

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

БАЧИК ДАРІЯ РОМАНІВНА



УДК 621.372.061

**ЗАСОБИ КОМП'ЮТЕРНОГО СХЕМОТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮ-
ВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ ВУЗЛІВ НА
ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО СИМВОЛЬНОГО МЕТОДУ**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Шаповалов Юрій Іванович,
професор кафедри радіоелектронних пристроїв та систем Національного університету „Львівська політехніка”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бойко Іван Федорович,
професор кафедри електроніки
Національного авіаційного університету

доктор технічних наук, с.н.с.
Зубков Анатолій Миколайович, Академія Сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, провідний науковий співробітник Науково-дослідного відділу Ракетних військ та артилерії

Захист відбудеться «25» квітня 2014 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий 24 березня 2014 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., доцент*



А.П. Бондарев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Схемотехнічне проектування, як і інші етапи проектування, зводиться до формування опису проектного радіоелектронного пристрою та складається з окремих проектних процедур, чимало з яких на сьогоднішній день реалізовані з допомогою пакетів прикладних програм автоматизованого проектування. Типовими проектними процедурами для схемотехнічного проектування радіоелектронного пристрою є аналіз, оптимізація та синтез. Одним з важливих методів аналізу при проектуванні радіоелектронних вузлів є багатоваріантний аналіз. У наявних комп'ютерних засобах та програмах схемотехнічного моделювання застосовуються переважно числові методи розв'язання задач багатоваріантного аналізу та оптимізації радіоелектронних пристроїв. Хоча сам процес числового моделювання є досить швидкий, проте він не дає змоги виявити зв'язки між вихідними величинами та параметрами проектного радіотехнічного вузла у символічному вигляді. Тому на противагу числовим методам виступають символічні методи, які дозволяють формувати символічні передавальні функції електронних пристроїв, зокрема, й параметричних радіотехнічних вузлів. Наявність таких функцій робить процес проектування більш цілеспрямованим та якісно змістовним, оскільки дозволяє достатньо швидко розв'язувати задачі багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних радіотехнічних функціональних вузлів.

Параметричні радіотехнічні вузли широко використовуються у космічних системах зв'язку, системах супутникового телебачення та при дослідженні штучного інтелекту. На сьогоднішній день математичне та програмне забезпечення схемотехнічного проектування параметричних радіотехнічних вузлів, які моделюються лінійними параметричними колами, є достатньо обмежене, що викликано недостатнім розвитком теорії та методів символічного аналізу лінійних параметричних кіл.

На початку 80-х років минулого століття з'явилися потужні програмні пакети символічної математики, такі як, Maple, MATLAB, Wolfram Mathematica, Mathcad, які спрощують програмну реалізацію символічних методів. Частотний символічний метод (ЧС-метод), запропонований Шаповаловим Ю.І., є одним із методів аналізу усталених періодичних режимів лінійних параметричних кіл, який реалізований у програмному середовищі MATLAB 7.0 пакетом підпрограм SAPC. Але потреби проектування радіоелектронних пристроїв та систем вимагають подальшого розширення проектних процедур, якими моделюють радіотехнічні вузли. Тому подальший розвиток ЧС-методу та його застосування до багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів є актуальною науковою задачею, розв'язанню якої присвячена дана дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у Національному університеті „Львівська політехніка” та спрямована на розв'язання задач, якими займається кафедра „Радіоелектронні пристрої та системи” в рамках держбюджетної роботи “Розроблення люмінесцентного скануючого оптичного мікроскопа з керованим швидким заморожуванням мікрооб'єкта для досліджень в кріобіології та нанотехнологіях”.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розвиток ЧС-методу, розроблення алгоритмів багатоваріантного аналізу і оптимізації та їх засто-

сування до реалізації проектних процедур схемотехнічного проектування параметричних радіотехнічних вузлів на підставі їх частотних символічних (ЧС) моделей.

Для досягнення поставленої мети в роботі виконано такі завдання:

1. Досліджено методи побудови звичайних та модифікованих ЧС-моделей параметричних радіотехнічних вузлів, обґрунтовано вибір оптимальної моделі параметричних радіотехнічних вузлів з точки зору обчислювальної ефективності і багатоваріантного аналізу та оптимізації.

2. Розроблено та реалізовано алгоритми формування параметричних передавальних функцій, визначених ЧС- моделлю параметричного функціонального вузла.

3. Розроблено та реалізовано алгоритми багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних вузлів за умови контролю асимптотичної стійкості.

4. З метою підтвердження адекватності реалізованих алгоритмів, проведено обчислювальні експерименти з багатоваріантного аналізу та оптимізації ряду параметричних радіотехнічних вузлів за умови контролю їх асимптотичної стійкості.

Об'єкт дослідження – електричні процеси у параметричних радіотехнічних вузлах радіоелектронних систем.

Предмет дослідження – комп'ютерне моделювання усталених режимів роботи параметричних функціональних вузлів радіоелектронних систем.

Методи дослідження – для вирішення поставлених завдань у теоретичних дослідженнях використані основні положення та методи теорії електричних кіл, ЧС-методу та обчислювальної математики. Експериментальні дослідження проводились з використанням математичних методів шляхом числового, символічного аналізу та комп'ютерного моделювання за допомогою прикладних пакетів MATLAB 7.6.0(R2008a), MicroCap 7.0.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено ЧС-модель параметричних радіотехнічних вузлів, яка на відміну від ЧС-моделі типу «вхід-вихід», дає змогу виключно у частотній області визначати необхідні передавальні функції та проводити багатоваріантний аналіз та оптимізацію.

2. Вперше показано коректність визначення похідних параметричних передавальних функцій, сформованих за ЧС-методом, та розроблено процедуру визначення функцій чутливості параметричних радіотехнічних вузлів, що дало можливість реалізувати проектні процедури багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів.

3. Вперше показана адекватність оцінки асимптотичної стійкості усталених режимів ЧС-методом у порівнянні з методом, оснований на другому методі Ляпунова, та методом повільно змінних амплітуд, що дало змогу розширити область асимптотичної стійкості у просторі параметрів компонентів.

4. Вперше за ЧС-методом формалізовано та розв'язано задачу визначення областей стійкості усталених періодичних режимів параметричних радіотехнічних вузлів, що дало змогу розробити алгоритми багатоваріантного аналізу та оптимізації у цих областях.

Практичне значення одержаних результатів:

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у тому, що на основі ЧС-методу розроблено систему функцій MAOPCs для багатоваріантного аналізу та оп-

тимізації ustalених періодичних режимів параметричних радіотехнічних вузлів за умови контролю їх асимптотичної стійкості.

Результати роботи використані: у навчальному процесі кафедри „Радіоелектронні пристрої та системи” Національного університету „Львівська політехніка”; у фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України; у Запорізькому державному підприємстві „Радіоприлад”, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, представлених у роботі, полягає в тому, що всі положення, які становлять суть дисертації, були сформульовані особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: [10] - розробка алгоритмів визначення параметричних передавальних функцій з ЧС-моделі радіотехнічного вузла, аналізу допусків, оптимізації та програмна реалізація системи функцій МАОРС і дослідження одноконтурного параметричного підсилювача за допомогою цієї системи; [4,5,6,8,9,12,16] - розробка алгоритму побудови області стійкості і застосування тригонометричного комплексного полінома Фур'є до оцінки асимптотичної стійкості за ЧС-методом та оцінка стійкості одноконтурного параметричного підсилювача зі змінною індуктивністю, параметричного паралельного контуру; [4, 5, 16] - розробка алгоритмів формування функції цілі та проведення оптимізації ряду параметричних функціональних вузлів; [3, 18] - вдосконалення методів виключення змінних у символічних часових моделях параметричних радіотехнічних вузлів та проведений обчислювальний експеримент; [2,7,17] - розробка алгоритмів визначення функцій чутливості і відносних відхилень характеристик кіл та проведені обчислювальні експерименти з визначення таких функцій для ряду параметричних радіотехнічних вузлів; [11,13,14,15]- формування ЧС-моделей одноконтурного та двоконтурного параметричних підсилювачів та балансного модулятора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних у дисертації досліджень доповідались і обговорювались на таких міжнародних науково-технічних конференціях, форумах і семінарах:

- дванадцятому міжнародному семінарі “Computation Problems of Electrical Engineering” (CPPE-2011), 5-7 вересня 2011р., с. Кострино, Закарпатська область, Україна;
- одинадцятій міжнародній науково-технічній конференції „Modern problems of radio engineerings, telecommunications and computer science” (TCSET 2012), 21- 24 лютого 2012 р., с. Славсько, Львівська область, Україна;
- міжнародній науково-технічній конференції "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи ", 22–29 лютого 2012 р., Київ, Україна;
- тринадцятому міжнародному семінарі “Computation Problems of Electrical Engineering” (CPPE-2012), 5-8 вересня 2012 р., м. Грибів, Польща;
- симпозиумі «IEEE East-West Design & Test Symposium 2012», 14-17 вересня 2012 р., м. Харків, Україна;
- міжнародній науково-технічній конференції "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи", 11–15 березня 2013 р., Київ, Україна;

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 наукових праць, з яких 10 – у фахових виданнях [1,2,3,4,6,8,10,11,12,13], 2 – у закордонних фахових виданнях

[15,19] та 6 тез доповідей на науково-технічних конференціях та семінарах [5,9,14,16,17,18].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Робота викладена на 220 сторінках друкованого тексту, містить 152 сторінки основного тексту, 33 рисунки, 15 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** відображено актуальність теми, обґрунтовано мету та основні завдання досліджень. Показано зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Сформульовано наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення. Наведено дані про публікації, апробацію результатів дисертаційних досліджень та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено огляд методів символьного аналізу та методів оцінки асимптотичної стійкості параметричних радіотехнічних вузлів, що моделюються лінійними параметричними колами.

Символьним методам аналізу лінійних параметричних кіл притаманні істотні переваги у порівнянні з числовими методами, тому що отримувані на їх основі аналітичні вирази:

- дозволяють достатньо швидко виявити зв'язки між характеристиками кола та параметрами його елементів чи вхідними сигналами;
- дозволяють визначити функції чутливості, використовуючи символьні параметричні передавальні функції;
- дозволяють проводити оцінку асимптотичної стійкості навіть при одночасній зміні усіх параметрів, зокрема, ЧС-методом;
- визначаються один раз і є основою для подальших багаторазових обчислень при зміні вхідних даних.

Відомі та найбільш широко описані в літературі символьні методи аналізу лінійних параметричних кіл є наступні.

1. Частотні методи Л.А.Заде. Не набули подальшого застосування у зв'язку зі складністю отримуваних виразів (навіть при використанні сучасного програмного та апаратного забезпечення).

2. Метод функцій Туркіна. Не набув подальшого розвитку у зв'язку з своїм застосуванням лише до аналізу кіл першого порядку.

3. Метод гармонічного балансу. Не зручний для аналізу кіл при зміні форми вхідних сигналів.

За останнє десятиріччя набули поширення наступні символьні методи.

4. Метод символьних гармонічних передавальних матриць.

5. ЧС-метод.

Виходячи з проведеного огляду, у дисертаційній роботі зроблено висновок про те, що на сьогоднішній день найбільш ефективним методом аналізу лінійних параметричних кіл є ЧС-метод. Тому він і взятий за основу даної дисертаційної роботи. Проте, ЧС-метод теж має недоліки. І вони наступні:

- для багатьох практичних параметричних радіотехнічних вузлів відповідні їм

диференціальні рівняння «вхід-вихід» є непомірно громіздкі і не можуть бути сформовані навіть сучасними засобами програмного та апаратного забезпечення;

- якщо диференціальні рівняння, які зв'язують зовнішні змінні, у середовищі MATLAB 7.6.0 і формуються, то є непомірно громіздкі, що стає суттєвою перешкодою для їх використання у задачах багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів;

- для формування диференціального рівняння, яке зв'язує зовнішні змінні, за ЧС-методом застосовуються методи виключення внутрішніх змінних у системах диференціальних рівнянь, що описують параметричний радіотехнічний вузол у часовій області. При формуванні такого диференціального рівняння виникають спільні множники у його лівій та правій частинах, що впливає на громіздкість обчислень;

- у роботах Шаповалова Ю.І. представлено методи побудови ЧС-моделей, які дозволяють формувати спряжені параметричні передавальні функції для практичних параметричних радіотехнічних вузлів підвищеної складності, але ці методи не є достатньо досліджені і вимагають додаткового дослідження їх ефективності.

Виходячи з виявлених недоліків, у першому розділі дисертаційної роботи зроблено висновок про необхідність подальшого розвитку ЧС-методу у наступних напрямках:

1. Дослідження методів побудови звичайних та модифікованих ЧС-моделей. Вибір оптимальної ЧС-моделі параметричних радіотехнічних вузлів з точки зору їх багатоваріантного аналізу та оптимізації. Дослідження можливості застосування еквівалентних перетворень до обраних ЧС-моделей параметричного елемента. Розробка та програмна реалізація алгоритмів визначення передавальних функцій за ЧС-моделлю параметричного радіотехнічного вузла.

2. Дослідження впливу вибору зовнішніх змінних та вдосконалення алгоритмів автоматизованого виключення змінних у системах диференціальних рівнянь з метою зменшення громіздкості подальших обчислень.

3. Порівняння існуючих методів оцінки асимптотичної стійкості лінійних параметричних кіл з методом оцінки асимптотичної стійкості за ЧС-методом. Розробка алгоритму визначення областей асимптотичної стійкості параметричних функціональних вузлів радіоелектронних систем.

4. Дослідження коректності визначення похідних параметричних передавальних функцій за апроксимації їх тригонометричними поліномами Фур'є.

5. Реалізації ЧС-методу у вигляді програмного продукту багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів за умови контролю їх стійкості.

Другий розділ дисертації присвячено розвитку ЧС-методу аналізу лінійних параметричних кіл.

На основі наведених у першому розділі недоліків ЧС-методу, у другому розділі дисертації розглянуто такі питання:

- дослідження впливу вибору зовнішніх змінних з метою суттєвого зменшення громіздкості диференціального рівняння і подальших обчислень;

- вдосконалення алгебраїчного та матричного методів виключення внутрішніх змінних у системах лінійних диференціальних рівнянь (СЛДР), що описують параметричний радіотехнічний вузол;

- аналіз ЧС- моделей та вибір оптимальної ЧС- моделі параметричних радіотехнічних вузлів з точки зору ефективності їх багатоваріантного аналізу та оптимізації.

Щодо першого питання. Зв'язок змінних на елементах носить характер алгебраїчних, диференціальних чи інтегральних рівнянь. Як показали експерименти, на громіздкість системи рівнянь, що описують задане лінійне параметричне коло у часовій області, суттєво впливає наявність у ній інтегральних виразів. Оскільки вхідні та вихідні змінні, зазвичай, є задані, то потрібно вибирати такий метод формування диференціальних рівнянь, який би забезпечував відсутність інтегральних виразів. У роботі сформульовано правила формування СЛДР кола, які забезпечують відсутність у СЛДР інтегральних виразів. Ці правила наступні:

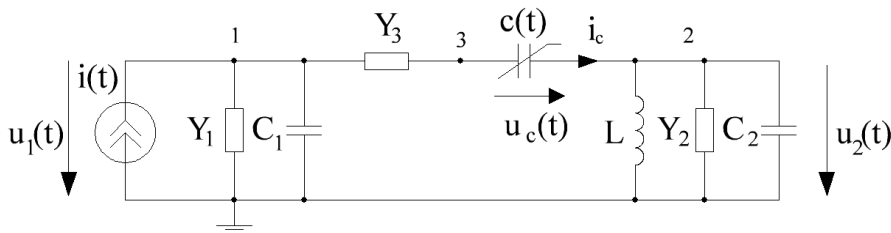


Рис.1. Параметричний балансний модулятор
 $i(t) = I_m \cdot \cos(\omega_c \cdot t + \varphi)$, $c(t) = c_0 \cdot (1 + m \cdot \cos(\Omega \cdot t))$.

Правило 1. Для забезпечення відсутності інтегральних виразів у системі рівнянь, змінними у них найбільш зручно обирати напруги на конденсаторах та струми в котушках індуктивності.

Правило 2. За відсутності інших вимог, математичну модель кола у часовій області найбільш зручно формувати табличним методом, який забезпечує відсутність у рівняннях інтегральних виразів без додаткових дій по їх усуненню. Крім цього, табличний метод не накладає обмежень на структуру та елементи кола.

У дисертаційній роботі відмічено залежність громіздкості диференціальних рівнянь від зовнішніх змінних. Покажемо це на прикладі параметричного балансного модулятора. Опишемо модулятор системою лінійних алгебраїчних рівнянь за табличним методом. Визначимо усі можливі диференціальні рівняння, які зв'язують вхідний сигнал $i(t)$ з іншими змінними модулятора з рис.1.

Гістограма з рис.2 ілюструє той факт, що громіздкість диференціальних рівнянь, які зв'язують вхідний сигнал $i(t)$ з іншими змінними модулятора, є принципово різною. Кожне з таких диференціальних рівнянь займає певний об'єм комп'ютерної пам'яті, що і відображено на рис.2. Необхідний об'єм комп'ютерної пам'яті для диференціального рівняння може відрізнятись у 5-30 разів.

Як витікає з рис.2, а це підтверджується й виконаними експериментами для інших радіотехнічних вузлів, найменший об'єм комп'ютерної пам'яті займає диференціальне рівняння, що складене відносно вхідного сигналу та змінної, що належить до параметричного елемента. Таким чином, третє правило формування диференціального рівняння, що описує коло у часовій області, і яке забезпечує його прийнятну громіздкість, є наступним.

Правило 3. Не зважаючи на те, які змінні кола задані вихідними, у математичній моделі кола, яка сформована за правилом 2, виключаємо усі змінні, крім тих, які відповідають вхідному сигналу та параметричному елементу. Якщо джерел вхідних сигналів чи параметричних елементів у колі декілька, то й таких рівнянь потрібно сформувати декілька – по одному для кожної пари «вхід - параметричний елемент».

Сформовані за поданими трьома правилами диференціальні рівняння, які зв'язують зовнішні змінні, за методом Л.А.Заде переводяться у частотну область та розв'язуються ЧС-методом. У результаті отримуємо символічні параметричні передавальні функції, за допомогою яких формуються ЧС-моделі кожного параметричного елемента. Такі ЧС-моделі є основою для побудови ЧС-моделі параметричного радіотехнічного вузла в цілому.

У даному розділі розглянуто питання вдосконалення алгебраїчного та матричного методів виключення змінних у СЛДР зі змінними у часі коефіцієнтами.

Вдосконалення алгебраїчного методу полягає у тому що, у виразах двох коефіцієнтів, наприклад $a_i(t)$ та $b_i(t)$, які необхідно зрівняти, відбувається пошук спільного множника. Нехай такий спільний множник $c_i(t)$ виявлено: $a_i(t) = c_i(t) \cdot d_i(t)$ та $b_i(t) = c_i(t) \cdot f_i(t)$. Тоді для вирівнювання коефіцієнтів $a_i(t)$ та $b_i(t)$ достатньо рівняння, у яких вони присутні, помножити на $f_i(t)$ та $d_i(t)$, відповідно. Наприклад, для параметричного балансного модулятора, описане вдосконалення усуває з диференціального рівняння, яке зв'язує змінні u_1 та i_1 , спільний множник $Y_3^3 \cdot c(t)^2$.

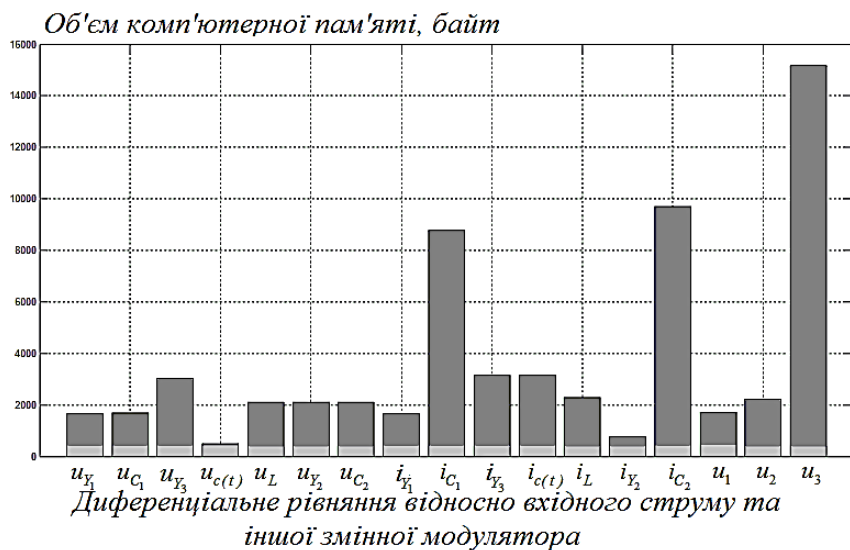


Рис.2. Порівняльна гістограма об'ємів диференціальних рівнянь у символічному вигляді, визначених з системи рівнянь, що складена за табличним методом.

рівняння, яке зв'язує змінні u_1 та i_1 , до вигляду Y_3^2 . Для інших радіотехнічних вузлів ефект спрощення спільного множника є важливим, тому що дозволяє суттєво зменшити громіздкість диференціального рівняння.

З проведених обчислювальних експериментів випливає той факт, що алгебраїчний метод з описаним вдосконаленням забезпечує у кінцевому результаті відсутність спільних множників і найменш громіздкий вигляд диференціального рівняння.

Заключним питанням другого розділу є аналіз декількох видів ЧС-моделей параметричних функціональних вузлів, які формуються на основі ЧС-моделей параметричних елементів.

На основі цього у дисертаційній роботі запропоновано методику вибору ЧС-моделі параметричного радіотехнічного вузла. Відповідно до даної методики, для розв'язування задач аналізу допусків та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів у дисертаційній роботі, обрано ЧС-модель, що основана на представлені па-

раметричних елементів додатковими незалежними джерелами сигналу у частотній області.

Проілюструємо використання наведених вище правил для побудови ЧС-моделі параметричного балансного модулятора з рис. 1. Як витікає з рис.2, диференціальне рівняння, яке зв'язує вхідний струм $i(t)$ та струм на параметричній ємності $i_c(t)$, займає значний об'єм пам'яті. Тому формуємо диференціальне рівняння, яке зв'язує вхідний струм $i(t)$ та напругу на параметричній ємності $u_c(t)$, тому що воно займає найменший об'єм комп'ютерної пам'яті (рис.2). Сформоване диференціальне рівняння за методом Л.А.Заде переводимо у комплексну область, де воно залишається диференціальним по t відносно змінної, що представляє собою параметричну функцію передавання $Z(s,t)$ зображення $I(s)$ вхідного сигналу $i(t)$ у зображення $U_c(s,t)$ напруги $u_c(t)$. Розв'язок цього рівняння за ЧС-методом представляється апроксимацією у вигляді триногOMETричного полінома Фур'є. Таким чином, напругу на параметричній ємності модулятора у комплексній формі $U_c(s,t)$ формуємо у вигляді

$$U_c(s,t) = Z(s,t) \cdot I(s). \quad (1)$$

Згідно з теоремою заміщення, параметричний елемент $c(t)$ замінюємо на гілку джерела сигналу з величиною $E_c(s,t) = -U_c(s,t)$. Нехай, для подальших обчислень обрано метод вузлових напруг. Тоді джерело напруги $E_c(s,t)$ з провідністю Y_3 , як показано у дисертаційній роботі, можемо перетворити у еквівалентне джерело струму $J_c(s,t) = -U_c(s,t) \cdot Y_3 = -Z(s,t) \cdot Y_3 \cdot I(s)$, що приводить до побудови частотної моделі модулятора, придатної до аналізу методом вузлових напруг (рис.3), та визначення $U_1(s,t)$ та $U_2(s,t)$ у частотній області.

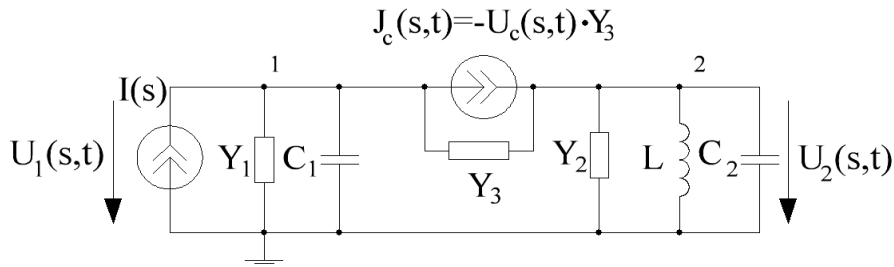


Рис. 3. Еквівалентна схема модулятора з рис.1, у якому параметрична ємність замінена джерелом струму $J_c(s,t)$

Так, рис. 3 визначає шукану математичну ЧС-модель модулятора з двома незалежними джерелами струму $I(s)$ та $J_c(s,t)$, складену за методом вузлових напруг:

$$\begin{bmatrix} (Y_1 + Y_3 + s_i C_1) & -Y_3 \\ -Y_3 & \left(Y_3 + Y_2 + s_i C_2 + \frac{1}{s_i L} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1(s,t) \\ U_2(s,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(s) - J_c(s,t) \\ +J_c(s,t) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де комплексна змінна $s_i = j(\omega \pm i \cdot \Omega)$, відображає присутність у ЧС-моделі (2) сигналів з різними частотними складовими $\omega \pm i \cdot \Omega$; $i = 0, 1, \dots, k$; k - кількість гармонічних складових у апроксимації $Z(s,t)$. ЧС-модель (2) визначає дві параметричні передавальні функції $Z_1(s,t) = U_1(s,t)/I(s)$ та $Z_2(s,t) = U_2(s,t)/I(s)$. Так, наприклад, з (2)

впливає вираз для параметричної передавальної функції $Z_2(s, t)$ модулятора у вигляді:

$$Z_2(s, t) = \frac{Y_3 - Z(s, t) \cdot Y_3 \cdot Y_1 - Z(s, t) \cdot Y_3 \cdot s_i C_1}{(s_i C_1 + Y_1) \cdot \left(Y_3 + Y_2 + s_i C_2 + \frac{1}{s_i L} \right) + Y_3 \left(Y_2 + s_i C_2 + \frac{1}{s_i L} \right)}. \quad (3)$$

Параметрична передавальна функція $Z_2(s, t)$ з виразу (3), визначена за ЧС-моделлю (2), є основою для подальшого розв'язування задач аналізу допусків та оптимізації параметричного балансного модулятора, що представлено у п'ятому розділі дисертаційної роботи.

Таким чином, запропоновані у другому розділі вдосконалення розширили область застосування ЧС-методу і адаптували його у практиці проектування параметричних радіоелектронних вузлів та пристроїв.

Третій розділ дисертації присвячено застосуванню ЧС-методу до багатоваріантного аналізу та оптимізації усталених режимів параметричних радіотехнічних вузлів. У цьому розділі запропоновано процедури аналізу допусків та оптимізації, що ґрунтовані на ЧС-методі. Важливим є те, що ці процедури здійснюються при контролі стійкості таких вузлів. У даному розділі також проведено порівняння існуючих методів оцінки стійкості (за методом Ляпунова, повільно змінних амплітуд, за ЧС-методом). Зроблено висновок про те, що ЧС-метод найбільш прийнятний, тому його взято за основу подальшого застосування для оцінки асимптотичної стійкості.

У розділі розглянуто процедури визначення функцій чутливості та аналізу допусків. Однак, при цьому виникає питання адекватності сформованих функцій чутливості, оскільки передавальні функції, визначені за ЧС-методом не є точними, а представляються апроксимованими виразами. Таким чином у дисертаційній роботі досліджено правомірність визначення та використання похідних параметричних передавальних функцій, що визначені у вигляді апроксимацій. Об'єктами дослідження обрано окрему параметричну ємність та резистивну ланку, оскільки для них існує точний аналітичний вираз параметричних передавальних функцій, а також одноконтурний параметричний підсилювач.

Як показали проведені дослідження, *точність обчислення похідних параметричних передавальних функцій, що сформовані за ЧС-методом, в основному визначається кількістю гармонічних складових k у апроксимації параметричної передавальної функції. Точність обчисленої похідної з врахованими у апроксимаційному виразі k першими гармонічними складовими достатня, якщо його збільшення не приводить до зміни результатів при заданій розрядній сітці комп'ютера. Таким чином, похідні параметричних передавальних функцій, що сформовані за ЧС-методом, можуть бути основою для обчислення функцій чутливості.*

Функції чутливості першого та другого порядку параметричної передавальної функції $W(s, t, x)$, сформованої за ЧС-методом, до зміни параметру деякого елемента x визначаються за типовими виразами

$$S_x^{|W(s, t, x)|} = \frac{\partial |W(s, t, x)|}{\partial x} \cdot \frac{x}{|W(s, t, x)|} \quad \text{та} \quad S_{x,x}^{|W(s, t, x)|} = \frac{\partial |W(s, t, x)|}{\partial x \partial x} \cdot \frac{x \cdot x}{|W(s, t, x)|}. \quad (4)$$

Функції $S_x^{|W(s,t,x)|}$ та $S_{x,x}^{|W(s,t,x)|}$, за аналогією з передавальною функцією $W(s,t)$, представляють собою функції параметричного радіотехнічного вузла, оскільки не залежить від поданих на нього сигналів і визначаються виключно його параметрами та структурою.

Для розв'язування задачі аналізу допусків параметричних радіотехнічних функціональних вузлів у дисертаційній роботі обрано метод моментів, який базується на представленні функції вузла у вигляді усіченого ряду Тейлора:

$$\delta|W(x_1, \dots, x_n, s, t)| \cong \sum_{i=1}^n S_{x_i}^{|W(x_1, \dots, x_n, s, t)|} \cdot \delta x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{x_i, x_j}^{|W(x_1, \dots, x_n, s, t)|} \cdot \delta x_i \cdot \delta x_j, \quad (5)$$

де $\delta|W(x_1, \dots, x_n, s, t)|$ - відносне відхилення параметричної передавальної функції $W(x_1, \dots, x_n, s, t)$, визначеної за ЧС-методом; δx_i , δx_j - відносні відхилення параметрів елементів x_i та x_j від номінальних значень, відповідно; n - кількість елементів у параметричному радіотехнічному вузлі; $S_{x_i}^{|W(x_1, \dots, x_n, s, t)|}$ та $S_{x_i, x_j}^{|W(x_1, \dots, x_n, s, t)|}$ - попередньо сформовані функції чутливості першого і другого порядків, відповідно.

При розв'язуванні оптимізаційних задач для параметричних радіотехнічних функціональних вузлів у дисертаційній роботі обрано загальний адитивний критерій оптимальності, який представляє собою суму квадратів відхилень вихідних характеристик від технічних вимог. У нашому випадку функція цілі $F(x_1, \dots, x_n)$ (адитивний критерій оптимальності) має вигляд

$$F(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (M_F(x_1, \dots, x_n, \omega_i, t_j) - M_0(\omega_i, t_j))^2, \quad (6)$$

де $M_0(\omega_i, t_j)$ та $M_F(x_1, \dots, x_n, \omega_i, t_j)$ - це функція мети та визначена за частотним символьним методом функція характеристики, відповідно.

Таким чином у третьому розділі роботи показано, що ЧС-метод є твердою основою розв'язування задачі аналізу допусків та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів, дозволяє контролювати асимптотичну стійкість, що підвищує надійність результату, отриманого за такими проектними процедурами.

Четвертий розділ дисертації присвячено розробці алгоритмів та програмній реалізації проектних процедур у вигляді системи функцій MAOPCs, яка призначена для комп'ютерного моделювання та розробки параметричних радіотехнічних функціональних вузлів, принцип роботи яких оснований на зміні параметрів їх елементів.

Архітектура системи функцій MAOPCs (Multivariate Analysis and Optimization of the Parametric Circuits). Система представляє собою 17 функцій, які реалізовані у середовищі MATLAB. Кожна з 17 функцій має аргументи та глобальні змінні і виконує над ними визначені перетворення. Глобальні змінні формують програму вхідних даних на дослідження параметричного радіотехнічного вузла і повинні бути визначені (задані) на момент виклику функції. Результати, отримані в процесі виконання однієї функції (в окремих випадках декількох функцій), можуть бути глобальними змінними для інших функцій. Послідовність розташування функцій довільна. Таким чином, на основі розробленої системи функцій та інших внутрішніх функцій пакету MATLAB, користувач може формувати необхідні алгоритми і програми

комп'ютерних досліджень і, у тому числі, багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричного радіотехнічного вузла, що досліджується. Система MAOPCs відкрита для поповнення її новими функціями. Для застосування системи функцій на персональному комп'ютері повинна бути встановлена програма MATLAB 7.6.0(R2008a), зокрема її компоненти Symbolic Toolbox, Extended Symbolic Math, Optimization Toolbox, Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox.

Для дослідження параметричних радіотехнічних вузлів в середовищі MATLAB з використанням системи MAOPCs необхідно дотримуватись системних вимог, які витікають з вище описаної архітектури системи функцій MAOPCs.

Система MAOPCs складається із наступних функцій:

- 1) Функція *TrFunc* призначена для формування спряженої символічної параметричної передавальної функції відносно зовнішніх змінних.
- 2) Функція *Stability* призначена для оцінки асимптотичної стійкості.
- 3) Функція *FunctionOfZoneStability* призначена для апроксимації межі області стійкості поліномом n -го порядку.
- 4) Функція *FSM* призначена для визначення параметричних передавальних функцій зі звичайної ЧС-моделі параметричного радіотехнічного вузла.
- 5) Функція *MFSM* призначена для визначення параметричних передавальних функцій з модифікованої ЧС-моделі параметричного радіотехнічного вузла.
- 6) Функція *OutVar* призначена для формування виразів для напруг чи струмів.
- 7) Функція *SensFO* призначена для розрахунку функції чутливості першого порядку.
- 8) Функція *SensSO* призначена для розрахунку чутливості другого порядку.
- 9) Функція *RelativeDeviation_FirstOrder* призначена для розрахунку функції відхилення першого порядку.
- 10) Функція *RelativeDeviation_SecondTerm* призначена для розрахунку другого члена відхилення функції.
- 11) Функція *RelativeDeviationOfFunction* призначена для розрахунку загального відхилення функції.
- 12) Функція *FormOfFunOfGoal* призначена для формування функції мети.
- 13) Функція *FormOfFunCharacteristic* призначена для формування функції характеристики.
- 14) Функція *FormOfObjectiveFun* призначена для формування функції цілі.
- 15) Функція *Table* призначена для формування таблиці значень функції.
- 16) Функція *Graph_2D* призначена для візуалізації функції у площині в залежності від зміни одного параметра елемента.
- 17) Функція *Graph_3D* призначена для візуалізації функції у просторі в залежності від зміни двох параметрів.

Розроблена система функцій MAOPCs дає змогу розробнику радіотехнічних вузлів, пристроїв та систем:

- досліджувати параметричні радіотехнічні вузли, задаючи алгоритми їх дослідження, не вникаючи в глибину математичного апарату реалізованих методів та використовуючи потужний символічний апарат та інші внутрішні функції пакету MATLAB повною мірою;
- створювати бібліотеки алгоритмів дослідження та проведення обчислювальних експериментів;

- поповнювати її новими функціями.

П'ятий розділ дисертації містить результати застосування системи функцій МАОРС до аналізу допусків та оптимізації типових параметричних радіотехнічних вузлів. У даному розділі представлено обчислювальні експерименти з аналізу допусків та оптимізації за умови контролю асимптотичної стійкості наступних параметричних радіотехнічних вузлів: одноконтурного параметричного підсилювача, двоконтурного параметричного підсилювача та параметричного балансного модулятора. Для одного з них, зокрема для балансного модулятора, це виглядає таким чином.

Завдання на експеримент 1. Провести аналіз допусків параметричного балансного модулятора з рис. 1. Визначити відносне відхилення модуля параметричної передавальної функції $Z_2(s, t) = U_2(s, t) / I(s)$ за зміни параметрів елементів модулятора $m, c_0, L, Y_1, Y_2, Y_3, C_1, C_2$ при умові його стійкості. Межі зміни кожного з параметрів є наступними: $m = 0.46 : 0.54$, $c_0 = 0.87e^{-12} : 0.93e^{-12}\Phi$, $L = 6.204e^{-8} : 6.857e^{-8}\Gamma\text{н}$, $Y_1 = 0.97e^{-3} : 1.03e^{-3}\text{См}$, $Y_2 = 0.0097 : 0.0103\text{См}$, $Y_3 = 0.0118 : 0.0132\text{См}$, $C_1 = 19.6e^{-12} : 20.4e^{-12}\Phi$, $C_2 = 1.721e^{-12} : 1.903e^{-12}\Phi$.

Експеримент 1. За процедурою аналізу допусків, алгоритм якої наведений у розділі 3 дисертаційної роботи, виконуємо наступні кроки:

Крок 1. За функцією **Stability** формуємо знаменник $\Delta_g(m, c_0, Y_1, Y_2, Y_3, L, C_1, C_2, s)$ нормальної параметричної передавальної функції $G(s, \xi)$ (ξ - момент подачі на вхід кола дельта-функції $\delta(t - \xi)$) від струму $I(s)$ у напругу на параметричній ємності $U_c(s, t)$ модулятора з рис.1. Оскільки знаменник $\Delta_g(m, c_0, Y_1, Y_2, Y_3, L, C_1, C_2, s)$ є громіздким, тому приводимо знаменник $\Delta_g(s)$ при символному значенні параметру s та $k = 1$:

$$\Delta_g(s) = -0.87e-108*s^{10} - 0.26e-68*s^6 - 0.39e-31*s^2 - 0.33e-40*s^3 - 0.19e-49*s^4 - 0.24e-22*s - 0.63e-78*s^7 - 0.81e-59*s^5 - 0.11e-87*s^8 - 0.13e-97*s^9 - 0.10e-14 - 0.33e-129*s^{12} - 0.27e-118*s^{11}. \quad (7)$$

Функція $G(s, \xi)$ є розв'язком диференціального рівняння:

$$\begin{aligned} & \left[0.19e3 + (0.41e-5 + 0.93e-7 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s + (0.29e-14 + 0.20e-15 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s^2 + \right. \\ & \left. + (0.88e-24 + 0.21e-24 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s^3 + (0.33e-34 + 0.16e-34 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s^4 \right] \cdot G(s, \xi) + \\ & \left[(-0.132e-33 - 0.64e-34 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s^3 + (-0.264e-23 - 0.63e-24 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s^2 + \right. \\ & \left. + (-0.58e-14 - 0.40e-15 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s - 0.41e-5 - 0.93e-7 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi) \right] \cdot G'(s, \xi) + \\ & \left[(0.198e-33 + 0.96e-34 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s^2 + (0.264e-23 + 0.63e-24 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s + \right. \\ & \left. + 0.29e-14 + 0.20e-15 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi) \right] \cdot G''(s, \xi) + \left[(-0.132e-33 - 0.64e-34 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi)) \cdot s - 0.88e-24 - \right. \\ & \left. - 0.21e-24 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi) \right] \cdot G'''(s, \xi) + \left[0.33e-34 + 0.16e-34 \cdot \cos(\Omega \cdot \xi) \right] \cdot G^{(4)}(s, \xi) = 1, \quad (8) \end{aligned}$$

яке, своєю чергою, витікає з диференціального рівняння, що описує модулятор з рис.1 відносно вхідного струму $i(t)$ та напруги на параметричній ємності $u_c(t)$ у часовій області і яке наведено у дисертаційній роботі.

Крок 2. За знаменником $\Delta_g(m, c_0, Y_1, Y_2, Y_3, L, C_1, C_2, s)$, який при $k=2$ забезпечує задовільну точність, та функцією **Stability** при символічних значеннях параметрів елементів $m, c_0, L, Y_1, Y_2, Y_3, C_1, C_2$ проводимо оцінку асимптотичної стійкості у межах зміни кожного з параметрів, які задані у завданні. Результати оцінки свідчать про асимптотичну стійкість параметричного балансного модулятора при зміні параметрів $m, c_0, L, Y_1, Y_2, Y_3, C_1, C_2$ у вказаних межах. На основі отриманих результатів з оцінки стійкості усі подальші дослідження проводимо у межах значень параметрів при яких модулятор з рис.1 є стійким. Тому, межі зміни кожного з параметрів елементів модулятора переводимо у відносні зміни $\delta m, \delta c_0, \delta L, \delta Y_1, \delta Y_2, \delta Y_3, \delta C_1, \delta C_2$ параметрів, які виражені у відсотках $\delta m = 7\%, \delta c_0 = 3\%, \delta L = 5\%, \delta Y_1 = 3\%, \delta Y_2 = 3\%, \delta Y_3 = 5\% \delta C_1 = 2\%, \delta C_2 = 5\%$.

Крок 3. За функціями **TrFunc** та **FSM** визначаємо параметричну передавальну функцію $Z_2(s, t)$, яка буде основою для проведення аналізу допусків параметричного балансного модулятора з рис. 1. Для модулятора з рис.1, наведено вираз (3) для параметричної передавальної функції $Z_2(s, t)$.

Крок 4. За символічним виразом (3), який при $k=2$ забезпечує задовільну точність, та функціями **SensFO** та **SensSO** визначаємо функції чутливості $S_m^{|Z_2|}, S_{c_0}^{|Z_2|}$,

$\delta Z_2(t), \%$

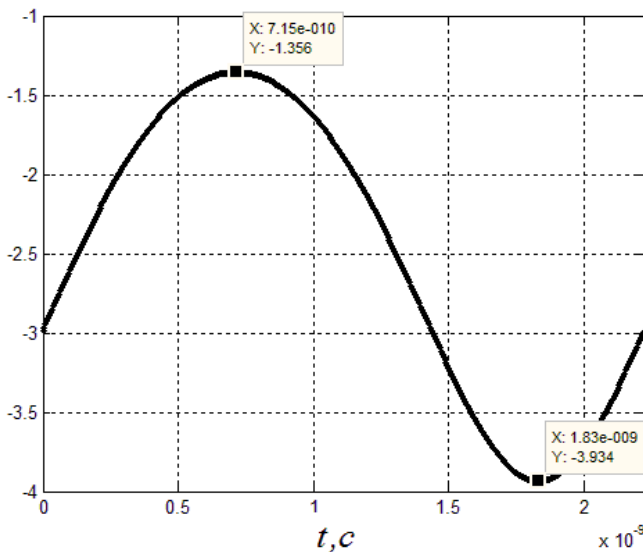


Рис.4. Часова залежність відносного відхилення $\delta|Z_2(t)|$ при відносній зміні параметрів елементів.

$S_{Y_1}^{|Z_2|}, S_{Y_2}^{|Z_2|}, S_{Y_3}^{|Z_2|}, S_L^{|Z_2|}, S_{C_1}^{|Z_2|}, S_{C_2}^{|Z_2|}$ першого та $S_{m,m}^{|Z_2|}, S_{m,c_0}^{|Z_2|}, S_{m,Y_1}^{|Z_2|}, S_{m,Y_2}^{|Z_2|}, S_{m,Y_3}^{|Z_2|}, S_{m,L}^{|Z_2|}, S_{m,C_1}^{|Z_2|}, S_{m,C_2}^{|Z_2|}, S_{c_0,c_0}^{|Z_2|}, S_{c_0,Y_1}^{|Z_2|}, S_{c_0,Y_2}^{|Z_2|}, S_{c_0,Y_3}^{|Z_2|}, S_{c_0,L}^{|Z_2|}, S_{c_0,C_1}^{|Z_2|}, S_{c_0,C_2}^{|Z_2|}, S_{Y_1,Y_1}^{|Z_2|}, S_{Y_1,Y_2}^{|Z_2|}, S_{Y_1,Y_3}^{|Z_2|}, S_{Y_1,L}^{|Z_2|}, S_{Y_1,C_1}^{|Z_2|}, S_{Y_1,C_2}^{|Z_2|}, S_{Y_2,Y_2}^{|Z_2|}, S_{Y_2,Y_3}^{|Z_2|}, S_{Y_2,L}^{|Z_2|}, S_{Y_2,C_1}^{|Z_2|}, S_{Y_2,C_2}^{|Z_2|}, S_{Y_3,Y_3}^{|Z_2|}, S_{Y_3,L}^{|Z_2|}, S_{Y_3,C_1}^{|Z_2|}, S_{Y_3,C_2}^{|Z_2|}, S_{L,L}^{|Z_2|}, S_{L,C_1}^{|Z_2|}, S_{L,C_2}^{|Z_2|}, S_{C_1,C_1}^{|Z_2|}, S_{C_1,C_2}^{|Z_2|}$ другого порядків модуля параметричної передавальної функції $Z_2(s, t)$.

Крок 5. За функціями **RelativeDeviation_FirstOrder**, **RelativeDeviation_SecondTerm**,

RelativeDeviationOfFunction, виразом (5) та функціями чутливості, визначеними на кроці 4, обчислюємо відносне відхилення $\delta|Z_2(t)|$ модуля параметричної передавальної функції $Z_2(t)$ при відносних змінах $\delta m = 7\%, \delta c_0 = 3\%, \delta L = 5\%, \delta Y_1 = 3\%, \delta Y_2 = 3\%, \delta Y_3 = 5\% \delta C_1 = 2\%, \delta C_2 = 5\%$ параметрів елементів модулятора.

Результати експерименту 1. Сформовану за виразом (5) залежність відносного відхилення $\delta|Z_2(t)|$ модуля параметричної передавальної функції $Z_2(t)$ від часу t наведено на рис. 4.

З проведеного обчислювального експерименту витікає, що відносне відхилення $\delta|Z_2(t)|$ модуля параметричної передавальної функції $Z_2(t)$ параметричного балансного модулятора є залежною від часу функцією, тому що сама передавальна функція $Z_2(t)$ є також залежною від часу. З рис.4 витікає, що відносне відхилення модуля передавальної функції $Z_2(t)$ змінюється у межах від -3.9% до 1.36%.

Завдання на експеримент 2. Провести оптимізацію і визначити величини c_0^* та m^* , що забезпечують мінімум функції цілі $F(c_0, m) = F_{min}$, яка сформована у діапазоні частот $\omega_i = 1.5 \cdot \pi \cdot 10^7 : 0.1 \cdot \pi \cdot 10^7 : 2.5 \cdot \pi \cdot 10^7$ рад/с та діапазоні часу $t_j = 0 : 0.02 \cdot 10^{-9} : 2.2222 \cdot 10^{-9}$ для параметричної передавальної функції $Z_2(s, t)$ модулятора з рис.1 при умові його асимптотичної стійкості та фізичній реалізованості параметрів c_0^* та m^* . Фізично реалізованими параметрами c_0^* та m^* вважати параметри, що знаходяться у межах $0 < c_0 < 1n\Phi$ та $0 < m < 1$, відповідно.

Експеримент 2. За процедурою оптимізації, алгоритм якої наведено у розділі 3 дисертаційної роботи, виконуємо наступні кроки:

Крок 1. За функцією **Stability** формуємо знаменник $\Delta_g(c_0, m, s)$ нормальної параметричної передавальної функції $G(s, \xi)$ від струму $I(s)$ у напругу $U_c(s, t)$ для модулятора з рис.1 при символічних значеннях параметрів m , c_0 елементів модулятора та комплексної змінної s . При $k=1$, знаменник $\Delta_g(c_0, m, s)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta_g(c_0, m, s) = & (.25e-93*c0^3*m^2-.51e-93*c0^3)*s^{12}+(.33e-95*c0^2*m^2-.19e-94* \\ & c0^2+.99e-83*c0^3*m^2-.20e-82*c0^3)*s^{11}+(-.60e-84*c0^2-.24e-96*c0+.15e-72* \\ & c0^3*m^2+.99e-85*c0^2*m^2-.29e-72*c0^3)*s^{10}+(.11e-62*c0^3*m^2-.22e-62*c0^3 - \\ & .57e-86*c0+.12e-74*c0^2*m^2-.99e-99-.72e-74*c0^2)*s^9+(-.45e-64*c0^2+.75e- \\ & 65*c0^2*m^2-.54e-76*c0-.10e-52*c0^3-.16e-88+.51e-53*c0^3*m^2)*s^8+(-.33e- \\ & 66*c0+.33e-55*c0^2*m^2-.14e-78-.21e-54*c0^2+.22e-43*c0^3*m^2-.45e-43*c0^3) \\ & *s^7+(.60e-34*c0^3*m^2-.78e-69+.99e-46*c0^2*m^2-.12e-33*c0^3-.69e-45*c0^2-.13e- \\ & 56*c0)*s^6+(-.18e-35*c0^2-.33e-24*c0^3+.22e-36*c0^2*m^2-.29e-59-.39e-47 *c0+.17e- \\ & 24*c0^3*m^2)*s^5+(.39e-27*c0^2*m^2+.26e-15*c0^3*m^2-.81e-50-.36e-26*c0^2-.84e- \\ & 38*c0-.51e-15*c0^3)* s^4+(.42e-6*c0^3*m^2+.30e-18*c0^2*m^2-.13e-28*c0-.17e-40- \\ & .48e-17*c0^2-.84e-6*c0^3)*s^3+(-.11e-19*c0-.24e-31+.30e3*c0^3*m^2-.60e3* c0^3 \\ & +.14e-9*c0^2*m^2-.54e-8*c0^2)*s^2+(-.17e-22+.18e-1*c0^2*m^2-.26e-11*c0+ .11e12 \\ & *c0^3*m^2-.23e12*c0^3-4.5*c0^2)*s-.81e-15-.69e-4*c0-.21e9 *c0^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Функція $G(s, \xi)$ є розв'язком диференціального рівняння (8) при числових параметрах елементів модулятора $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot 4.5 \cdot 10^8$ рад / с, $Y_1 = 0.001C_m$, $Y_2 = 0.01C_m$, $Y_3 = 0.0125C_m$, $L = 65.3 \cdot 10^{-9}$ Гн, $C_1 = 20 \cdot 10^{-12}$ Ф, $C_2 = 1.812 \cdot 10^{-12}$ Ф.

Крок 2. За функцією **Stability** та знаменником $\Delta_g(c_0, m, s)$, визначеним на кроці 1 при $k=2$, для кожного значення c_0 з ряду значень заданого діапазону визначаємо граничне значення $m_{zp} = f(c_0)$, при якому стійкість модулятора змінюється на нестійкість та будуємо «карту стійкості» в координатах параметрів c_0 та m («карта стійкості» наведена у п'ятому розділі дисертаційної роботи).

Крок 3. Результати оцінки асимптотичної стійкості модулятора наступні. Значення усіх дійсних частин коренів полінома $\Delta_g(c_0, m, s)$, для усіх заданих за умовою оптимізації значень c_0 та $m \in$ від'ємні. Це говорить про те, що модулятор асимптотично стійкий у всій заданій області значень $c_0 = 0.4e-12:1.4e-12 \Phi$ та $m = 0.1:0.8$. Тому область стійкості визначається заданою областю значень c_0 та m .

Задану область значень $c_0 = 0.4e-12:1.4e-12 \Phi$ та $m = 0.1:0.05:0.8$ використовуємо при застосуванні функції оптимізації «patternsearch».

Крок 4. За функцією **FormOfFunOfGoal** формуємо функцію мети $M_0(\omega_i, t_j)$. На рис.5 наведено графічний вигляд функції мети $M_0(\omega_i, t_j)$ при заданих значеннях ω_i та t_j : $1.5 \cdot \pi \cdot 10^7 - 2.5 \cdot \pi \cdot 10^7$ рад/с з кроком $0.1 \cdot \pi \cdot 10^7$ рад/с та $0 - 2.2222 \cdot 10^{-9}$ с з кроком $0.02 \cdot 10^{-9}$ с, відповідно.

Крок 5. За функцією **FormOfFunCharacteristic** формуємо функцію характеристики $M_{Z_2}(c_0, m, \omega_i, t_j)$ параметричного балансного модулятора.

Крок 6. За функцією **FormOfObjectiveFun** та виразом (6) формуємо функцію цілі при заданих значеннях ω_i та t_j : $1.5 \cdot \pi \cdot 10^7 - 2.5 \cdot \pi \cdot 10^7$ рад/с з кроком $0.1 \cdot \pi \cdot 10^7$ рад/с та $0 - 2.2222 \cdot 10^{-9}$ с з кроком $0.02 \cdot 10^{-9}$ с, відповідно. На рис.6 наведено графічний вигляд функції цілі $F(c_0, m)$.

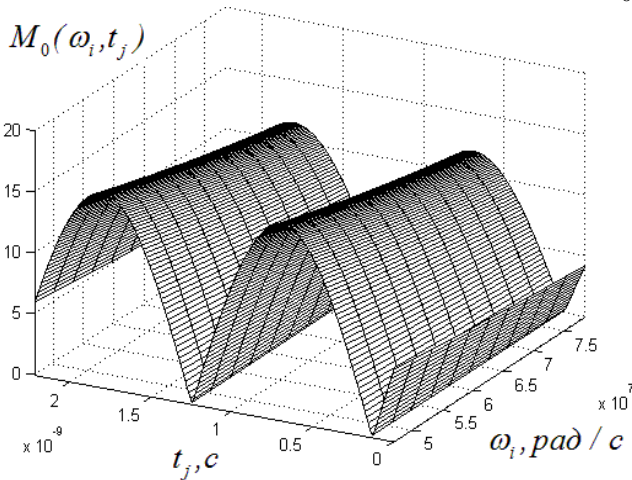


Рис.5. Функція мети $M_0(\omega_i, t_j)$.

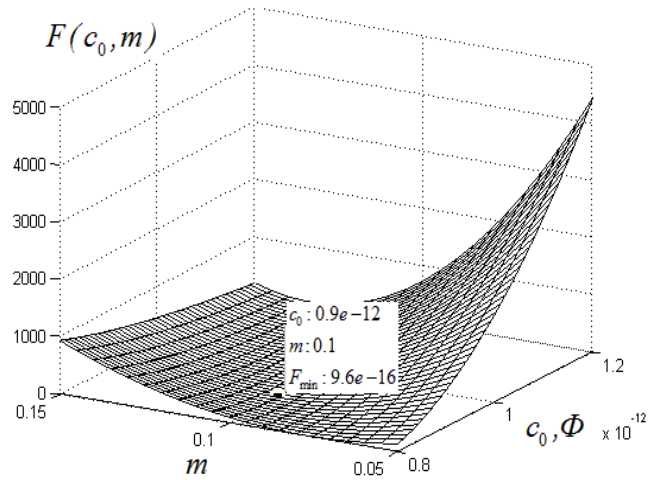


Рис. 6. Функція цілі $F(c_0, m)$.

Крок 7. За функцією «patternsearch» проводимо оптимізацію і визначаємо значення параметрів c_0 та m , що забезпечують мінімум функції цілі $F(c_0, m) = F_{min}$, яка сформована у діапазоні частот $\omega_i = 1.5 \cdot \pi \cdot 10^7 : 0.1 \cdot \pi \cdot 10^7 : 2.5 \cdot \pi \cdot 10^7$ рад/с та діапазоні часу $t_j = 0 : 0.02 \cdot 10^{-9} : 2.2222 \cdot 10^{-9}$ для параметричної передавальної функції $Z_2(s, t)$ параметричного балансного модулятора з рис.1.

Результати експерименту 2. За функцією оптимізації «patternsearch» у заданій значень $c_0 = 0.4e-12:1.4e-12 \Phi$ та $m = 0.1:0.8$ та довільно обраних початкових значеннях $c_0 = 0.95 \cdot 10^{-12} \Phi$, $m = 0.05$ варійованих параметрів за 1606 ітерацій визначено мінімум F_{min} при $c_0^* = 0.9 \cdot 10^{-12} \Phi$ та $m^* = 0.1$, позначений на рис.6 символом \blacksquare .

У п'ятому розділі зроблено висновки про те, що реалізована система функцій MAOPCs може використовуватись за призначенням та дозволяє ефективно обчислювати спряжені параметричні передавальні функції, похідні, функції чутливості першого та другого порядку, візуалізувати результати експериментів, проводити багатоваріантний аналіз та оптимізацію параметричних радіотехнічних вузлів за умови контролю їх асимптотичної стійкості у середовищі MATLAB 7.6.0.

Додатки містять результати оцінки асимптотичної стійкості параметричного балансного модулятора, одно- та двоконтурного параметричних підсилювачів, приведено тексти окремих функцій системи MAOPCs, настанову з використання системи функцій MAOPCs, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу – розвинуто частотний символний метод, розроблено алгоритми багатоваріантного аналізу і оптимізації та застосовано їх до реалізації проектних процедур схемотехнічного проектування параметричних радіотехнічних функціональних вузлів на підставі їх частотних символних моделей.

В дисертаційній роботі отримано такі результати:

1. Запропоновано правила формування диференціальних рівнянь, що описують параметричний радіотехнічний вузол у часовій області, які забезпечують зменшення громіздкості таких рівнянь у 5-30 та більше разів, що дозволяє ефективно проводити подальші обчислення.

2. Запропоновано методику вибору ЧС-моделі кола для розв'язування задач багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів.

3. Досліджено коректність визначення похідних передавальних функцій параметричних радіотехнічних вузлів за апроксимації їх тригонометричними поліномами Фур'є.

4. На основі частотного символного методу розроблено процедури аналізу допусків та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів, які дозволяють скоротити витрати комп'ютерного часу, у порівнянні з числовими, у 100-1000 разів.

5. Розроблено наступні алгоритми:

- алгоритми обчислення параметричних передавальних функцій за ЧС- моделями за методом додаткових незалежних джерел сигналу;
- алгоритм визначення області стійкості;
- алгоритм визначення функцій параметричних радіотехнічних вузлів чутливості;
- алгоритм аналізу допусків параметричних радіотехнічних вузлів у області стійкості;
- алгоритм оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів у області стійкості.

6. На основі розроблених алгоритмів реалізована система функцій MAOPCs у програмному середовищі MATLAB 7.6.0, яка призначена для:

- формування диференціального рівняння відносно зовнішніх змінних у часовій області;
- формування диференціального рівняння Л.А. Заде у частотній області;

- визначення спряжених і нормальних параметричних передавальних функцій у символічному вигляді;
- визначення функцій вихідних змінних (напруг чи струмів), на основі спряжених параметричних передавальних функцій;
- обчислення функцій чутливості першого та другого порядків;
- обчислення відносних відхилень;
- дослідження асимптотичної стійкості при зміні одного або двох параметрів елементів;
- отримання часових залежностей, миттєвих значень параметричних передавальних функцій, функцій вихідних змінних, функцій чутливості, відносних відхилень;
- проведення оптимізації.

7. Підтверджено можливості системи функцій МАОРСs на проведених обчислювальних експериментах з аналізу допусків та оптимізації одно- та двоконтурного параметричних підсилювачів і балансного модулятора. Наведені висновки переконують, що реалізована на основі частотного символічного методу система функцій МАОРСs є ефективним засобом комп'ютерного моделювання та розробки параметричних радіотехнічних функціональних вузлів, принцип роботи яких оснований на зміні параметрів їх елементів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шаповалов Ю. І. Дослідження частотних символічних моделей одноконтурного параметричного підсилювача / Ю. І. Шаповалов, Д. Р. Смаль // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації–2011.–№705.–С.52-58.

2. Шаповалов Ю. І. Застосування частотного символічного методу до багатоваріантного аналізу лінійних параметричних кіл / Ю. І. Шаповалов, Б. А. Мандзій, Д. Р. Смаль // Вісн. НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації – 2012. – №738. – С.10-16.

3. Шаповалов Ю.І. Методи виключення змінних у символічних часових моделях лінійних параметричних кіл та їх вдосконалення/ Ю.І. Шаповалов, Д.Р. Бачик // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. Моделювання та інформаційні технології. - Вип.66. – К. : 2012. – С. 149-160

4. Шаповалов Ю. І. Оптимізація лінійних параметричних кіл за умови контролю їх стійкості / Шаповалов Ю. І., Мандзій Б. А., Бачик Д. Р. // Вісн. НТУУ "КПІ". Радіотехніка. Радіоапаратобудування.- 2013 .-№ 53.- С.50-59.

5. Шаповалов Ю. І. Оптимізація лінійних параметричних кіл за умови контролю їх стійкості/ Шаповалов Ю. І., Мандзій Б. А., Бачик Д. Р. //Міжнародна науково-технічна конференція "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи ": мат. конф., 11–15 березня 2013 р., Київ. – 2013, ст. 33-34.

6. Шаповалов Ю. І Оцінка асимптотичної стійкості лінійних параметричних кіл за допомогою рядів Фур'є / Ю.І. Шаповалов, Д.Р. Смаль // Вісн. НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації – 2010. – №680. – С.18-21

7. Бачик Д.Р. Про адекватність визначення похідних параметричних передавальних функцій, апроксимованих поліномами Фур'є /Д.Р. Бачик //Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України - Вип.67. – К. : 2013. – С. 104-113.

8. Шаповалов Ю. І. Результати оцінки стійкості лінійних параметричних систем трьома методами / Ю. І. Шаповалов, Д. Р. Смаль // Вісн. НТУУ "КПІ". Радіотехніка. Радіоапаратобудування.- 2012 .-№ 49.-52-57.
9. Шаповалов Ю. І. Результати оцінки стійкості лінійних параметричних систем трьома методами / Шаповалов Ю.І., Смаль Д.Р. //Міжнародна науково-технічна конференція "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта)": мат. конф., 22–29 лютого 2012 р., Київ. – 2012, ст. 61-62.
10. Шаповалов Ю.І. Система MAOPCs для багатоваріантного аналізу та оптимізації лінійних параметричних кіл у середовищі MATLAB / Ю.І.Шаповалов, Д.Р.Бачик, С.В.Маньковський // Вісн. НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації – 2013. – №766. – С.28-34.
11. Шаповалов Ю. І. Частотна символна модель двоконтурного параметричного підсилювача / Ю. І. Шаповалов, Д. Р. Смаль // Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. Моделювання та інформаційні технології. – № 62. – К. : 2011. – С. 112-124.
12. Шаповалов Ю. І. Частотний символний метод оцінки асимптотичної стійкості лінійних параметричних кіл / Ю.І. Шаповалов, Б.А. Мандзій, Д.Р. Смаль // Міжнародний науковий журнал "Комп'ютинг". - 2012.-Том 11.- Випуск 2.-С.156-165.
13. Shapovalov Yu. Frequency symbolic models (FSMs) of linear periodically time-variable circuits with the one complex variable/ Yu. Shapovalov, B. Mandziy, D. Smal, N. Melnyk // XIII International Workshop “Computation Problems of Electrical Engineering” (CPEE-2012): Int. conf., September 5-8, 2012, Grybów, Poland.
14. Shapovalov Yu. Frequency symbolic models of linear parametric circuits / Yu. Shapovalov, B. Mandziy, D. Smal, J. Lipinski // XII International Workshop “Computation Problems of Electrical Engineering” (CPEE-2011): Int. conf., September 5-7, 2011, Kostryna, Trans-Carpathian region, Ukraine, p- 9.
15. Shapovalov Yu. Frequency symbolic models of linear parametric circuits / Yu. Shapovalov, B. Mandziy, D. Smal, J. Lipinski //Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2012. – R. 88 NR, № 3a. – P.52–54.
16. Shapovalov Yu.I. Optimization of parametric balanced modulator on frequency symbolic method / Yu.I. Shapovalov, B.A. Mandziy, D.R. Bachyk //Computational Problems of Electrical Engineering. – 2012. – Vol.2, No.2. – P.93–101.
17. Shapovalov Yu. The Application of Frequency Symbolic Method to Multivariate Analysis of Linear Parametric Circuits / Yu. Shapovalov, B. Mandziy, D. Smal // proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012 Lviv – Slavske, Ukraine, February 21–24, 2012, p- 51.
18. Shapovalov Yu. The methods of exclusion of variables in symbolic time models of linear periodically time-variable circuit / Yuriy Shapovalov, Dariya Smal // proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium 2012, Kharkov, Ukraine, September 14-17, 2012, p. 311-314.
19. Shapovalov Yu. The modified frequency symbolic models (FSMs) of linear periodically time-variable circuits / Yu. Shapovalov, B. Mandziy, D. Smal //Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2013. – R. 89 NR, № 2a. – P.288–292.

АНОТАЦІЯ

Бачик Д.Р. Засоби комп'ютерного схемотехнічного моделювання параметричних радіотехнічних вузлів на основі частотного символьного методу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2014.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі розвитку частотного символьного методу, розробленню алгоритмів та застосуванню їх до реалізації проектних процедур схемотехнічного проектування параметричних радіотехнічних вузлів на підставі їх частотних символьних моделей.

У роботі проведено аналіз методів побудови частотних символьних моделей та запропоновано методику вибору частотної моделі кола для розв'язування задач багатоваріантного аналізу та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів. Досліджено вплив зовнішніх змінних на громіздкість подальших обчислень та запропоновано правила формування диференціальних рівнянь, що описують параметричний радіотехнічний функціональний вузол у часовій області.

На основі частотного символьного методу розроблено процедури аналізу допусків та оптимізації параметричних радіотехнічних вузлів за контролю їх асимптотичної стійкості.

Розроблено алгоритми проектних процедур схемотехнічного проектування параметричних радіотехнічних вузлів, які програмно реалізовані у вигляді системи функцій MAOPCs у середовищі MATLAB.

Можливості системи функцій MAOPCs продемонстровано за допомогою обчислювальних експериментів з аналізу допусків та оптимізації одноконтурного та двоконтурного параметричних підсилювачів і балансного модулятора.

Ключові слова: частотний символьний метод, багатоваріантний аналіз, оптимізація, лінійне параметричне коло, асимптотична стійкість.

АННОТАЦИЯ

Бачик Д.Р. Средства компьютерного схемотехнического моделирования параметрических радиотехнических узлов на основе частотного символьного метода. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 - Радиотехнические и телевизионные системы. - Национальный университет "Львовская политехника", Министерство образования и науки Украины, Львов, 2014.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи развития частотного символьного метода, разработке алгоритмов и применению их к реализации проектных процедур схемотехнического проектирования параметрических радиотехнических узлов на основе их частотных символьных моделей.

В работе проведен анализ методов построения частотных символьных моделей и предложена методика выбора частотной модели цепи для решения задач многова-

риантного анализа и оптимизации параметрических радиотехнических узлов. Исследовано влияние внешних переменных на громоздкость дальнейших вычислений и предложены правила формирования дифференциальных уравнений, описывающих параметрический радиотехнический функциональный узел во временной области.

На основе частотного символьного метода разработаны процедуры анализа допусков и оптимизации параметрических радиотехнических узлов при контроле их устойчивости.

Разработаны алгоритмы проектных процедур схемотехнического проектирования параметрических радиотехнических узлов, которые программно реализованы в виде системы функций MAOPCs в среде MATLAB.

Возможности системы функций MAOPCs продемонстрированы с помощью вычислительных экспериментов по анализу допусков и оптимизации одноконтурного и двухконтурного параметрических усилителей и балансного модулятора.

Ключевые слова: частотный символьный метод, многовариантный анализ, оптимизация, линейная параметрическая цепь, асимптотическая устойчивость.

THE SUMMARY

Bachyk D.R. The means of computer circuit engineering modelling of parametric radioengineering nodes based on the frequency symbolic method. – On the manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree in specialty 05.12.17 - Radio and television systems. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2014.

Thesis deals with solve of an important scientific problem of development of the frequency symbolic method, the development of algorithms and the application of their to realization of design procedures of circuit engineering design parametric functional nodes based on their frequency symbolic models.

The paper analyzes the methods of constructing frequency symbolic models and proposed technique of a choice frequency model of circuit for solving problems of multivariate analysis and optimization of parametric functional nodes. Investigated the influence of external variables on the bulkiness of of further calculations and proposed rules of formation of differential equations that describe parametric functional nodes in the time domain.

Based on the frequency symbolic method developed procedures of tolerances analysis and optimization of parametric functional nodes per the control of their stability.

Algorithms are developed of design procedures circuit engineering design and of parametric radio engineering nodes by software them realized as a system of functions MAOPCs in a software environment MATLAB.

Is demonstrated capabilities of the system of functions MAOPCs on carried computational experiments with of tolerances analysis and optimization of single- and double-circuit parametric amplifiers and the balanced modulator.

Keywords: frequency symbolic method, multivariate analysis, optimization, parametric linear circuit, asymptotic stability.

Здано в набір 11.03.2014 р. Підписано до друку 21.03.2014 р.
Формат 60x90 1/16. Зам. №26
Тираж 130 прим. Обсяг 0,9 друк. арк.
Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO
у друкарні ПП «Арк-Сервіс»
79005, м. Львів, вул. Драгоманова, 16