. Результати моделювання АЧХ та ФЧХ дволанкового ФНЧ на ПТСВО представлено на рис. 9.

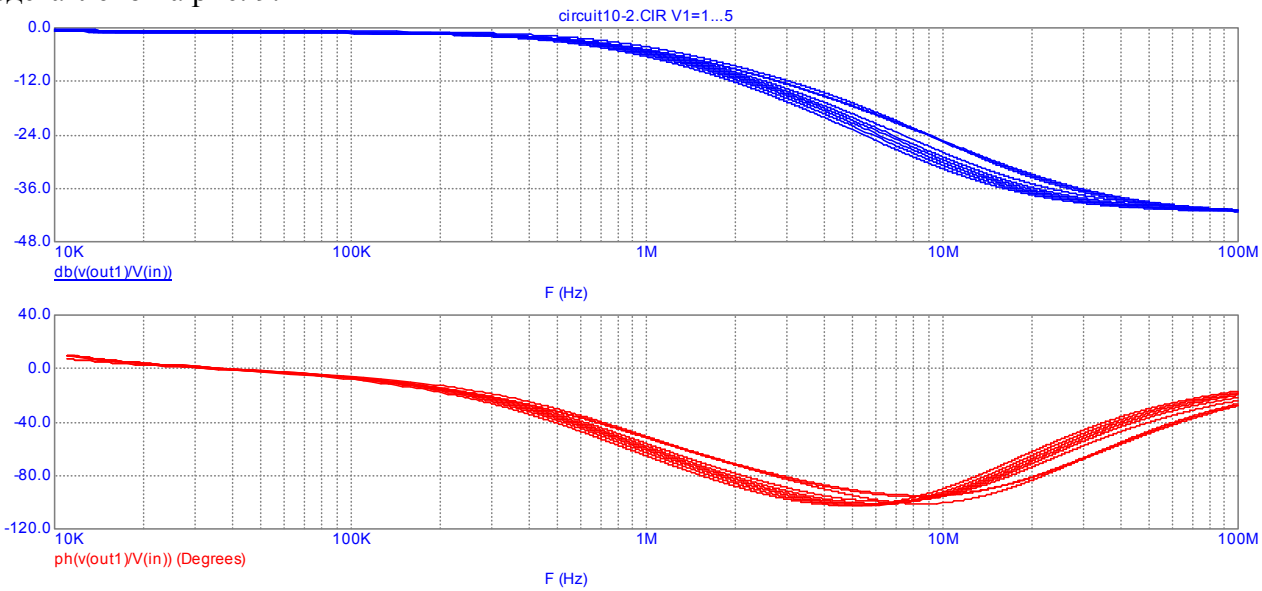


Рис. 9. АЧХ та ФЧХ дволанкового ФНЧ на ПТСВО при різних напругах керування (1 – 5 В)

Отримана АЧХ підтверджує можливість керування частотою зрізу (при збільшенні напруги керування зростає значення частоти зрізу) у діапазоні від 700 кГц до 2 МГц при зміні напруги керування від 1 – 5 В, із збільшенням удвічі ослаблення поза смугою пропускання (максимальне 40 дБ).

Висновки

Досліджено ємнісний активний елемент на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором, у якому можливо електрично керувати величиною його еквівалентної ємності з коефіцієнтом переладнання до 139 одиниць при напрузі керування 3,31 В (напруга живлення 5 В та експериментальна частота 500 кГц). При цьому від'ємна частина повного опору ЄАЕ

на ПТСВО змінюється в діапазоні 1 – 6 кОм, абсолютна зміна його еквівалентної ємності відповідає 0,075 – 10,5 нФ, а частотний робочий діапазон – у межах 0,001 – 31 МГц. Дослідження одноланкового і дволанкового ФНЧ з використанням ЄАЕ на ПТСВО підтвердили електричну керованість смугою пропускання (частотою зрізу), можливість керування частотою зрізу в діапазоні від 0,5…5 МГц (200 кГц … 2 МГц), а також те, що при максимальному згасанні поза смугою пропускання складає до 20 дБ/октава (40 дБ/октава) для одноланкового та дволанкового ФНЧ з ЄАЕ на ПТСВО. Використання розробленого ЄАЕ на ПТСВО дозволити спростити класичні схеми радіовимірювальних приладів і радіотехнічних пристроїв, покращуючи при цьому їх електричну керованість та забезпечуючи можливість 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. 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 Олександр Володимирович – д. т. н., професор, завідувач кафедри радіотехніки, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

Семенов Андрій Олександрович – к. т. н., доцент кафедри радіотехніки, e-mail: semenov79@ukr.net.

Лазарєв Олександр Олександрович – к. т. н., доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, e-mail: laalex@mail.ru.

Коваль Костянтин Олегович – к. т. н., старший викладач кафедри радіотехніки, e-mail: vsort11@gmail.com.

Вінницького національного технічного університету.