

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Коваль Костянтин Олегович

УДК 621.372.01; 621.396.6

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ ЄМНІСНОГО ЕФЕКТУ
В ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУРАХ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Спеціальність 05.11.08 – Радіовимірювальні прилади

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2010

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Осадчук Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки
Філінюк Микола Антонович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри проектування комп'ютерної та
телекомунікаційної апаратури

доктор технічних наук, доцент
Бондарєв Андрій Петрович,
Національний університет "Львівська політехніка",
професор кафедри теоретичної радіотехніки та
радіовимірювань

Захист відбудеться " 15 " жовтня 2010 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГУК.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий " 14 " вересня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. В. Павлов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку радіовимірювальної техніки суттєвим чином залежить від новітніх досягнень в області розробки методів та засобів радіовимірювань та визначається використанням вдосконалених або принципово нових приладів. Тому актуальним науковим завданням є розробка нових підходів до побудови радіовимірювальних приладів, дія яких базується на процесах генерування, перетворення й обробки коливань.

Функціональними вузлами сучасних радіовимірювальних приладів є електричні фільтри, фазообертачі, помножувачі частоти та імпульсні генератори. Конструкторське виконання фільтрів, фазообертачів, помножувачів частоти та імпульсних генераторів можна значно спростити за рахунок використання ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором.

Питаннями, що пов'язані з вказаним науковим напрямом активно займалися наукові школи радянського та пострадянського простору. Найбільший внесок в цьому напрямку зробили відомі вчені – Андрєєв В. С., Ауєн Л. Ф., Бібірман Л. І., Гаряїнов С. А., Касімов Ф. Д., Негоденко О. П., Осадчук В. С., Осадчук О. В., Степанова Л. Н., Філінюк М. А. Особливу увагу було приділено спеціальним пристроям, що призначені для компенсації не лише активних, але й реактивних, і навіть комплексних опорів. Здатність розраховувати та досліджувати такі схеми дозволяє проектувати функціональні вузли радіовимірювальної апаратури з потрібними характеристиками. Серед досягнень закордонних науковців варті уваги розробки Бенинга Ф., Dutta Roy, Saito T., Adams D. K., Но R. Y., Josephs H. C., Lindmauer I., Fujimura I. та інших.

Україна займає одну з провідних позицій у розробці фільтрів, фазообертачів, помножувачів частоти та імпульсних генераторів на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Сучасні наукові досягнення в напрямку розробки пристроїв та систем з використанням ефекту від'ємного опору напівпровідникових приладів та їх ємнісного ефекту були отримані і у наукових школах Вінницького національного технічного університету. Дослідження реактивних властивостей транзисторів і транзисторних схем з від'ємним опором були проведені професором Осадчуком В. С., розробка теорії мікроелектронних частотних перетворювачів фізичних величин на основі транзисторних структур з від'ємним опором та їх метрологічних характеристик була виконана професором Осадчуком О. В., теорія приладів з негatronами та оцінка метрологічних характеристик й ефективності пристроїв автоматики на їх основі були розроблені професором Філінюком М. А., розробка теорії створення та дослідження частотно-імпульсних і радіо-імпульсних логічних і операційних елементів цифрової техніки була виконана професором Кичаком В. М.

Використання ємнісного ефекту транзисторних структур з від'ємним опором дозволяє істотно спростити конструктивне виконання електрично керованих еквівалентних ємностей. При цьому, на базі конкретного схемотехнічного рішення, залежно від поставленого завдання, можна реалізувати електрично керовані еквівалентні ємності на біполярній, біполярній статично індукованій, польовій, та біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним опором. При застосуванні досліджених електрично керованих ємностей, стає можливою розробка радіовимірювальних приладів: помножувачів частоти, генераторів спеціальної форми, електричних фільтрів та фазообертачів. Тому використання ємнісного ефекту транзисторних структур з від'ємним опором є одним зі шляхів удосконалення функціональних можливостей наявних радіовимірювальних приладів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалася на кафедрі радіотехніки Вінницького національного технічного університету відповідно до плану наукових досліджень Вінницького національного технічного університету й Міністерства освіти і науки України, та у рамках фундаментальної держбюджетної науково-дослідної роботи 32-Д-274 “Математичне моделювання генераторів електричних коливань з широкосмуговою перебудовою частоти генерації на основі транзисторних структур з від'ємним опором” (№ДР 0102U002420), в якій автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розширення функціональних можливостей радіовимірювальних приладів на основі ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

1. Розробити квазілінійні моделі активних елементів радіовимірювальних приладів на основі ємнісного ефекту в біполярній, польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах і за їх допомогою отримати рівняння повного комплексного опору цих елементів.

2. На основі квазілінійного методу отримати аналітичні залежності першої, другої та третьої гармонік вихідного струму активних елементів помножувачів частоти на біполярній, польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах у режимах подвоєння та потроєння частоти.

3. Розробити нелінійні математичні моделі генераторів прямокутних імпульсів і лінійно змінної напруги на польовій та біполярній транзисторних структурах, використовуючи апроксимацію статичних ВАХ степеневим поліномом та функцією гіперболічного тангенсу.

4. Удосконалити базові схемотехнічні рішення електричних фільтрів і фазообертачів НВЧ діапазону радіовимірювальних приладів, використовуючи ємнісний ефект біполярних, польових і біполярно-польових транзисторних структур з від'ємним опором.

Об'єктом дослідження є процес перетворення сигналів у радіовимірювальних приладах на основі ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором.

Предметом дослідження є статичні і динамічні характеристики радіовимірювальних приладів на основі ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором.

Методи досліджень. Використані у дисертаційній роботі методи базуються на: теорії апроксимації для отримання аналітичних співвідношень, що описують статичні ВАХ та залежності від'ємного опору активних елементів радіовимірювальних приладів від напруг живлення та керування; основних положеннях теорії функції комплексної змінної та теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення математичної моделі опису величини еквівалентної ємності; теорії аналізу електричних схем для визначення основних параметрів радіовимірювальних приладів з еквівалентної схеми, отриманої на основі квазілінійного методу; комп'ютерного моделювання для експериментальної перевірки отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено математичні моделі радіовимірювальних приладів з електричним керуванням на основі ємнісного ефекту біполярної, польової та біполярно-польової транзисторних структур з від'ємним опором, які, на відміну від наявних, дають можливість розрахувати їхній повний опір залежно від зміни напруг живлення й керування.

2. Отримано нові аналітичні вирази для опису частотних залежностей дійсної та уявної складників повного опору, а також еквівалентної ємності біполярної, польової та біполярно-польової транзисторних структур з від'ємним опором, які забезпечують можливість оцінювання впливу дестабілюючих чинників на радіовимірювальний прилад.

3. Одержав подальший розвиток квазілінійний метод аналізу, за допомогою якого отримано нові аналітичні співвідношення для умови стійкої роботи та коефіцієнта передачі по напрузі для другої та третьої гармонік вихідного сигналу активних елементів помножувачів частоти на польовій, біполярній та біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним опором, які, на відміну від наявних, враховують їх режими живлення та керування.

4. Удосконалено нелінійні математичні моделі генераторів прямокутних імпульсів і лінійно змінної напруги на польовій та біполярній транзисторних структурах, що використовують апроксимацію статичних ВАХ степеневим поліномом та функцією гіперболічного тангенсу, які, на відміну від наявних, враховують вплив режимів живлення генераторів на форму генерованих коливань.

Практичне значення одержаних результатів

Розвинуті у роботі теоретичні положення та отримані математичні моделі утворюють теоретичну базу для розширення функціональних можливостей радіовимірювальних приладів на основі ємнісних ефектів транзисторних структурах з від'ємним опором на етапі проектування.

1. Розроблено та досліджено нові схемотехнічні рішення побудови електрично керованих еквівалентів ємностей на біполярній, біполярній статично індукованій, польовій, біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним опором, коефіцієнти перекриття яких змінюється

у 9...40 разів при зміні напруги живлення 0,5...9 В і напруги керування 2...10 В.

2. Розроблено і досліджено нові схемні рішення електрично керованих помножувачів частоти для двократного та трьохкратного помноження вхідної частоти, які виготовлено за гібридною технологією.

3. Запропоновано базове схемотехнічне рішення генератора лінійно змінної напруги на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором з електричним перелаштуванням параметрів генерованих імпульсів. Отримано співвідношення для розрахунку часу прямого ходу імпульсів лінійно змінної напруги. При зміні напруги живлення в межах 5...30 В струм споживання змінюється в межах 2,7...18,1 мА, амплітуда генерованих імпульсів змінюється в межах 1,2...10 В при зміні періоду повторення імпульсів 0,42...1,67 мкс.

4. Вперше розроблено і досліджено НВЧ генератор на НЕМТ-транзисторній структурі з оптичною й електричною зміною частоти генерації в діапазоні частот 1,825...2,055 ГГц, максимальною чутливістю 3,55 МГц/(мкВт/см²). На основі нелінійної еквівалентної схеми оптично керованого НВЧ генератора на НЕМТ-транзисторній структурі теоретично розраховано й експериментально перевірено функцію перетворення й рівняння чутливості. Експериментальні дослідження показали, що відносне оптичне перелаштування частоти генерації складає 9,88 %.

5. Розроблено й досліджено нові схемні рішення на основі електрично керованих еквівалентів ємностей електричних одноланкових та двохланкових фільтрів низьких і високих частот, а також електрично керованих фазообертачів, зміна фази яких становить 0 – 160°, 0 – 300°.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення й результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У наукових працях, які написані в співавторстві, здобувачем: розроблено математичну модель генератора прямокутних імпульсів на польовій транзисторній структурі [1] та його схемотехнічну реалізацію [22]; отримано співвідношення для визначення основних енергетичних параметрів і характеристик [2] та результати експериментальних досліджень [11] електрично керованого еквіваленту ємності на біполярно-польовій транзисторній структурі з від'ємним опором; отримано аналітичні співвідношення ємнісного складника повного опору [4] та запропоновано схемотехнічне рішення оптично керованого генератора електричних коливань на основі НЕМТ-транзисторної структури з від'ємним опором [19]; отримано аналітичні співвідношення другої і третьої гармонік струму активного елементу помножувача частоти у режимах подвоєння і потроєння частоти на польовій [5], біполярній [8] та на біполярно-польовій [6] транзисторних структурах з від'ємним опором; запропоновано нелінійну апроксимацію статичної ВАХ біполярної транзисторної структури [7] та її схемотехнічні реалізації – базову [21] і з розширеними функціональними параметрами [24]; визначено повний опір [10] та отримано математичну модель [12] електрично керованої еквівалентної ємності на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором; отримано експериментальні залежності частоти генерації від величини освітлення генераторного перетворювача та чутливості частоти генерації від зміни величини освітлення оптичного генераторного перетворювача на основі аналогу інжекційно-польового транзистора [14]; запропоновано апроксимацію статичної ВАХ НВЧ генератора [15]; розроблено схемні рішення активних фільтрів високих та низьких частот на біполярно-польовій [9, 17] та польовій [13, 18] транзисторних структурах з від'ємним опором; запропоновано схемотехнічне рішення оптичного вимірювача концентрації газу з використанням біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором [20]; запропоновано схемотехнічні рішення електрично керованих мікроелектронних помножувачів частоти, використовуючи ємнісний ефект в біполярній [23] та біполярно-польовій [25] транзисторних структурах, і фазообертачів діапазону НВЧ на польовій [26] та біполярно-польовій [27] транзисторних структурах з від'ємним опором.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й наукові результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на I, III і V Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування” СПРТП-2005, СПРТП-2007, СПРТП-2009 (Вінниця, 2005, 2007, 2009); XIV Міжнародній науково-технічній конференції “Автоматика-2007” (Севастополь, 2007); IX Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії TCSET'2008” (Львів-Славсько 2008); IV Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції студентів, ас-

пірантів та молодих вчених “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” РТ-2008 (Севастополь, 2008); XII Міжнародний молодіжний форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харків 2008); IV Міжнародній науково-технічній конференції “Датчики прилади та системи ДПС-2008” (Черкаси, 2008); наукових семінарах кафедри радіотехніки ВНТУ.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 27 наукових праць, з яких 7 статей у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України, 10 патентів України на корисну модель й 1 патент України на винахід, 9 публікацій у збірниках наукових праць міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів, основних висновків по роботі, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації 195 сторінок, з яких основний зміст викладено на 148 сторінках друкованого тексту, містить 103 рисунки та 3 таблиці. Список використаних джерел складається з 160 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми досліджень, сформульовано мету і завдання досліджень, відображено основні наукові результати і практичне значення отриманих результатів.

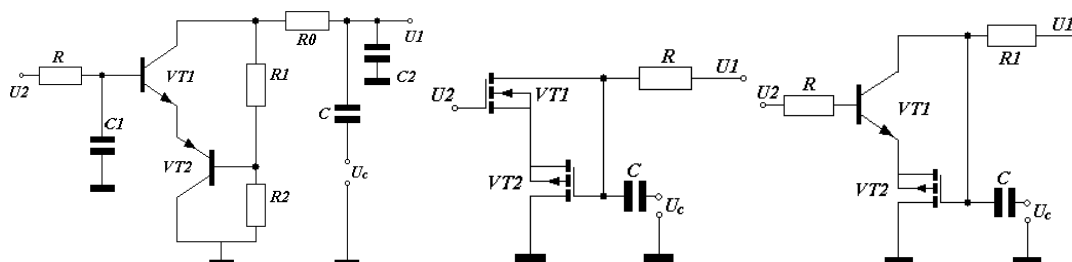
У першому розділі проведено аналіз класифікацій радіовимірювальних приладів та вимог до них з позиції сучасних напрямів розвитку радіоелектроніки. Проаналізовано структурні схеми радіовимірювальних приладів, розглянуто сучасний стан технічної реалізації електрично керованих еквівалентів ємностей для радіовимірювальних приладів, зокрема помножувачів частоти, релаксаційних генераторів, електричних фільтрів та фазообертачів на транзисторних структурах з від’ємним опором.

Показано, що за останні десятиріччя спостерігається інтенсивний розвиток радіовимірювальної техніки з від’ємним опором та їх схемотехнічних аналогів в усіх діапазонах радіотехнічних частот – низьких, середніх, високих і надвисоких. Перспективним напрямком побудови помножувачів частоти, електричних релаксаційних генераторів, електричних фільтрів, фазообертачів та радіовимірювальних приладів на їхній основі є використання транзисторних структур зі статичними вольт-амперними характеристиками N- і λ - типів. Перелаштування робочих параметрів – коефіцієнта помноження частоти, частоти генерації, частоти зрізу, куту фазового зсуву – здійснюється шляхом зміни величин активної й реактивної складників повного опору транзисторних структур (їх від’ємного опору та ємнісної складової). На підставі проведеного аналізу сучасного стану проблеми визначено основні напрямки досліджень.

У другому розділі розроблено та досліджено електрично керовані еквіваленти ємностей на біполярній, польовій, біполярно-польовій транзисторних структурах з від’ємним опором для використання їх у радіовимірювальних приладах.

Актуальним науковим завданням є аналіз ємнісних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором залежно від зміни напруг живлення та керування.

Повні опори електрично керованих еквівалентів ємностей на біполярній, біполярній статично-індукованій, польовій, біполярно-польовій транзисторних структурах з від’ємним опором, електричні схеми яких подано на рис. 1, складаються з дійсної та уявної частини. Дійсні частини набувають від’ємних значень, а реактивні частини мають ємнісний характер, величини яких залежать від значень напруг живлення та керування, що дозволяє використовувати їх для побудови радіовимірювальних приладів з електричним налаштуванням.



а) б) в)
Рис. 1. Електричні схеми електрично керованих еквівалентів ємностей на біполярній (а), польовій (б), біполярно-польовій (в) транзисторних структурах з від'ємним опором

За допомогою еквівалентних схем (рис. 2), отримано аналітичні вирази повного опору, його дійсної та уявної частин розроблених електрично керованих еквівалентів ємностей на основі ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором.

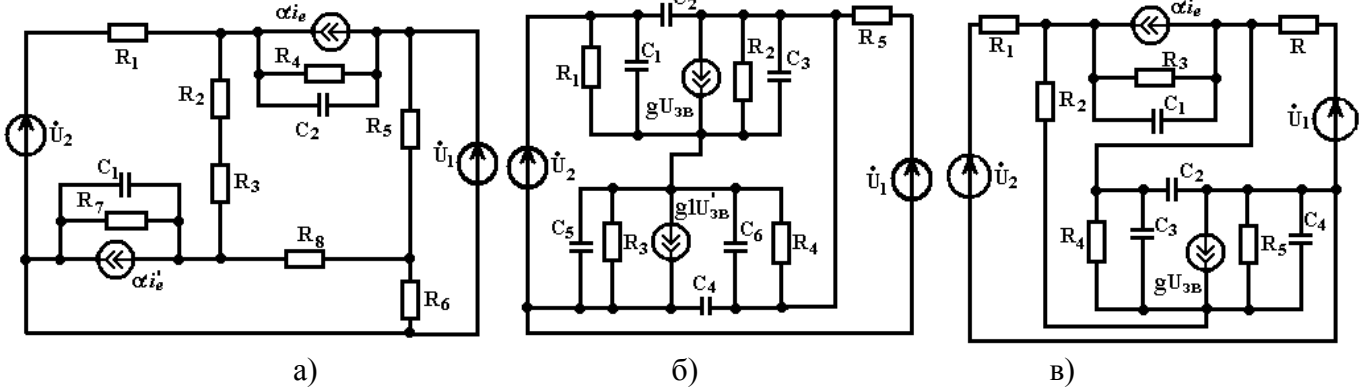


Рис. 2. Еквівалентні схеми електрично керованих еквівалентів ємностей на а) біполярній, б) польовій і в) біполярно-польовій транзисторних структурах

Повний опір для досліджуваної схеми біполярної транзисторної структури з від'ємним опором (рис. 2, а)

$$Z_1 = \frac{U_1(A_6 R_1 + jR_4(A_2 R_2 + A_2 R_3 + (1 + a_1)A_1 R_7) - A_1 C_2(R_2 + R_3)R_4 R_7 \omega)}{A_5 + j(AR_2 + AR_3 + (-1 - a_1)A_1 R_7(U_1 - U_2) + jR_4(-jA_7 - A_1 R_7((1 + a_1)C_1(U_1 - U_2) - aC_2 U_2)\omega))}, \quad (1)$$

де
 $A = (U_1 - U_2)(-R_6(R_7 + R_8) - R_5(R_6 + R_7 + R_8) - jA_1 C_2 R_7 \omega) + R_4((-R_6 - R_7 - R_8)U_1 - j(C_2 R_7(R_6 + R_8)U_1 + A_2 C_1(U_1 - U_2))\omega + A_1 C_1 C_2 R_7(U_1 - U_2)\omega^2)$,
 $A_1 = R_6 R_8 + R_5(R_6 + R_8)$,
 $A_2 = R_6(R_7 + R_8) + R_5(R_6 + R_7 + R_8)$,
 $A_3 = R_2 + R_3 + R_4 + aR_4 + R_5$,
 $A_4 = R_2 + R_3 + R_5$,
 $A_5 = R_1 U_1(-j(A_3(R_6 + R_7) + (A_3 + R_6 + R_7 + a_1 R_7)R_8) + (C_2 R_7(A_3 R_6 + (A_3 + R_6)R_8) + C_1 R_4(A_4(R_6 + R_7) + (A_4 + R_6 + R_7 + a_1 R_7)R_8))\omega + jC_1 C_2 R_4 R_7(A_4 R_6 + (A_4 + R_6)R_8)\omega^2)$,
 $A_6 = (j((1 + a)A_2 R_4 + (1 + a_1)A_1 R_7) - A_1(C_1 + a_1 C_1 + C_2 + aC_2)R_4 R_7 \omega - jR_2(-j + C_1 R_4 \omega)(-jA_2 + A_1 C_2 R_7 \omega))$,
 $A_7 = (-1 - a_1)R_7 R_8 U_1 + aR_5(R_7 + R_8)U_2 + R_6((-1 - a - a_1)R_7(U_1 - U_2) + a(R_5 + R_8)U_2)$.

Повний опір для досліджуваної схеми польової транзисторної структури з від'ємним опором (рис. 2, б)

$$Z_2 = \frac{-U_1(-jB_1 + jB_2 + ((C_1 + C_3 + C_5 + C_6)R_1 R_2 R_3 R_4 + (B_6 R_1 R_2 R_3 + (B_8 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6)R_1 R_2)R_4)R_5)\omega)}{B_4 - jB_7 R_3 + R_1(-j(1 + g_1 R_3)R_4 U_1 + R_2(jB_3 + B_5 - j(U_1 + g_1 R_3 U_1 - gR_4 U_2)) + R_3 R_4(B_6 U_1 - (C_1 + C_2)U_2)\omega)}, \quad (2)$$

де
 $B_1 = R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 + R_2 R_3 R_4 + (R_1 + R_3 + gR_1 R_3)(R_2 + R_4)R_5$,
 $B_2 = (C_3(C_4 + C_5) + C_5 C_6 + C_1(C_2 + C_3 + C_4 + C_6) + C_4(C_5 + C_6) + C_2(C_3 + C_5 + C_6))R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 \omega^2$,
 $B_3 = R_3 R_4(C_1(C_2 + C_3 + C_4 + C_6)U_1 + (C_3(C_4 + C_5) + C_5 C_6 + C_4(C_5 + C_6))U_1 + C_2(C_3 + C_5 + C_6)(U_1 - U_2) - C_1(C_2 + C_3 + C_6)U_2)\omega^2$,
 $B_4 = R_2 R_3 R_4((C_2 + C_3 + C_4 + C_6)U_1 - (C_2 + C_3 + C_6)U_2)\omega$,
 $B_5 = (((C_1 + C_2 + C_4 + C_5)R_3 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6 + (C_3 + C_6)g_1 R_3)R_4)U_1 - ((C_1 + C_2)R_3 + (C_2 + (C_1 + C_5)gR_3)R_4)U_2)\omega$,
 $B_6 = C_1 + C_2 + C_4 + C_5$,
 $B_7 = (R_2 + R_4)U_1 - (R_2 + R_4 + gR_2 R_4)U_2$,
 $B_8 = (B_6 R_1 + (C_2 + C_3 + C_4 + C_6 + (C_3 + C_6)g_1 R_1)R_2)R_3$.

Повний опір для досліджуваної схеми біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором (рис. 2, в)

$$Z_3 = \frac{U_1 j(D_7 - jR_3(R_4 R_5 + R_2(R_4 + R_5)) + R_1(D_6 - j(R_4 R_5 + (1 + a)R_3(R_4 + R_5)) + R_2(-j + C_1 R_3 \omega)(R_4 + R_5 + jC_3 R_4 R_5 \omega))}{R_2(D_3 R_3 + D_8) + D_5 R_1 U_1 + R_4 R_5(U_2 - U_1) + R_3(-jD_2 + aR_4 U_2 + (1 + a)R_5((-1 + gR_4)U_1 + U_2))}, \quad (3)$$

де

$$D_1 = R_2(-j + C_1 R_3 \omega)(-j + jgR_4 + C_3 R_4 \omega + C_2 \omega(R_4 + R_5 + jC_3 R_4 R_5 \omega)), D_2 = R_4 R_5((C_1 + C_2 + C_3 + aC_3)U_1 - (C_1 + C_3 + aC_3)U_2)\omega, D_3 = ((-1 + gR_4)U_1 - j((C_3 R_4 + C_2(R_4 + R_5))U_1 + C_1(R_4 + R_5)(U_1 - U_2))\omega + C_3 R_4 R_5((C_1 + C_2)U_1 - C_1 U_2)\omega^2), D_4 = ((C_1 + (1+a)(C_2 + C_3))R_3 R_4 + C_2(R_3 + aR_3 + R_4)R_5)\omega, D_5 = (D_1 - jD_4 - R_4 + (1+a)R_3(-1 + gR_4) + C_2(C_1 + C_3 + aC_3)R_3 R_4 R_5 \omega^2), D_6 = (C_1 + C_3 + aC_3)R_3 R_4 R_5 \omega, D_7 = C_3 R_2 R_3 R_4 R_5 \omega, D_8 = (U_1 - U_2)(-R_5 + R_4(-1 - jC_3 R_5 \omega)).$$

На основі отриманих аналітичних залежностей транзисторних структур з від'ємним опором, доведено можливість зміни величини їх еквівалентної ємності від 190 пФ до 1780 пФ (коефіцієнт перелаштування 9,4) для біполярної в робочому діапазоні частот 1 кГц...3 МГц; від 120 пФ до 1990 пФ (коефіцієнт перелаштування 16,6) для біполярної статично індукованої в робочому діапазоні частот 10 кГц...10 МГц; від 135 пФ до 2420 пФ (коефіцієнт перелаштування 17,9) для польової в робочому діапазоні частот 50 кГц...30 МГц; від 48 пФ до 1900 пФ (коефіцієнт перелаштування 39,6) для біполярно-польової в робочому діапазоні частот 10 кГц...300 МГц.

Проведено імітаційне моделювання електрично керованих еквівалентів ємностей на біполярній, польовій, біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним опором для яких отримано: вольт-амперні характеристики, частотні залежності дійсного та уявного складників повного опору, залежності зміни величин еквівалентних ємностей від напруги живлення при різних напругах керування, досліджено вплив дестабілізуючих чинників на попередньо отримані залежності. Результати теоретичних й експериментальних досліджень систематизовано в таблицях 1, 2.

Таблиця 1

Коефіцієнти перекриття за ємністю (k_{\max}) досліджуваних транзисторних структур з від'ємним опором

Транзисторна структура	Біполярна	Біполярна статично індукована	Польова	Біполярно-польова
k_{\max}	9,4	16,6	17,9	40
$U_1, В$	0,5...9	2,3...6	0...6	0...8
$U_2, В$	3...5	5...10	4,5...5,5	2...3

Таблиця 2

Порівняльна таблиця параметрів досліджуваних електрично керованих еквівалентів ємностей на транзисторних структурах з від'ємним опором

Тип структури	$C_0, \text{пФ/мм}^2$	$C, \text{пФ}$	$\delta, \%$	ТКЕ, $\% / ^\circ\text{C}$	$U_{\text{пр}}, В$	Q_n^* (1МГц)	K_n	$f_p, \text{Гц}$
на двох БТ	50-1000	190-1780	± 20	-0,1	35	200-500	9,4	$10^3 \cdot 3 \cdot 10^6$
на двох БСТ	500-2500	120-1990	± 20	0,015	50	500-1000	16,6	$10^4 \cdot 10^7$
на двох МДН	100-2250	135-2420	± 20	0,02	30	500-1000	17,9	$50 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^6$
на БТ-МДН	100-2000	48-1900	± 20	0,015	30	750-1250	39,6	$10^3 - 300 \cdot 10^6$

Q_n^* – навантажена добротність ($QL_n=20$).

Розроблено математичні моделі радіовимірювальних приладів з електричним керуванням на основі ємнісного ефекту в біполярній, польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним опором, які, на відміну від наявних, дозволяють розрахувати повний опір залежно від зміни напруги живлення й керування.

Третій розділ присвячений дослідженню помножувачів частоти та електричних фільтрів на основі ємнісних ефектів біполярної, польової та біполярно-польової транзисторних структур з від'ємним опором.

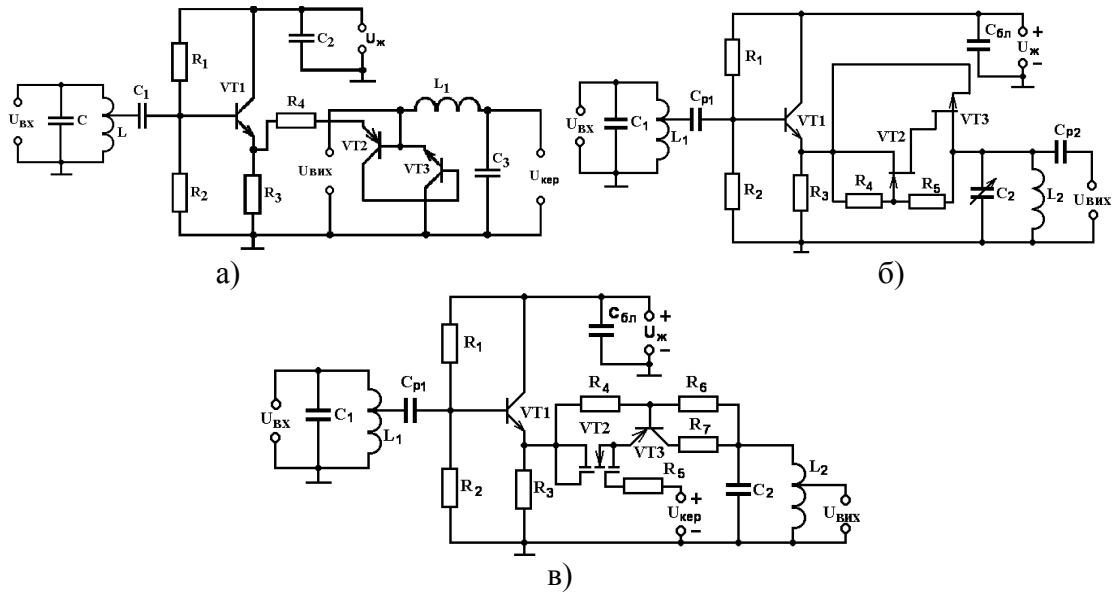


Рис. 3. Електричні схеми помножувачів частоти на біполярній (а), польовій (б) та біполярно-польовій (в) транзисторних структурах з від’ємним опором

Розроблено нові математичні моделі квазілінійних помножувачів частоти на біполярній, польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах з від’ємним опором (рис. 3) на основі узагальненої еквівалентної схеми (рис. 4), яка, на відміну від вже наявних, враховує режими роботи активних елементів помножувачів частоти залежно від зміни напруг живлення й керування.

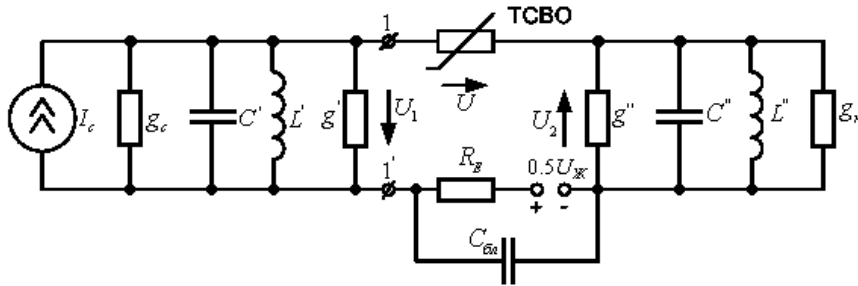


Рис. 4. Узагальнена еквівалентна схема помножувачів частоти на основі транзисторних структур з від’ємним опором

На рис. 4 прийнято такі позначення: $TCBO$ – нелінійний опір, що враховує нелінійні властивості досліджуваних транзисторних структур з від’ємним опором; I_c, g_c – параметри джерела сигналу, що створює струм з частотою ω_1 ; L', C', g' – перераховані до входу досліджуваних транзисторних структур з від’ємним опором параметри вхідного контуру, який налаштований з врахуванням вхідної провідності емітерного повторювача на частоту ω_1 ; L'', C'', g'' – елементи вихідного контуру, який налаштований на частоту $\omega_p = n\omega_1$.

Таблиця 3

Аналітичні залежності коефіцієнту передачі по напрузі та умов стійкої роботи досліджуваних помножувачів частоти

	Коефіцієнт передачі по напрузі	Умови стійкої роботи
Рис. 3, а	$\frac{3}{2} \frac{hU_s U_1}{3hU_s^2 - g + g_n + g''}$	$3hU_s^2 - g + g_n + g'' \geq 0$
	$\frac{hU_1^2}{2[3hU_1^2 + 2(3hU_s^2 - g + g'' + g_n)]}$	$g_c + g' + 3hU_s^2 - g - \frac{9}{2} \frac{h^2 U_s^2 U_1^2}{3hU_s^2 - g + g_n + g''} \geq 0$ $g_c + g' \geq 3hU_s^2 - g$
Рис. 3, б	$\frac{I_{c0} R_1 M (thM)^{-1} U_1}{8U_0^2 \left[1 + M (thM)^{-1} \frac{I_{c0} (R_1 + R_2)}{2U_0} + (g_n + g'')(R_1 + R_2) \right]}$	$\frac{1}{R_1 + R_2} + M (thM)^{-1} \frac{I_{c0}}{2U_0} + g_i + g'' \geq 0$ $g_c + M (thM)^{-1} \frac{I_{c0}}{2U_0} + g' +$

$$+ \frac{1}{R_1 + R_2} \left(1 - M (thM)^{-1} \frac{I_{c0} R_1}{4U_0^2} U_2 \right) \geq 0$$

$$g_c + g' \geq \frac{1}{R_1 + R_2} + M (thM)^{-1} \frac{I_{c0}}{2U_0}$$

	$\frac{M^3 I_{C0} (thM)^{-1} U_1^2}{12U_0^3}$ $2 \left(\frac{1}{R_1 + R_2} + M (thM)^{-1} \frac{I_{C0}}{2U_0} + g'' + g_u \right) - \frac{M^3 I_{C0} (thM)^{-1} U_1^2}{8U_0^3}$	
Рис. 3, в	$\frac{a e U_{\min} U_{m1}}{4 kT} \frac{U_{m1}}{a \frac{e U_{\min}^2}{kT} + g_s + g_u + g''}$	$g_s + a \frac{e U_{\min}^2}{kT} + g_u + g'' \geq 0;$
	$-\frac{a_3 U_{m1}^2}{2 \left[-\frac{3a e}{8 kT} \left(1 - \frac{U_{\min}^2}{3} \left(\frac{e}{kT} \right)^2 \right) U_{m1}^2 + 2 \left(g_s + \frac{a e U_{\min}^2}{kT} + g'' + g_u \right) \right]}$	$g_c + g' - g_s - a \frac{e U_{\min}^2}{kT} \geq 0;$ $g_c + g' + g_s + a \frac{e U_{\min}^2}{kT} - \frac{1}{2} \left(\frac{a e U_{\min}}{2 kT} \right)^2 \cdot \frac{U_{m1}^2}{a \frac{e U_{\min}^2}{kT} + g_s + g_u + g''} \geq 0$

Подальший розвиток квазілінійного методу аналізу для помножувачів частоти на основі ємнісного ефекту в біполярній, польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах дозволить отримати нові аналітичні співвідношення коефіцієнтів передачі напруги для другої та третьої гармонік вихідного сигналу та умов стійкої роботи (табл. 3).

Також в цьому розділі запропоновано схемотехнічні рішення електрично керованих фільтрів з можливістю електронного перелаштування частоти зрізу напругою живлення або керування, з використанням ємнісних ефектів біполярно-польової (рис. 5, а) та польової (рис. 5, б) транзисторних структурах з від'ємним опором.

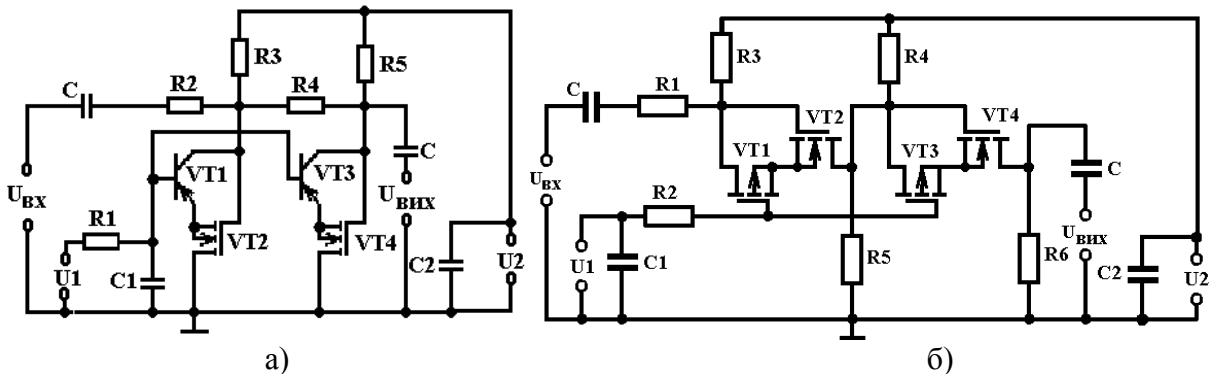


Рис. 5. Електрично керовані фільтри на біполярно-польової (а) та польовій (б) еквівалентних ємностях транзисторних структур з від'ємним опором

У четвертому розділі проведено дослідження імпульсних генераторів електричних коливань на основі ємнісного ефекту біполярної, польової та біполярно-польової транзисторних структур з від'ємним опором.

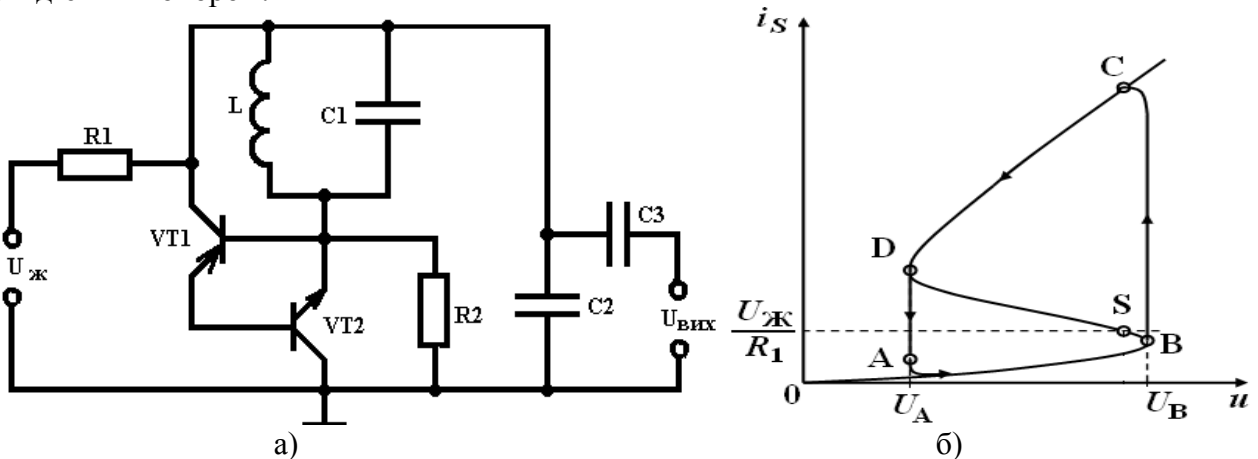


Рис. 6. Генератор лінійно змінної напруги на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором електрична схема (а) та ВАХ (б)

З метою аналізу основних параметрів генератора (рис. 6, а) у роботі використано апроксимуючу функцію

$$i_s(u) = I_B - A(U_B - u)^{1/n}, \quad (4)$$

де A – коефіцієнт апроксимації, n – степінь апроксимуючого рівняння, який вибирається в межах $n=2\dots5$.

На основі еквівалентної схеми генератора (рис. 6, а) фізичні процеси описуються рівнянням (5), тому час прямого ходу лінійно змінної напруги (рис. 6, б) визначається за формулою (6)

$$CR(i_s) \frac{di_s}{dt} + i_s = \frac{U_{жк}}{R_1}, \quad (5) \quad t = \frac{2C}{\sqrt{A}} \left[i_s - I_A - \left(I_B - \frac{U_{жк}}{R_1} \right) \ln \left| \frac{\frac{U_{жк}}{R_1} - i_s}{\frac{U_{жк}}{R_1} - I_A} \right| \right], \quad (6)$$

де $R(i_s) = du/di_s$ – диференціальний опір активного елементу генератора.

Результати експериментальних досліджень та моделювання генератора лінійно змінної напруги (рис. 7 а, б) на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором показали, що при зміні напруги живлення в межах 5...30 В струм споживання змінюється в межах 2,7...18,1 мА, амплітуда генерованих імпульсів змінюється в межах 1,2...10 В при зміні періоду повторення імпульсів 0,42...1,67 мкс.

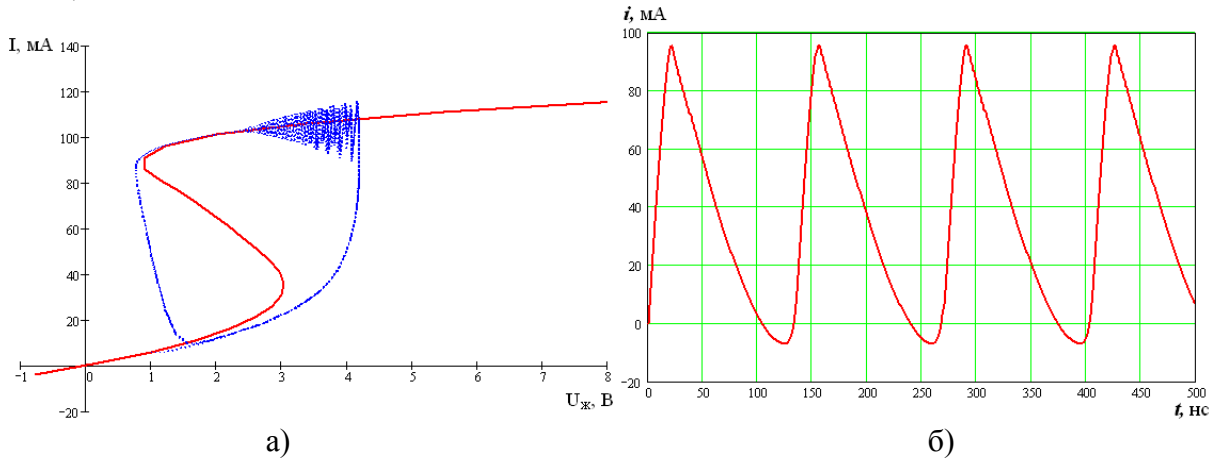


Рис. 7. Графік суміщеної ВАХ і траєкторії робочої точки (а) та осцилограма генерованих імпульсів лінійно змінного струму (б)

Розроблений генератор прямокутних імпульсів на польовій транзисторній структурі з від'ємним опором (рис. 8, а) характеризується підвищеною стабільністю частоти повторення прямокутних імпульсів. Отримано математичну модель на основі нелінійної апроксимації статичних характеристик польових транзисторів і квазілінійної моделі генератора в області швидких і повільних рухів робочої точки для розрахунку динамічних параметрів генератора.

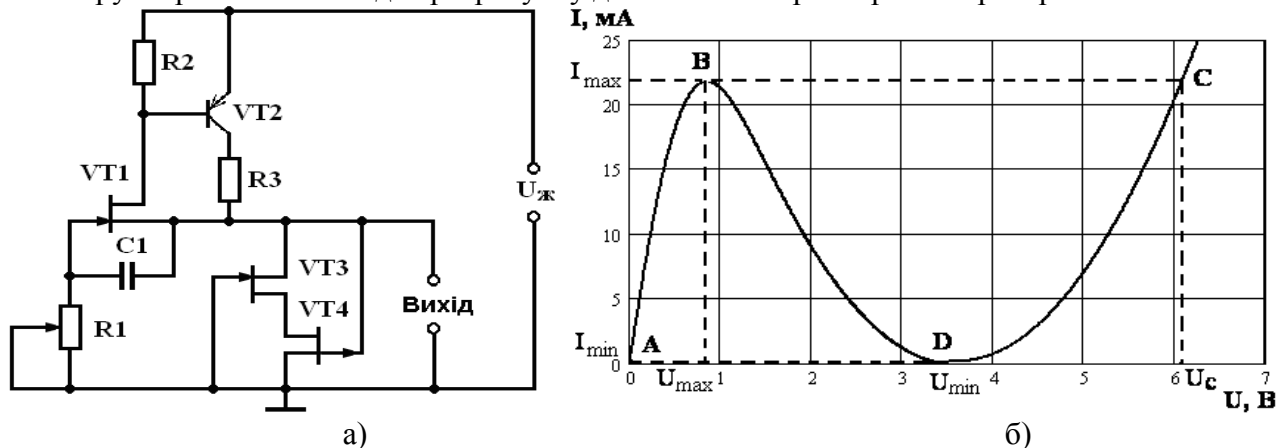


Рис. 8. Електрична схема генератора прямокутних імпульсів на польовій транзисторній структурі з

від'ємним опором (а) та статична ВАХ цієї структури (б)

Тривалість паузи та тривалість імпульсу визначаються за траєкторіями АВ і CD (рис. 8, б)

$$\tau_i = \frac{L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}}i(U_B)}{U_{\hat{A}} - U_B} - \frac{L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}}i(U_A)}{U_{\hat{A}} - U_A} - L_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}} \int_{U_A}^{U_B} \frac{i(u)}{(U_{\hat{A}} - u)^2} du, \quad (7)$$

$$\tau_i = \frac{L_{\hat{e}\hat{k}\hat{b}}i(U_C)}{U_{\hat{K}} - U_C} - \frac{L_{\hat{e}\hat{k}\hat{b}}i(U_D)}{U_{\hat{K}} - U_D} - L_{\hat{e}\hat{k}\hat{b}} \int_{U_D}^{U_C} \frac{i(u)}{(U_{\hat{K}} - u)^2} du, \quad (8)$$

де $i(u)$ – рівняння статичної ВАХ польової транзисторної структури з від'ємним опором з точністю порядку Δ^2

$$i(u) = \frac{2I_{C03}}{1 + I_{C03}/I_{C04}} \left(1 - \frac{U}{2U_0}\right)^n (thM)^{-1} th \left[M \frac{U/2U_0}{(1 - U/2U_0)^{n-1}} \right], \quad (9)$$

де I_{C03} , I_{C04} – струми стоків при $U_{3B} = 0$ і $U_{CB} = U_0$ польових транзисторів VT3 і VT4; $U_{\hat{A}}$ – напруга живлення; $n = 1, 8 \dots 2, 0$ для малопотужних польових транзисторів; $\Delta = (U_{CB3} - U_{CB4})/U_0$.

Тривалості переднього і заднього фронту генерованих прямокутних імпульсів

$$t_{\hat{o}} = \tilde{N}_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}} \int_{U_B}^{U_C} \frac{du}{I_0 - i(u)}, \quad (10) \quad t_{\hat{\phi}} = C_{\hat{e}\hat{k}\hat{b}} \int_{U_D}^{U_A} \frac{du}{I_0 - i(u)} \quad (11)$$

Отримано співвідношення умови самозбудження (12) коливань електрично керованого НВЧ генератора електричних коливань на біполярно-польовій транзисторній структурі, та амплітуда стаціонарних коливань генератора, що визначається рівнянням (13)

$$\left(g_s + a \frac{eU_2^2}{kT} \right) R > 1, \quad (12) \quad U_{CT} = 2 \sqrt{\left(g_s + a \frac{eU_2^2}{kT} \right) R - 1} / \sqrt{\frac{ae}{kT} \left(U_2^2 \left(\frac{e}{kT} \right)^2 - 3 \right) R}. \quad (13)$$

Вперше розроблено й досліджено НВЧ генератор на НЕМТ-транзисторній структурі з оптичною зміною частоти генерації в діапазоні частот 1,825...2,055 ГГц і максимальною чутливістю 3,55 МГц/(мкВт/см²). На основі нелінійної еквівалентної схеми цього генератора отримано функцію перетворення густини потужності оптичного опромінення у частоту генерованих коливань.

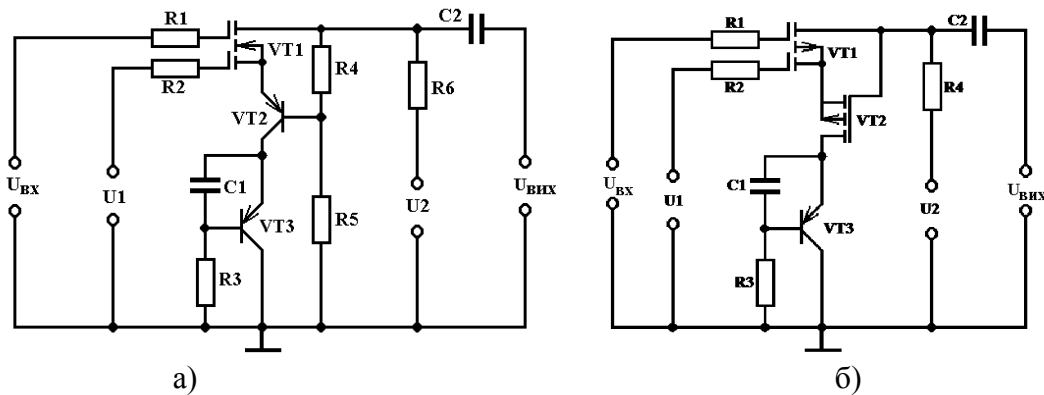


Рис. 9. Електрично керований фазообертач на біполярно-польовій (а) та польовій (б) транзисторних структурах з від'ємним опором

Крім того розроблено та досліджено електрично керовані фазообертачі на біполярно-польовій (рис. 9 а) та польовій (рис. 9 б) транзисторних структурах з від'ємним опором, для яких забезпечується керування величиною кута фазового зсуву від -80° до 80° (рис. 10 а) та від -140°

до 170° (рис. 11, а), відповідно. При цьому величина модуля коефіцієнта відбиття для обох досліджуваних фазообертачів знаходиться в межах 0,05 – 0,7 (рис. 10, б, рис. 11, б).

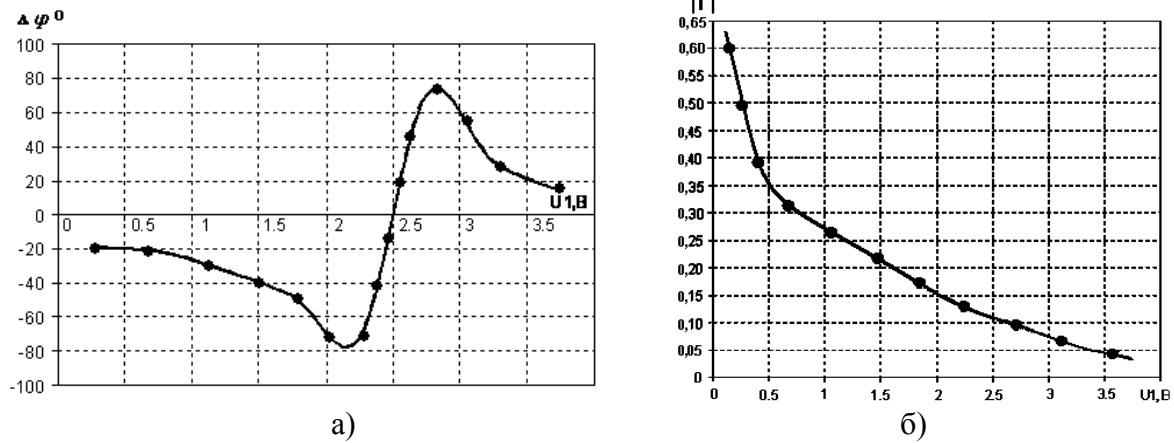


Рис. 10. Залежність зміни фазового зсуву (а) та коефіцієнту відбиття (б) електрично керованого фазообертача від напруги живлення при $Z = -1,8 \cdot 10^3 - j4,3 \cdot 10^4$

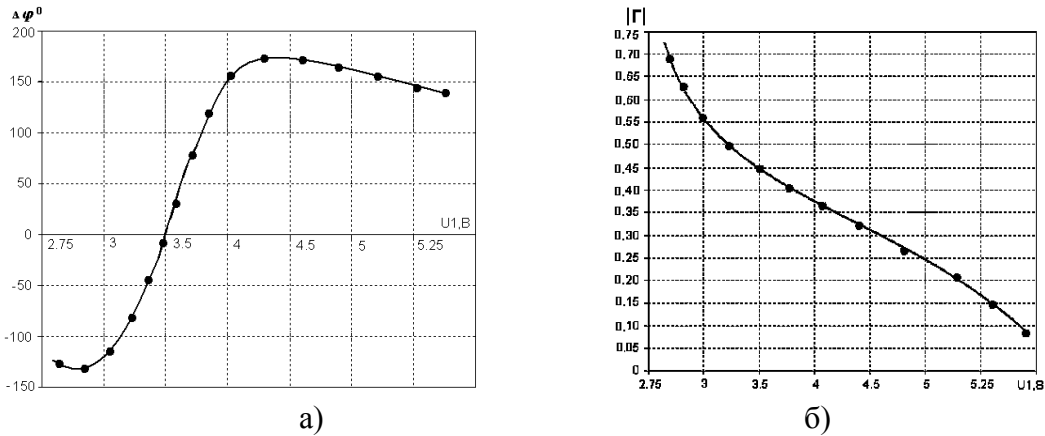


Рис. 11. Залежність зміни фазового зсуву (а) та коефіцієнту відбиття (б) електрично керованого фазообертача від напруги живлення при $Z = -1,8 \cdot 10^3 - j4 \cdot 10^4$

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-технічного завдання розширення функціональних можливостей радіовимірювальних приладів на основі ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором.

У науковому аспекті розроблено математичні моделі електрично керованих еквівалентів ємностей, помножувачів частоти, імпульсних генераторів, які мають покращені технічні та експлуатаційні характеристики.

У інженерно-технічному аспекті винайдені й досліджені нові схемотехнічні рішення помножувачів частоти, імпульсних генераторів, фільтрів та фазообертачів з використанням електрично керованих еквівалентів ємностей на біполярній, біполярній статично індукованій, польовій, біполярно-польовій, НЕМТ-транзисторних структурах з від'ємним опором у діапазоні частот $10^5 \dots 10^9$ Гц.

Отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Вперше отримано квазілінійні аналітичні залежності повного опору електрично керованих еквівалентів ємності радіовимірювальних приладів на біполярній, біполярно статично індукованій, біполярно-польовій та польовій транзисторних структурах з від'ємним опором.

2. На основі квазілінійної моделі помножувачів частоти й рівняння паралельного коливального контуру отримано аналітичні залежності умов стійкої роботи й коефіцієнтів передачі напруги у режимах подвоєння та потроєння частоти.

3. Удосконалено нелінійну математичну модель імпульсних генераторів з електричним пере-

лаштуванням частоти генерації на основі транзисторних структур з від'ємним опором, яка, на відміну від наявних, враховує їхні режими живлення. На основі методу фазової площини отримано рівняння для визначення часових параметрів прямокутних імпульсів і лінійно змінної напруги в межах швидких і повільних рухів робочої точки.

4. Отримано аналітичні рівняння коефіцієнту згасання для одноланкового та двохланкового фільтрів з урахуванням їхнього коефіцієнта навантаження на основі електрично керованих еквівалентів ємностей на транзисторних структурах з від'ємним опором.

5. Запропоновано нові схемотехнічні рішення НВЧ фазообертачів з електричним перелаштуванням кута фазового зсуву на основі ємнісного ефекту в польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним опором.

6. Проведено експериментальні дослідження електрично керованих еквівалентів ємностей на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, коефіцієнт перелаштування яких змінюється у межах від 9 до 40 разів.

7. Виконано експериментальні дослідження параметрів радіовимірювальних приладів на основі ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором у широкому діапазоні робочих частот залежно від режимів електричного живлення, з урахуванням впливу зовнішніх чинників.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Коваль К. О. Генератор прямокутних імпульсів на основі польової транзисторної структур з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. №1(82) – С. 92–97.

2. 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.

3. Koval K. Active component of radiomeasuring devices on bipolar transistor structure with negative resistance. [Електронний ресурс] / Koval K. O. // Scientific works of Vinnytsia National Technical University. – 2010. – №1. – С. 1-7. – Режим доступу до журн.: http://nbuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2010_1/2010-1_en.htm

4. Коваль К. О. Оптично керований НВЧ генератор на основі НЕМТ-транзисторної структури / К. О. Коваль, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Оптикоелектронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – №2(10). – С. 124–131.

5. Коваль К. О. Помножувач частоти на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – №3(112), Т.1. Технічні науки. – С. 139–144.

6. Коваль К. О. НВЧ помножувач частоти на основі транзисторної структури з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – №1. – С. 62–66.

7. Коваль К. О. Генератор лінійно змінної напруги на основі транзисторної структури з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – №2. – С. 71–75.

8. Коваль К. О. Квазілінійна математична модель помножувача частоти на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – №4. – С. 244–249.

9. Коваль К. О. Активний фільтр на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: Міжнародна науково-технічна конференція, 02–05 червня 2005 р.: мат. конф. – Вінниця, 2005. – С. 167.

10. Коваль К. О. Транзисторний еквівалент керованої ємності / К. О. Коваль, О. В. Осадчук // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування: Міжнародна науково-технічна конференція, 31 травня - 02 червня 2007 р.: матеріали конф. – Вінниця, 2007. – С.

136–137.

11. Коваль К. О. Електрично керована еквівалентна ємність на основі транзисторної структури з від'ємним опором / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Автоматика 2007: Міжнародна конференція з автоматичного управління, 10-14 вересня 2007 р.: матеріали конф. – Севастополь, 2007. – С. 172–175.

12. Koval K. Mathematical model of transistor equivalent of electrical controlled capacity / Osadchuk O., Koval K., Semenov A., Prutyla M. // Modern problems of Radio engineering, telecommunications and computer science: Proceedings of the international conference, 19-23 february 2008. – Lviv-Slavsko, 2008. – P. 35–36.

13. Коваль К. О. Активний фільтр високих частот на МДН-транзисторній структурній структурі / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : Міжнародний молодіжний форум, 1-3 квітня 2008р.: мат. форуму. – Харків, 2008. – С. 67.

14. Коваль К. О. Оптичний генераторний перетворювач на основі аналогу інжекційно-польового транзистора / К. О. Коваль, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Современные проблемы радиотехники та телекоммуникацій «РТ-2008»: Междунар. молодёжная науч.-техн. конф., 21-25 апреля 2008 г.: материалы конф. – Севастополь, 2008. – С. 318.

15. Коваль К. О. Дослідження електрично керованого НВЧ генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором / К. О. Коваль, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Датчики, прилади та системи – 2008: Міжнародна науково-технічна конференція, 10-12 вересня 2008 р.: матеріали конф. – Черкаси – Гурзуф, 2008. – С. 42–43.

16. Коваль К. О. Імітаційне моделювання активного елементу 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. – Ч2 С. 69.

17. Пат. 29421 України, МПК⁸ Н 03 Н 7/01. Електрично керований фільтр низьких частот / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет – № 200710779; подано 01.10.2007; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

18. Пат. 30176 України, МПК⁸ Н 03 Н 7/01. Електрично керований фільтр високих частот / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет – № 200712797; подано 19.11.2007; опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3.

19. Пат. 32335 України, МПК⁸ Н 03 С 3/00. Оптично керований генератор електричних коливань / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет - № 200800389; подано 11.01.2008; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 09.

20. Пат. 32336 України, МПК⁸ G 01 N 21/00. Оптичний вимірювач концентрації газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Гурський А. П., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет - № 200800391; подано 11.01.2008; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 09.

21. Пат. 33041 України, МПК⁸ Н 03 В 7/00. Електрично керований генератор лінійно змінної напруги / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О., Мартинюк В. В.; заявник Вінницький національний технічний університет – № 200801261; подано 01.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

22. Пат. 33049 України, МПК⁸ Н 03 В 7/00. Генератор прямокутних імпульсів / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет – № u200801301; подано 03.03.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

23. Пат. 38347 України, МПК⁸ Н 03 В 19/00. Мікроелектронний електрично керований помножувач частоти / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Семенова О. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет - № u200812443; подано 23.10.2008; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1.

24. Пат. 38348 України, МПК⁸ Н 03 В 7/00. Електрично керований генератор лінійно змінної частоти / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Семенова О. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет - № u200812442; подано 23.10.2008; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1.

25. Пат. 38506 України, МПК⁸ Н 03 В 19/00. Електрично-керований помножувач частоти / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет - № u200810040; подано 04.08.2008; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1.

26. Пат. 39839 України, МПК⁸ Н 03 В 19/00. Електрично керований фазообертач діапазону НВЧ / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О.; заявник Вінницький національний технічний університет - № u200812834; подано 03.11.2008; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 5.

27. Пат. 90435 Україна, МПК⁸ Н 01 Р 1/18 Електрично керований НВЧ фазообертач / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О., Семенова О. О.; заявник Вінницький національний технічний університет - № a200806924; подано 19.05.2008; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.

АНОТАЦІЯ

Коваль К. О. Радіовимірювальні прилади на основі ємнісного ефекту в транзисторних структурах з від'ємним опором. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – Радіовимірювальні прилади. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2010.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-технічного завдання розширення функціональних можливостей радіовимірювальних приладів на основі ємнісного ефекту транзисторних структурах з від'ємним опором.

Розроблено та досліджено функціональні вузли перетворення спектрального складу сигналів радіовимірювальних приладів, зокрема помножувачі частоти, електричні фільтри, імпульсні генератори та фазообертачі, на основі ємнісного ефекту біполярної, біполярної статично індукованої, польової, біполярно-польової транзисторних структур з від'ємним опором, у яких забезпечується можливість електронного керування параметрами: коефіцієнтом помноження, частотою зрізу, частотою та часом (фронтом) імпульсів, кутом фазового зсуву, відповідно. Дістав подальший розвиток квазілінійний метод аналізу, за допомогою якого отримано нові аналітичні співвідношення умов стійкої роботи та коефіцієнтів передачі по напрузі для другої та третьої гармонік вихідного сигналу помножувачів частоти на біполярній, польовій та біполярно-польовій транзисторних структурах з від'ємним опором які, на відміну від наявних, враховують їх режими живлення та керування. Удосконалено нелінійні математичні моделі генераторів прямокутних імпульсів і лінійно змінної напруги на польовій та біполярній транзисторних структурах, що використовують апроксимацію статичних ВАХ степеневим поліномом та функцією гіперболічного тангенсу, які, на відміну від наявних, враховують вплив режимів живлення цих генераторів на форму генерованих коливань. Результати експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання радіовимірювальних приладів підтверджують теоретично отримані аналітичні співвідношення.

Ключові слова: радіовимірювальні прилади, ємнісний ефект, транзисторна структура, від'ємний опір, помножувач частоти, електричний фільтр, імпульсний генератор, фазообертач.

АННОТАЦИЯ

Коваль К. О. Радиоизмерительные приборы на основе ёмкостного эффекта в транзисторных структурах с отрицательным сопротивлением. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 – Радиоизмерительные приборы. – Винницкий национальный технический университет, Винница – 2010.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической задачи расширения функциональных возможностей радиоизмерительных приборов на основе ёмкостного эффекта в транзисторных структурах с отрицательным сопротивлением.

Разработаны и исследованы электрически управляемые эквиваленты ёмкости на биполярной, биполярной статически индуцированной, полевой, биполярно-полевой транзисторных структур транзисторных структурах с отрицательным сопротивлением, для которых выведены новые аналитические уравнения частотных зависимостей полного сопротивления и его действительной и мнимой частей, а также эквивалентной ёмкости. Приведены совмещенные графические зависимо-

сти выше перечисленных теоретических и экспериментальных зависимостей, полученные коэффициенты перекрытия ёмкости таких устройств составляют 9, 16, 18 и 40 раз для биполярной, биполярной статически индуцированной, полевой, биполярно-полевой транзисторных структур, соответственно. Выполнено имитационное моделирование, получены семейства вольтамперных характеристик, частотные зависимости действительной и мнимой частей полного сопротивления и эквивалентной ёмкости электрически управляемых ёмкостей на транзисторных структурах с отрицательным сопротивлением. Кроме того, оценено (промоделировано) влияние дестабилизирующего фактора (рабочей температуры) на параметры исследованных активных элементов для радиоизмерительных приборов.

Разработаны функциональные узлы радиоизмерительных приборов для метрологии параметров элементов радиотехнических схем и сигналов, в частности, умножители частоты, электрические фильтры, импульсные генераторы и фазовращатели на основе ёмкостного эффекта биполярной, полевой, биполярно-полевой транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, в которых обеспечивается возможность электрического управления их параметрами: коэффициентом умножения, частотой среза, частотой и временем (фронтом) импульсов, углом фазового поворота соответственно.

Получены математические модели квазилинейных умножителей частоты на биполярной, полевой и биполярно-полевой транзисторных структурах с отрицательным сопротивлением на основе обобщенной эквивалентной схемы, которая, в отличие от существующих, учитывает режимы работы активных элементов умножителей частоты в зависимости от изменений напряжений питания и управления. Получил дальнейшее развитие квазилинейный метод анализа, с помощью которого выведены новые аналитические соотношения коэффициента передачи по напряжению второй и третьей гармоник выходного сигнала активных элементов, умножителей частоты на указанных транзисторных структурах с отрицательным сопротивлением.

Разработана математическая модель генератора прямоугольных импульсов на полевой транзисторной структуре с использованием нелинейной аппроксимации статической ВАХ транзисторной структуры с помощью функции гиперболического тангенса, на основе которой проведено исследование стационарного режима, что позволило вывести аналитические зависимости длительности импульсов и паузы между ними, а также длительность и переднего и заднего фронтов. Усовершенствованы нелинейные математические модели генераторов линейно изменяющегося напряжения на полевой и биполярных транзисторных структурах, которые используют аппроксимацию статических ВАХ степенным полиномом и функцией гиперболического тангенса, которые, в отличие от существующих, учитывают влияние режимов напряжений питания и управления таких генераторов на форму генерируемых колебаний с возможностью оптической и электрической перестройки частоты генерации в гигагерцовом диапазоне частот; рассчитано значение максимальной чувствительности. На базе нелинейной эквивалентной схемы этого генератора выведена функция преобразования плотности мощности оптического излучения в частоту генерируемых колебаний. Разработаны новые схемотехнические решения электрических фильтров низких, высоких частот и фазовращателей сверхвысокочастотного диапазона частот с электрически управляемыми параметрами частотой среза и углом фазового поворота.

Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования разработанных радиоизмерительных приборов подтверждают теоретически полученные аналитические соотношения.

Ключевые слова: радиоизмерительные приборы, ёмкостной эффект, транзисторная структура, отрицательное сопротивление, умножитель частоты, электрический фильтр, импульсный генератор, фазовращатель.

ABSTRACT

Koval K.O. Radiomeasuring devices based on capacitance effect in transistor structures with negative resistance. A manuscript.

The thesis for the candidate of science degree by specialty 05.11.08 – Radiomeasuring equipments. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. – 2010.

The thesis is devoted to solving an actual scientific technical problem of functional capacity extension of the radiomeasuring devices based on capacitance effect in transistor structures with negative resistance.

There were developed and researched functional nodes transforming spectrum of radiomeasuring devices' signals, namely frequency multipliers, electrical filters, pulse generators and phase inverters based on the capacitance effect of bipolar, bipolar statically inducted, field-effect, bipolar-field transistor structures with negative resistance, in which the electric control ability for such parameters as: multiplication coefficient, cutoff frequency, pulse frequency and time (front), phase shift angle was provided. A quasilinear analysis method has got a further development, using it new analytical equations of stable operation conditions and resonance voltage carryover factors for the first, second and third harmonic of the output current of the frequency multipliers on bipolar, field-effect and bipolar-field transistor structures with negative resistance have been obtained, they distinguish from the known ones by taking into account supply and control modes. Non linear mathematical models of square pulse generators and linearly-changing ones on field-effect and bipolar transistor structures have been improved, using static volt-ampere characteristic approximation by a power polynomial and a hyperbolic tangent function, they distinguish from the known ones by taking into account the impact of the generator supply modes on generated oscillations form. Results and simulation of experimental research radiomeasuring devices prove theoretically obtained analytical equations.

Key words: radiomeasuring devices, capacitance effect, transistor structure, negative resistance, frequency multiplier, electrical filter, pulse generator, phase inverter.

Підписано до друку 09.09.2010 р. Формат 29.7x42¹/₄
Наклад 100 прим. Зам. № 2010-154
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел. 59-81-59