

Міністерство освіти і науки України  
Державний університет «Одеська політехніка»

Інститут штучного інтелекту та робототехніки  
Кафедра комп'ютерних систем

**Нежельський Олег Олегович,**  
студент групи УК-161

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

**Моделі та методи розробки пасивних компонентів комп'ютерних систем**

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія  
Спеціалізація: Спеціалізовані комп'ютерні системи

Керівник:  
Нестерюк Олександр Геннадійович,  
к.т.н

Одеса – 2021

## З М І С Т

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП .....	7
1. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ МОДЕЛІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАСИВНИХ КОМПОНЕНТІВ .....	12
1.1. Пасивні компоненти.....	12
1.2. Структура компонентів.....	13
1.3. Види компонентів .....	15
1.4. Висновок за розділом 1.....	18
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ, МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРОБКИ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ КОМПОНЕНТІВ .....	19
2.1. Основні рівняння електродинаміки, як підґрунтя для розробки моделей композиційних елементів .....	19
2.2. Електродинамічна та ланцюгова модель трансфілдера .....	22
2.3. Методи побудови трансфілдерів n-го порядку .....	26
2.4. Взаємообумовленість напрямів потоків векторів індукції електромагнітного поля реактивних компонентів.....	28
2.5. Висновки за розділом 2 .....	31
3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТРАНСФІЛДЕРІВ.....	32
3.1. Напрями розробки високочастотних енергоощадних компонентів .....	32
3.2. Діелектрична котушка індуктивності .....	33
3.3. Компонентне рівняння сегнетоелектричної котушки .....	37
3.4. Розробка розгалуженого трансфілдера .....	38
3.5. Топологічні трансфілдери .....	41
3.6. Імітатори магнітних потоків .....	43
3.7. Базова модель топологічного імітатора магнітних потоків.....	46
3.8. Формування ТТМ з декількома виходами.....	51

	5
3.9. Макромодель ТТМ_2_1 з декількома входами.....	52
3.10. Висновок за розділом3.....	55
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	58

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ДВЧ - дуже високі частоти - (30...300) МГц.

ЕК – електричне коло.

ЕП – електронний пристрій.

КЕ – композиційний елемент.

КРМ – кваліфікаційна робота магістра.

КС – комп'ютерна система.

МОС – монолітна інтегральна схема.

НВЧ - надвисокі частоти – (3...30) ГГц.

СКС – спеціалізована комп'ютерна система

САПР – система автоматизованого проектування

ТТ - топологічний трансфілдер.

УВЧ - ультрависокі частоти – (0,3...3) ГГц

## ВСТУП

Розробка спеціалізованих комп'ютерних систем (СКС), суперкомп'ютерних комплексів, мобільних безпроводних систем зв'язку та їхніх композиційних елементів (КЕ) являється надзвичайно актуальною проблемою сьогодення. Конкурентна боротьба за пальму першості в цій галузі та величезний попит на цю продукцію призводять до швидких темпів оновлення та вдосконалення елементної бази, тобто базових інформаційних цеглинок, з яких будуються відповідні системи. В гонитві на випередження провідні фірми доводять продуктивність до фантастичних швидкостей. Наприклад, за 55 редакцією списку TOP-500 [36] перше місце займає японський суперкомп'ютер Fugaku, що показав в тесті High Performance Linpack (HPL) результат 415,5 петафлопса, що в 2,8 рази випереджає американську систему IBM Summit, що займає другу позицію. Зауважимо, що в Fugaku використовуються 48-ядерні однокристальні системи Fujitsu A64FX SoC (System-on-Chip) на архітектурі Arm (Advanced RISC Machine). В операціях з одинарною або меншою точністю, які часто використовуються в простих задачах, типу машинне навчання, пікова продуктивність Fugaku перевищує 1 ексафлопс ( $10^{18}$ ) по продуктивності.

Але проблеми подальшого зростання продуктивності наштовхуються на певні межі, що обумовлені розмірами атомів та швидкістю розповсюдження світла, як електромагнітної хвилі.

Окрім того, вже зараз проблеми електромагнітної та теплової сумісності КЕ СКС не дозволяють застосовувати існуючі моделі та методи їх проектування, оскільки останні зорієнтовані на низькочастотну електроніку [11 – 14, 34]. Останнє призводить до суттєвих непродуктивних витрат, оскільки технології виготовлення КЕ радше ґрунтуються на експериментальних дослідженнях, а ніж на зважених теоретично обґрунтованих моделях [37 - 43] високопродуктивних КЕ.

Іншим шляхом підвищення продуктивності може бути розробка енергозаощадливих КЕ.

Тому обрана **тема** кваліфікаційної роботи магістра (КРМ): «Моделі та методи розробки пасивних компонентів комп'ютерних систем», що працюють в стандартизованих діапазонах частот: дуже високочастотного (ДВЧ) {30...300} МГц; ультрависокочастотного (УВЧ) {300...3000} МГц; та надвисокочастотного (НВЧ) {3...30} ГГц, - на сьогодні представляється достатньо актуальною.

**Завданням** кваліфікаційної роботи є аналіз моделей та характеристик пасивних компонентів, моделювання моделей та методів розробки високопродуктивних компонентів та реалізація трансфілдерів.

**Метою** кваліфікаційної роботи є розробка моделей та методів створення пасивних компонентів високочастотних діапазонів СКС.

**Об'єкт** дослідження - процес розробки моделей пасивних композиційних компонентів високопродуктивних СКС.

**Предмет** дослідження - моделей реактивних компонентів високопродуктивних комп'ютерних систем.

Розробка КЕ в зазначених діапазонах частот нашоухується на необхідність використання як зосереджених, так і розподілених у просторі компонентів. Методи аналізу їх електромагнітних процесів [8...15] внаслідок складних поверхонь морфологічної структури не завжди сягають заданої точності. Через що реальні параметри КЕ, що визначаються дескрипторами електромагнітного поля також обчислюються з певними похибками.

Для пасивних реактивних компонентів важливим параметром є їх добротність, як величина, що визначає непродуктивні витрати енергії. І тому дана робота спрямована на усунення протиріччя між вимогами підвищення продуктивності СКС, та зменшення теплових втрат її КЕ, що обмежують зростання швидкодії.

Для часткового усунення цього протиріччя слід застосувати системний метод дослідження як інструмент для глибокого та всебічного занурення в наукову проблему переосмислюючи відомі наукові факти.

До КЕ відносять двох, або багатополюсні пристрої, під якими розуміють інтегральні мікросхеми, цифрової техніки, окремі компоненти різноманітних систем. До таких систем можна віднести СКС, телекомунікації системи, системи управління технологічними процесами; системи інформаційних технологій; технічні навчальні системи, неросистеми природного та штучного інтелекту тощо. До складу цих систем належать пристрої, що реалізують сучасні аналітичні методи аналізу речовин, прилади нано, мікро та макро “бачення” всесвіту тощо. Сучасні технології розробки цих КЕ ґрунтуються на різноманітних фізичних та хімічних явищах. Наприклад, мікропроцесори та мікропроцесорні комплекси, різного роду інтегральні запам’ятовуючі пристрої, контролери, молекулярні та атомарні генератори, лазерні випромінювачі, телевізійні відеокамери, одночасно використовують як фізичні, так і хімічні властивості речовин. Для їх дослідження застосовують наукові теорії з різною аксіоматикою, різними фізичними та математичними моделями. Дійсно, лише прилади аналізу речовин використовують спектрофотометричні, оптико-акустичні, фотоколориметричні, спектроскопічні та лазерні спектроскопічні електрооптичні явища. Якщо ж взяти до уваги, що окрім електрооптичних існують і інші класи аналізаторів, наприклад, іонізаційні, теплові, хроматографічні, то можна уявити спектр різноманітних теорій та технологій розробки КЕ різноманітного призначення.

Аналізуючи технології виготовлення КЕ, слід звернути увагу на те, що вона прогресує від механічної обробки твердих речовин, до технологічних ліній хімічних реакцій речовин, що взаємодіють між собою на рівні орбітальних станів електронів, атомів молекул, до технологій мікросвіту ядерних перетворень, що в своєму розвитку залишають взаємодію на рівні хімічних реакції, далеко позаду. З філософської точки зору дивовижним стає факт припинення, розростання до безмежності множини технологій та

різновидів самих КЕ. Це відбувається за рахунок вимог часу до мікромініатюризації та уніфікації функцій перетворення, наприклад, створення мікропроцесорів на базі неорганічного, або органічного біочипа. Якісний стрибок технологічних процесів відбувається за рахунок переходу до нанотехнологій [1, 2], що дозволяє виготовляти КЕ пошаровим напиленням атомів та молекул з заданими властивостями по наперед запрограмованому алгоритму. Координати точок, в яких відбувається напилення мусять носити просторово-часовий характер. А саме, слід задавати не лише геометричні координати, а і час нанесення речовини для можливого обліку, як теплових та хімічних явищ, що можуть мати місце в процесі напилення.

Перефразовуючи відомий вислів, можна стверджувати, що той, хто володіє нанотехнологіями (на рівні виробничих потужностей, а не на рівні науководослідних експериментів), той володіє всесвітом. Безумовно наступний технологічний стрибок пов'язаний з використанням ядерних технологій, використання фізичних проявів слабких та сильних взаємодій в межах ядра. Але, сьогодні свідчить про те, що певним рівням технологій, мусять відповідати певні рівні психологічного та морального стану суспільства, за для продовження його ж існування. Саме системність вимагає паралельне дослідження сумісності біологічних об'єктів з технологічними принципами, що забезпечують існування людини в злагоді з існуючим середовищем.

Таким чином, з визначення об'єкту дослідження, впливають і методи що закладені в його основі. Зокрема, це системний метод аналізу, що використовує різноманітні фізичні явища, які описують КЕ, як складну систему. Для розробки математичних моделей були використані відомості з різних дисциплін: теорії математичної фізики для розв'язання крайових задач; теорії матриць для опису математичної моделі; теорії електромагнітного поля та інтегральних рівнянь для обчислення параметрів КЕ, теорії системотехніки та структуризації матеріальних об'єктів тощо.



Переконавшись в необхідності використання системних методів аналізу при виконанні кваліфікаційної роботи перейдемо до конкретики.

Робота містить 3 розділи.

В **першому розділі** аналізуються стан існуючої проблеми, що висвітлює існуючий рівень математичного моделювання та технологічних процедур розробки пасивних КЕ КСК. Вибирається напрям подальшого дослідження та розробки пасивних КЕ.

В **другому розділі** розробляються моделі та методи створення пасивних високочастотних КЕ СКС. Пропонуються низка компонентів, розробка яких ґрунтується на застосування струму зсуву, як замітника струму провідності.

В **розділі 3** будуються схеми заміщення та виконується імітаційно - комп'ютерний експеримент по моделюванню функцій запропонованих конструкцій пасивних реактивних КЕ СКС.

В кваліфікаційній роботі на відміну від традиційно-класичних підходів серйозну увагу приділено проблемі моделювання внутрішніх електромагнітних перешкод на робочі характеристики КЕ. Запропоновані конструкції якісно відрізняються від своїх прототипів принаймні вже тим, що дозволяють суттєво зменшити енергетичні витрати та просунути застосування пасивних КЕ в високочастотні діапазони.

Розроблені ескізні конструкції КЕ дозволяють поліпшити якість, точність, надійність з одночасним заощадженням енергетичних ресурсів.

# 1. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ МОДЕЛІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАСИВНИХ КОМПОНЕНТІВ

## 1.1. Пасивні компоненти

Розглянемо пасивні види КЕ СКС, тобто такі, що не містять джерел електроенергії у своїй внутрішній структурі. КЕ, що має  $m$  полюсів (ніжок, виводів), зображають у вигляді, рис. 1.1. В подальшому найпростіші КЕ що складаються з неподільних багатополіусників будемо називати компонентом. Пасивний  $m$ -поліусний компонент характеризується відсутністю струмів ( $i_1...i_m$ ) на його полюсах та напруг ( $u_1...u_m$ ) між його полюсами

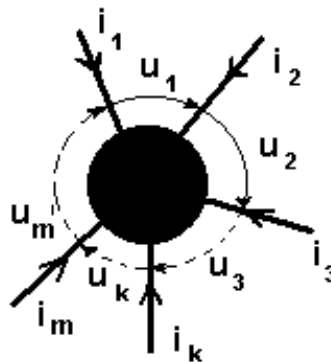


Рисунок 1.1 – Умовне зображення компонента.

Зосереджені компоненти та компоненти з розподіленими структурами виконують інформаційне опрацювання даних СКС. До компонентів відносять прилади, що займають зосереджені об'єми, в яких виконується перетворення енергії одного виду в інший, наприклад, омичний резистор перетворює струм в тепло, індуктивність – струм в магнітне поле, ємність – напругу в електричне поле, тощо. Перетворення енергії з одного виду в інший можуть бути зворотними. В залежності від типу перетворення для компонента зі зворотним перетворенням введено термін «реактивний», для незворотних – вживають терміни: активний; омичний; резистивний; гальванічний. Кількість

різноманітних багатополюсних компонентів з індивідуальними характеристиками (номіналами) нараховується сотнями тисяч [8, 15, 20, 21, 33, 39, 40]. Із застосуванням новітніх технологій компоненти різняться не лише номіналами, але і внутрішніми природничими явищами. Спектр процесів таких явищ надзвичайно різноманітний: телепортація фотонів; біологічні; електрохімічні; фізичні процеси та їх комбінації, [41]. З цих причин виникла потреба в розробці таких феноменологічних моделей, що допускають індиферентну по відношенню до компонентних рівнянь (2.4) алгоритмізацію методів їх аналізу та синтезу.

В підрозділі розглянуто основні визначення предмету дослідження - пасивні компоненти. Приводяться уточнюючі характеристики, що відрізняють їх від активних компонентів тобто таких, що містять джерела, або споживачі електричної енергії. Звертається увага на технології їх виготовлення та необхідності розробки уніфікованих математичних моделей їх опису, незважаючи на значну кількість їх фізичних параметрів

## 1.2. Структура компонентів

Аналіз компонентної бази СКС дозволяє стверджувати, що сучасному стану відповідає багаторівнева структура різноманітних технологічних процесів, що використовуються одночасно для формування функціональних характеристик конкретних електронних пристроїв (ЕП). Кожному рівню структури відповідає своя технологія, а разом з тим і фізичні та математичні моделі. В рамках певної технології процес аналізу та синтезу об'єкту проектування відносно замкнутий «сам на себе» і слабо корельований з іншими технологічними прошарками. Складність сучасних структур компонентів змушує фахівців використовувати багаторівневе (матрьошичне), ієрархічне їх уявлення. Останнє проводиться на рівні декомпозиції (розбиття) складних структур на більш прості складові. На кожному з таких рівнів мають справу з ідеалізованою, спрощеною моделлю. Наприклад, апаратура

персонального комп'ютера на одному рівні може бути представлена сукупністю таких компонентів, як «системна плата», «монітор», «рознімання (слоти, порти вводу/виведення)», «накопичувачі на твердих магнітних дисках», «клавіатура», з'єднаних певним чином, на іншому рівні це – як набір електричних кіл, що складаються з діодів, транзисторів, резисторів, інших електронних компонентів. В першому випадку структура досить нескладна, але з неї насправді досить важко зрозуміти, як, скажімо, відбувається виконання команди додавання всередині процесора, або генерація тактових імпульсів. В другому випадку ми маємо справу з мільйонами електронних компонентів, але таке «збільшення» навряд чи додасть простоти в вирішення питання про те, як з'єднати між собою монітор і відео плату. Тому вибір абстракцій під адекватний зміст завдання, що розв'язується [42, 43] є надзвичайно важливий. В першу чергу це стосується процесу створення компонентів. Чітке визначення та розмежування окремих інформаційних структур та систем дає можливість багаторазового використання добре зарекомендованих розв'язків. Це стосується, наприклад, різних втілень однієї і тієї ж архітектури, що було б неможливо, якби СКС створювалась без чіткої ієрархізації, виділення та відокремлення самого поняття «архітектура» від внутрішньої організації та її конкретної реалізації. Багаторівнева структура КЕ дає значне прискорення процесу проектування за рахунок можливості не починати щоразу процес спочатку, замикаючи проект на собі. Без складання бібліотек вдалих рішень на певних ієрархічних щаблях створення індивідуалізованих компонентів з «нуля» взагалі втрачає економічну доцільність. Іншими словами «монолітне» проектування на одному подиху можливо і дозволить отримати кращі характеристики, а ніж за стандартизованими блоками, але цю можливість доводиться розмінювати на складність самого проектування й обмеження життєвого циклу КС в цілому [44, 45].

Таки чином, в підрозділі розглянуті два шляхи створення КЕ СКС. Перший – з нуля до готового виробу, другий – з застосуванням декомпозиції

КЕ на елементарні складові з наперед відомими математичними описом їх математичної моделі та технологіями розробки. Аналізуються недоліки та переваги зазначених підходів.

### 1.3. Види компонентів

Вибираючи другий спосіб (п.1.2) розробки КЕ на основі принципу декомпозиції, обмежимося компонентами електродинамічного типу. Фізичні процеси таких КЕ моделюються на основі теорії електромагнітного поля. Поділ ЕК на зосереджені та розподілені (комунікатор) КЕ ілюструє рис. 1.2, де також представлена елементна база пакетів прикладних програм аналізу, синтезу та комп'ютерної імітації ЕК. Зауважимо, що на рис. 1.2 представлені лише окремі компоненти, що входять до наступних класів.

Analog Primitives та Analog Library – аналогові компоненти, що містять наступні підмножини компонентів: пасивні, активні, джерельні, макроси, схеми нижчого рівня (підсхеми), поєднувачі, мікросхеми спеціалізованого призначення, ключі та контактні елементи, багатополіусники, що описуються S-параметрами. Кожна підмножина містить елементарні компоненти та їх відповідні моделі.

Так, наприклад, до пасивних (Passive Components) компонентів відносять резистор R, ємність C, індуктивність L, діод D, довгу лінію TLine, лінійний трансформатор, коефіцієнт взаємоіндукції (осердя) K, двобічний обмежувач напруги (зенер) D тощо. До активних (Active Devices) компонентів відносять транзистори та операційні підсилювачі з різною кількістю поліусів.

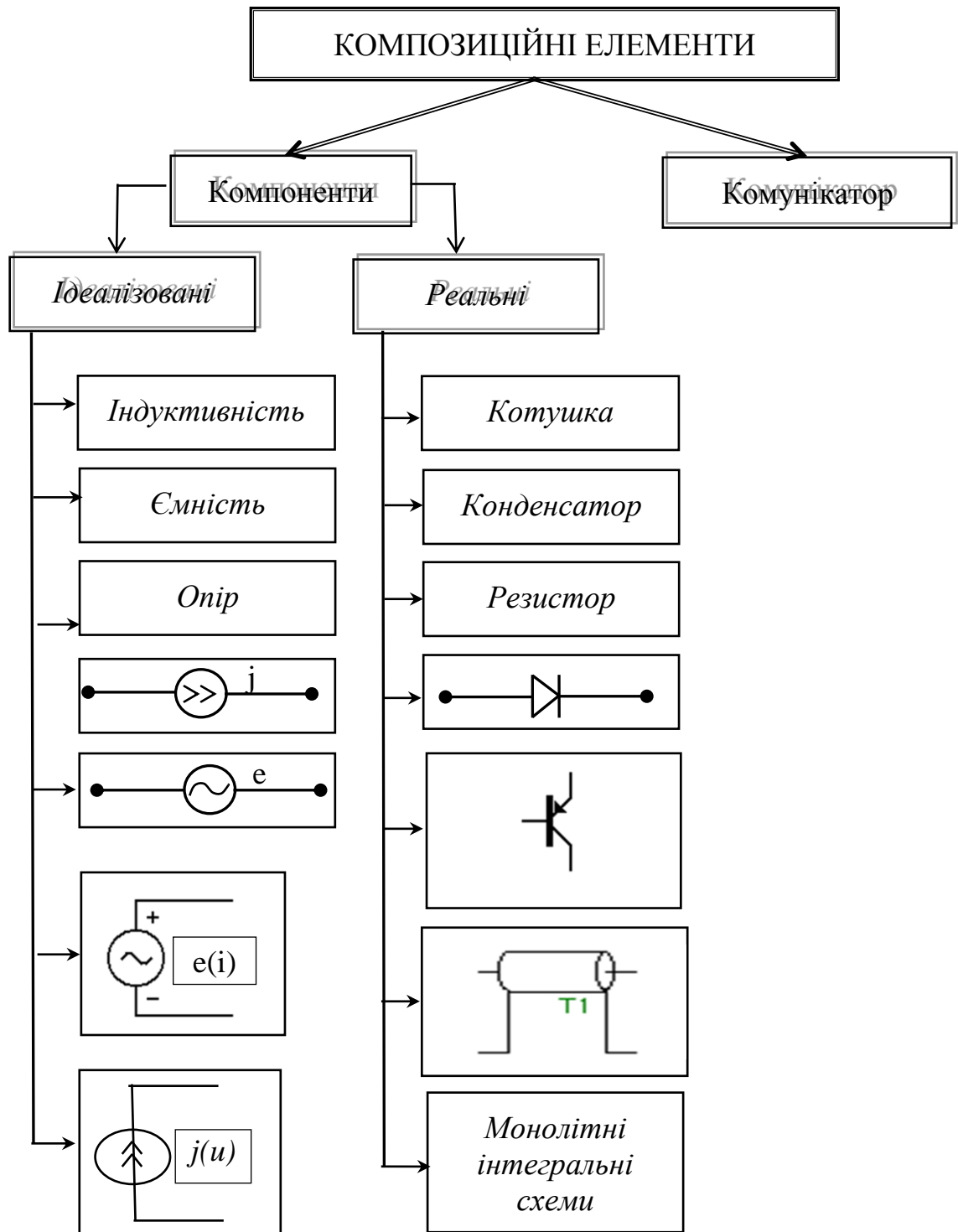


Рисунок 1.2 – Електричне коло, як сукупність композиційних компонентів.

Джерельні (Waveform Sources, Function Sources, Laplace Sources, Z Transform Sources та Dependent Sources ) компоненти це – залежні та незалежні джерела постійного, експосинусоїдного струму чи напруги, або такі, форму яких можна задавати таблоїдними та формульними моделями.

Digital Primitives та Digital Library - містить цифрові елементарні мікросхеми, що виконують різноманітні функції, в тому числі цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворення. Цифрові мікросхеми виконують як прості логічні операції: кон'юнкції, диз'юнкції, заперечення, – так і складні: суматори (лічильники), шифратори, дешифратори, функції різноманітних цифрових автоматів, в тому числі тригерів, мультиплексорів, цифрових генераторів тощо.

Animation – це клас різноманітних ключів, контактних (контрольних) точок та семисегментних рідинно-кристалічних цифрових індикаторів тощо.

При введенні компонента задаються три різні за своїм призначенням відомості: тип компонента, його параметри (а при необхідності і тип корпусу та футпринти) та місце розташування в електричній схемі. Слід мати на увазі, що для аналогових компонентів кількість параметрів може сягати декілька десятків. Наприклад, лінійний резистор  $R$ , що входить до схеми мусить бути описаний наступними параметрами: тип, номер у схемі, вхідний та вихідний вузол, до якого він приєднується, значення опору, максимальна потужність, температурні коефіцієнти, точність виготовлення, тип корпусу (його розміри), форма його графічного зображення на схемі (Європейська, Азійська чи Американська) тощо.

З розвитком нових технологій кількість компонентів та їх номенклатура безперервно зростає. З'являються нанотехнологічні монолітні інтегральні схеми та інші компоненти, що мають якісно кращі характеристики по відношенню до своїх попередників. Саме розробці такого типу компонентів присвячено другий розділ КРМ.

В підрозділі проаналізовано способи вибору КЕ СКС в процесі їх моделювання. Та незважаючи на великий обсяг параметрів по кожному типу компонентів пропонується виконувати їх оптимальний вибір для досягнення заданих характеристик СКС. Формулюючи критерії оптимізації вибору компонентів слід пам'ятати про можливість розробки нових видів або шляхів вдосконалення існуючих видів компонентів за для підвищення

продуктивності, інформаційної захищеності, потенційної вразливості та енергетичної заощадливості СКС.

#### 1.4. Висновок за розділом 1

В першому розділі розглянуто основні визначення предмету дослідження - пасивні компоненти. Приводяться уточнюючі характеристики, що відрізняють їх від активних компонентів тобто таких, що містять джерела, або споживачі електричної енергії. Звертається увага на технології виготовлення та необхідності розробки уніфікованих математичних моделей КЕ, незважаючи на значну кількість їх фізичних параметрів

Проаналізовані шляхи створення КЕ СКС. Перший – з нуля до готового виробу, другий – з застосуванням декомпозиції КЕ на елементарні складові з наперед відомими математичними описом їх математичної моделі та технологіями розробки. Аналізуються недоліки та переваги зазначених підходів.

Розглянуті бази даних компонентів різноманітних САПР та проаналізовано способи вибору КЕ СКС в процесі їх моделювання. Незважаючи на великий обсяг параметрів по кожному типу компонентів пропонується виконувати їх оптимальний вибір для досягнення заданих характеристик СКС. Формулюючи критерії оптимізації вибору компонентів слід пам'ятати про можливість розробки нових видів або шляхів вдосконалення існуючих видів компонентів за для підвищення продуктивності, інформаційної захищеності, потенційної вразливості та енергетичної заощадливості СКС. Деталізація цих вимог та шляхи їх досягнення частково висвітлюються в наступному розділі.



## 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ, МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРОБКИ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ КОМПОНЕНТІВ

### 2.1. Основні рівняння електродинаміки, як підґрунтя для розробки моделей композиційних елементів

В класичній теорії ЕК їх компоненти моделювались виключно топологічною структурою, що немає геометричних розмірів [9 - 13]. А провідники, що поєднували ці компоненти (комунікатор) вважалися ідеальними, тобто мали нульові розміри та нульовий опір і не випромінювали електромагнітних хвиль. Тобто, провідник не перетворював електричну енергію в теплову. Сучасні тенденції до мікромініатюризації та нонатехнологічної уніфікації розробки КЗ [39], диктують необхідність відмовитися від такої моделі та перейти до електродинамічної моделі його функціонування. Для визначення необхідності переходу до більш адекватних моделей зробимо екскурс в історію розвитку технологій та моделей КЕ, що визначають точки біфуркації шляхів електродинаміки та теорії електричних ланцюгів.

Перші теоретичні розробки та моделі розрізнених електромагнітних явищ слідували у фарватері експериментальних досліджень і почалися з відкриття законів електротехніки та електромагнітного поля стовпами світової науки:

1. 1827р. - Георг Ом (німецький фізик) автор закону Ома
- 2.

$$i = \frac{u}{r} \quad (2.1)$$

де  $i$  – струм, що тече через резистор  $r$  внаслідок прикладення до нього напруги  $u$ :

3. 1831 р. - Майкл Фарадей (англійський дослідник) автор закону електромагнітної індукції

$$u = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

де  $u$  – напруга, що виникає на котушці індуктивності осереддя якої пронизує магнітний потік  $\Phi$ ;

4. 1847р. - Густав Кірхгоф (німецький фізик) автор першого

$$\sum_k i_k = 0 \quad (2.3)$$

та другого рівняння (законів) Кірхгофа

$$\sum_k u_k = 0 \quad (2.4)$$

де  $i_k, u_k$  - відповідно  $k$ -і струм вузла; та  $k$ -а напруга замкнутого контуру. До складу алгебраїчних сум входять усі струми, що сходяться в будь-якому вузлу та відповідно усі напруги будь-якого контуру;

5. 1873р. - Джеймс Максвел (професор, Кембріджського університету, англійський вчений, усю сукупність електромагнітних явищ описав чотирма диференціальними

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad \operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (2.6)$$

де,  $\vec{H}, \vec{B}$  – вектори напруженості і відповідно індукції магнітного поля,  $\vec{E}, \vec{D}$  - вектори напруженості і відповідно індукції електричного поля,  $\vec{j}$  – вектор

густини струму,  $\rho$  - густина заряду та трьома матеріальними рівняннями, [12...14]

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E}; \quad \bar{B} = \mu \bar{H}; \quad \bar{j} = \sigma \bar{E} \quad (2.7)$$

де  $\varepsilon$ ,  $\mu$  - діелектрична та магнітна проникність речовини;  $\sigma$  - питомий опір речовини. Усі співвідношення справедливі у кожній точці простору в будь-який момент часу, внаслідок чого рівняння отримали назву диференціальних рівнянь.

6. 1895р - О.С. Попов (винахідник радіоприймача, але цей винахід не було зареєстровано офіційно. Патент та свідоцтво на винахід отримав італійський вчений Марконі в 1897р.).

7. Слід також зауважити що теоретичні принципи бездротового зв'язку були розроблені в 1901р українським вченим Добровольським, ще до дослідів О.С. Попова. Його роботи ІV імперським управлінням Росії вважались абсурдними і всерйоз не сприймалися.

Рівняння (2.7) називають матеріальними<sup>1</sup> так як електромагнітні явища середовища характеризуються його параметрами  $\varepsilon$ ,  $\mu$  та  $\sigma$ . В той же час рівняння (2.5), (2.6) дістали назву польових, так як вони описують поле простору в кожній його точці. Для успішного розв'язання задач аналізу ці рівняння доповнюються граничними та початковими умовами [19-22]. Рівняння (2.1)...(2.4) головним чином описують процеси, що мають місце в електричних колах, тому частіше за все їх називають рівняннями електричних ланцюгів (кіл).

Ці базові рівняння закладені в основу розробки нових моделей та нових компонентів, принцип дії яких заснований на використанні струмів зсуву як

---

<sup>1</sup> Більш влучним терміном слід вважати не «матеріальні», а речовинні, або параметрами середовища, оскільки, в протилежному випадку, слід допустити існування нематеріальних параметрів, що викликає певний когнітивний дисонанс (зауваження керівника КРМ)

замінника струму провідності при створенні реактивних компонентів, що дістали назву трансфілдери, про які йдеться в наступному підрозділі.

В підрозділі розглянуті еволюційні шляхи розвитку математичних моделей компонентів КЕ СКС. Останнє дозволило визначити точки об'єднання та розгалуження ланцюгового та електродинамічного моделювання елементної бази та КЕ. Недостатньо коректні низькочастотні моделі гальмують зростання продуктивності та задоволення вимоги спеціалізації комп'ютерних систем. Зокрема відмова від застосування пасивних індуктивних компонентів, та їх моделювання підсилювальними каскадами зі зворотнім частотозалежним зв'язком вимагає додаткових енергозатрат. Такого роду обмеження пропонується частково усунути шляхом розробки компонентної бази на основі заміни струму провідності струмом зсуву, що стало предметом подальшого дослідження даної КРМ.

## 2.2. Електродинамічна та ланцюгова модель трансфілдера

Розробка реактивних компонентів, як перетворювачів потоків векторів індукції електромагнітного поля, ґрунтується на перетворенні струму провідності вільних зарядів у металевих провідниках в потоки вектора магнітної індукції в осердях індуктивних елементів та (або) в потоки вектора електричної індукції між металевими обкладинками конденсаторів.

В існуючих видах реактивних компонентів трансформація електричної енергії струму провідності (активної енергії) в реактивну енергію потоків векторів індукції здійснюється шляхом конструктивної деформації металевих провідникових дротів. Наприклад, трансформація будь-якої точки провідника в паралельні провідникові безконтактні пластини породжує між ними просторове електричне поле, а трансформація лінійного провідника у витки котушки породжує просторове магнітне поле. Володіючи певними інерційними у часі властивостями їх просторові поля забезпечують безперервність у часі струмів індуктивностей та напруг ємностей, що формулюються в теорії електричних кіл як «закони комутації».

В ємнісному елементі, при прикладенні до нього змінної напруги, відбувається накопичення зарядів на пластинах конденсатора, які, як джерело електричного поля, викликають зміну потоку вектора електричної індукції у часі, що еквівалентно густині струму зсуву. Такий струм існує між пластинами у вигляді змінного електричного поля.

Для створення магнітного потоку провід намотують у вигляді котушки, всередину якої для підсилення магнітного потоку вставляють осердя з достатньо великою магнітною проникністю, в ідеалі  $\mu \rightarrow \infty$ .

Для створення потоку вектора електричної індукції, кінці розтину лінійного провідника виготовляють у вигляді металевих пластин, між якими розташовують ізоляційні матеріали – діелектрики з достатньо високими значеннями діелектричної проникності, в ідеалі  $\varepsilon \rightarrow \infty$ . Спосіб реалізації розглянутих видів реактивних компонентів ґрунтується на взаємному перетворенні інтегральних потоків векторів магнітного та електричного полів, внаслідок чого такі пристрої доцільно назвати трансфілдерами, або конфілдерами (від англ. field transformer, або відповідно field converter перетворювач поля) потоків векторів індукції електромагнітного поля. Основу обґрунтування способів їх реалізації складає теоретична та прикладна електродинаміка і теорія електричних кіл.

Перш за все, виокремимо трансфілдер, як компонент, що здатний накопичувати та віддавати реактивну енергію. До множини компонентів такого роду належать реактивні багатополіусники. Найпростішим реактивними компонентами є двополіусний трансфілдер, зокрема котушка індуктивності або конденсатор, що характеризуються своїми параметрами, зокрема, індуктивністю  $L$  та відповідно ємністю  $C$ .

У рамках електродинамічної моделі індуктивність  $L$  являє собою коефіцієнт пропорційності між потоком  $\Phi(t)$  вектора магнітної індукції та джерелом цього магнітного потоку – струмом  $i(t)$  котушки індуктивності. Аналогічно, ємність  $C$  – коефіцієнт пропорційності між потоком  $N(t)$  вектора

електричної індукції між пластинами конденсатора та джерелом цього потоку – напругою  $u(t)$ , що прикладена до цих пластин

$$\Phi(t) = Li(t); \quad N(t) = Cu(t). \quad (2.8)$$

Потоки (2.8) через осердя котушки та між пластинами обчислюються відповідно до морфологічних властивостей котушки та конденсатора як

$$\Phi(t) = \int_{S_k} \bar{B} d\bar{s}; \quad N(t) = \int_{S_p} \bar{D} d\bar{s} \quad (2.9)$$

де  $\bar{B}, \bar{D}$  – вектори магнітної та електричної індукцій, відповідно в площині осердя котушки  $S_k$  та однієї з пластин конденсатора  $S_p$ .

З іншого боку, в моделях теорії електричних кіл взаємозв'язок між струмом  $i(t)$  та напругою  $u(t)$  на ідеалізованих реактивних компонентах індуктивності та ємності [9], [18], [39] записують у вигляді інтегральних та диференціальних співвідношень:

$$u = L * \frac{di}{dt}; \quad i = \frac{1}{L} * \int_{-\infty}^t u dt = i(0) + \frac{1}{L} * \int_0^t u dt, \quad (2.10)$$

$$i = C \frac{du}{dt}; \quad u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt. \quad (2.11)$$

Взаємозв'язок між моделями (2.8), (2.9) та (2.10), (2.11) визначається на основі співвідношень електродинаміки [34, 51]

$$u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}; \quad i(t) = \frac{dN(t)}{dt}. \quad (2.12)$$

Фізичні процеси багатополюсних трансфілдерів (трансформаторів та інших реактивних багатополюсників) відрізняються лише тим, що потоки векторів індукції (2.9) відгалужуючись їх концентраторами (в ідеалі з  $\varepsilon \rightarrow \infty$  та  $\mu \rightarrow \infty$ ), направляються в інші котушки та місця накопичувачів заряду для перетворення останніх відповідно в напругу та струм (2.12). За допомогою лише двох типів реактивних ідеалізованих компонентів, згідно з [33, 34], можна моделювати частотні характеристики різноманітних багатополюсників КЕ СКС. При цьому для розробки складної форми характеристики потрібна значна кількість таких компонентів, що безумовно не завжди доцільно. Виникає питання, а чи не можна за базовий компонент використати такий, що використовує одночасно як магнітні, так і електричні властивості електромагнітного поля. Іншими словами, а чи неможна побудувати компонент як аналог ЕК другого порядку, тобто комбінаційні властивості ємнісного та індуктивного компонентів поєднати в одному конструктивно закінченому елементі? Нагадаємо, що порядок дорівнює кількості реактивних компонентів, які незалежно накопичують енергію. Його величина збігається з порядком диференційного рівняння, що складається відносно будь-якого дескриптора ЕК. Принципово такі компоненти існують у вигляді розподілених відрізків довгих ліній, резонаторів, але їх властивості змінюються зі зміною розмірів лінії та довжини хвилі, що випромінюється струмом та зарядами (напругою). Іншими словами індуктивність та ємність змінюються не лише зі зміною їх геометричних розмірів, а додатково являються частото залежними величинами.

У даному випадку формулювання задачі носить більш узагальнюючий характер: розробити конструкцію реактивного компонента, що володів би властивостями різнохарактерних реактивних опорів у широкому діапазоні частот, або взагалі їх реактивні параметри не повинні залежати від частоти джерел струму, або напруги.

В підрозділі розроблена ланцюгова та електродинамічна математична модель трансфілдера та сформульовані можливі варіанти його реалізації.

### 2.3. Методи побудови трансфілдерів $n$ -го порядку

Розглянемо методологію побудови трансфілдерів другого порядку.

В загальному випадку фізичні процеси, що відбуваються в трансфілдері можна описати у вигляді послідовності перетворень, рис. 2.1, де можливі варіанти трансформації потоків індукції залежать від порядку  $n$  трансфілдера  $T_{xy}^n$ .

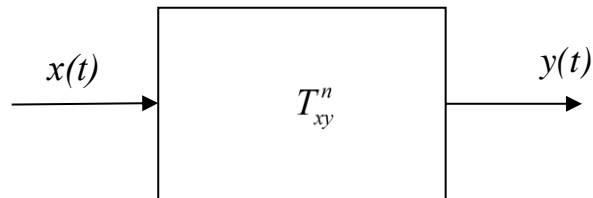


Рисунок 2.1 – Перетворення фізичних величин.

Порядок трансфілдера  $n$ , як і порядок будь-якого електричного кола, визначається кількістю різнотипних потоків ( $\Phi$  або  $N$ ) індукції, що перетворюються один в одного в процесі формування реакції  $y(t)$  на збурення  $x(t)$ , табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Порядок трансфілдера

Збурення $x(t)$	Реакція $y(t)$	
	$u(t)$	$i(t)$
$i(t)$	$\Phi(t); n=1$	$\Phi(t) \rightarrow N(t); n=2$
$u(t)$	$N(t) \rightarrow \Phi(t); n=2$	$N(t); n=1$

Слід мати на увазі, що в табл. 2.1 наведені перетворювачі потоків, що мають порядок  $n \leq 2$ . При  $n=3$  можливі наступні ланцюжки перетворень  $\Phi \rightarrow N \rightarrow \Phi^1$  або  $N \rightarrow \Phi \rightarrow N^1$ . Зрозуміло, що в такий спосіб можна



конструювати трансфілдери і більш високого порядку. Структурні схеми взаємоперетворень потоків у відповідності з рис. 2.1 представлені на рис. 2.2 та рис. 2.3 що ілюструють можливі способи розробки трансфілдерів як першого, рис. 2.2, так і вищого порядків, рис. 2.3.



Рисунок 2.2 – Структурні схеми трансфілдера першого порядку

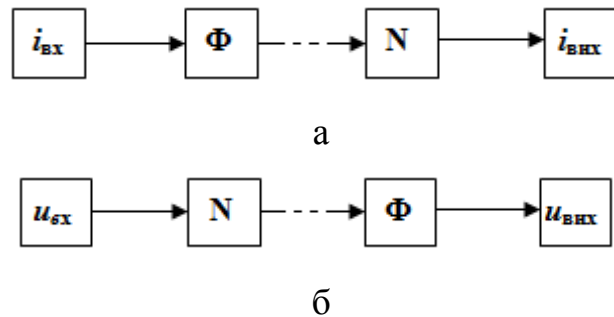


Рисунок 2.3 – Структурні схеми трансфілдера вищого порядку.

Запропонована класифікація перетворень включає, як існуючі типи реактивних компонентів: котушки індуктивностей, та трансформатори, так і нові компоненти, частина з яких може стати предметом винаходу. Комбінації ланцюгових перетворень, типу рис. 2.2, рис. 2.3, та подання їх у вигляді паралельно-послідовних, чи зіркових з'єднань, ілюструє нові шляхи розробки багатополюсних реактивних компонентів.

Можна очікувати, що експлуатаційні та технічні характеристиками таких трансфілдерів у порівнянні з класичними котушками індуктивності, конденсаторами та різного роду трансформаторами знайдуть своє місце не лише в технологіях створення високочастотних компонентів КС, а і приладів відновлювальної енергетики, вимірювальної техніки, електротехніки та мікроелектроніці.

Деталізуючи шляхи розробки трансфілдерів зауважимо, що вхідні величини (напруги  $u$  та струми  $i$ ), рис. 2.2, рис. 2.3, в залежності від виду джерела та навантаження, також визначаються операціями [35] (потік, циркуляція) над векторами

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E}; \quad \bar{J} = \sigma \bar{E}; \quad \bar{B} = \mu \bar{H} \quad (2.13)$$

де  $\bar{E}, \bar{H}$  – вектори напруженості електромагнітного поля у середовищі з речовинними (матеріальними) параметрами:  $\mu$  – абсолютна магнітна проникність;  $\varepsilon$  – абсолютна діелектрична проникність;  $\sigma$  – питома електропровідність опору. Матеріальні рівняння (2.13) в навантаженні та генераторі не мають відношення до внутрішніх процесів, перетворень потоків за схемами, рис. 2.2, рис. 2.3, і тому в подальшому не деталізуються. Разом з тим слід відзначити, що для реалізації конструкцій, структурою рис. 2.2а та рис. 2.3а збурення мусить бути джерелом струму, а – для рис. 2.2б та рис. 2.3б – джерелом напруги. На практиці це означає, що модуль внутрішнього опору джерела електроенергії мусить бути набагато більшими за вхідний опір трансфілдера для схем (а) і навпаки – набагато менший для схем типу (б).

Таким чином, в підрозділі представлена узагальнена структура математичної моделі трансфілдера довільного порядку та проілюстрована можливість її реалізації шляхом ланцюгового перетворення потоків індукції електромагнітного поля за довільною наперед заданою топологічною схемою.

#### 2.4. Взаємообумовленість напрямів потоків векторів індукції електромагнітного поля реактивних компонентів

Фізичні процеси перетворення потоків через певні поверхні трансфілдерів, визначаються диференційними рівняннями Максвела [46]

$$\operatorname{rot}\bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial\bar{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot}\bar{E} = -\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}, \quad (2.14)$$

тобто змінне у часі магнітне поле в кожній точці будь-якого середовища породжує електричне поле і навпаки. Взаємозв'язок та взаємна орієнтація інтегральних потоків  $\Phi$  та  $N$ , рис. 2.4, через поверхні ненульової площі з векторами напруженості електромагнітного поля в окремих точках можна визначити задавшись конкретною конструкцією трансфілдера.

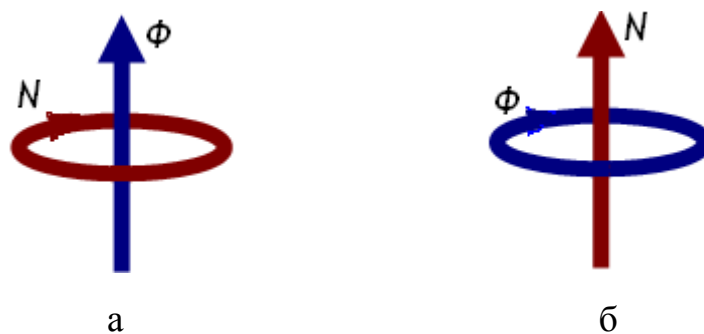


Рисунок 2.4 – Орієнтація електричного  $N$  та магнітного  $\Phi$  потоків:

а – джерельним є магнітний потік; б – джерельним є електричний потік

Наприклад, розглянемо рівномірно розподілене магнітне поле всередині котушки індуктивності діаметра  $\emptyset$ , рис. 2.5.

Нехай вектори магнітної індукції в точках «а» та «б» спрямовані в площину рисунка. У площині, ортогональній до вісі симетрії котушки, формуються вихорні електричні поля, відповідно  $D_a$  та  $D_b$ . Силві лінії електричного поля матимуть вигляд концентричних кіл, центрами яких є точки «а» та «б». Дотичні до них вектори електричного поля взаємокомпенсуються між точками «а» та «б», рис. 2.5а і складаються по за межами відрізка  $[a, b]$ , рис. 2.5б. Таким чином, поступове «витискання» за межі осердя котушки електричного потоку  $N$ , рис. 2.5в, спричиняє його зростання біля її бічної поверхні, що використовується при конструюванні існуючих видів трансфілдерів типу – індуктивних трансформаторів з концентраторами магнітного потоку. Аналогічні міркування можна

застосувати не лише до розробки двополюсних компонентів, а і до розробки емнісних трансформаторів та інших приладів з потоками векторів індукції.

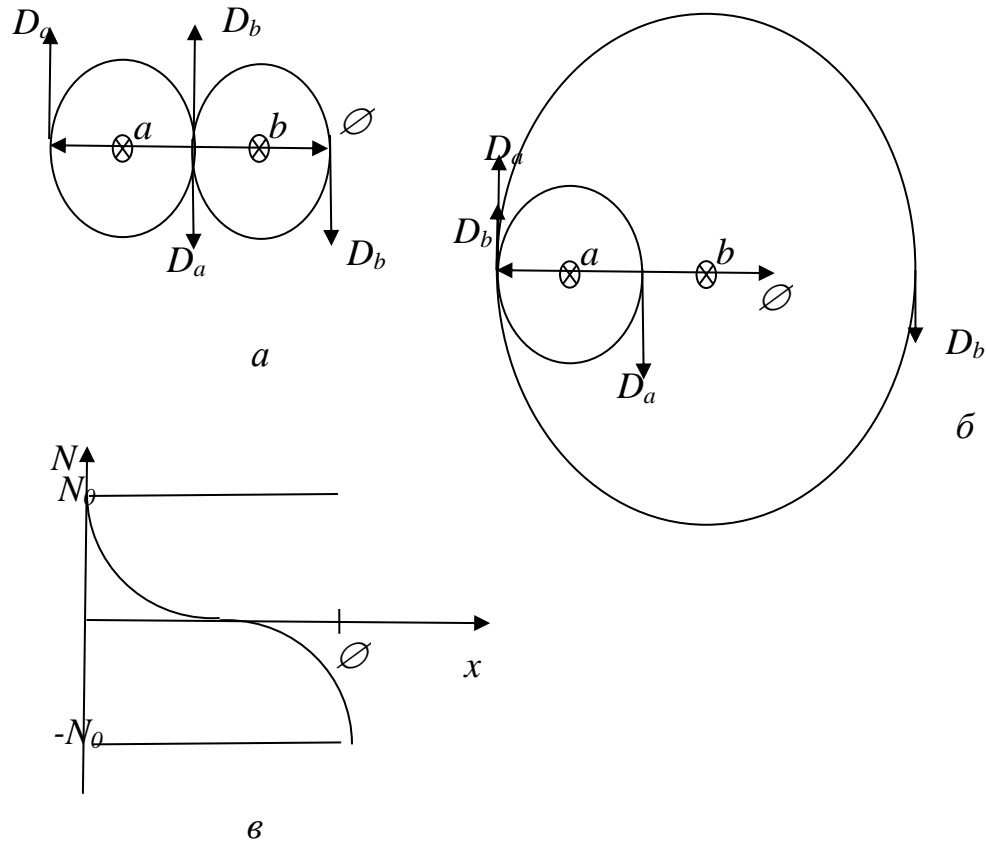


Рисунок 2.5 – Витискання електричного поля котушки індуктивності:

*a* – зменшення електричного потоку всередині котушки;

*б* – зростання електричного потоку на периферії обмотки котушки;

*в* – розподіл потоку вектора електричної індукції по діаметру  $\emptyset$  котушки.

Таким чином, в підрозділі з'ясовані механізми взаємоперетворення потоків векторів індукції магнітного та електричного поля на основі аналізу диференційно розподілу цих векторів. Встановлено що з ортогонального розташування векторів в кожній точці простору також напрями потоків цих векторів також взаємоперпендикулярні, що повинно враховуватись при розробці трансфілдерів.

## 2.5. Висновки за розділом 2

В розділі 2 розглянуті еволюційні шляхи розвитку математичних моделей компонентів КЕ СКС. Останнє дозволило визначити точки об'єднання та розгалуження ланцюгового та електродинамічного моделювання елементної бази КЕ СКС. Використання класичних низькочастотних моделей гальмує зростання продуктивності та виконання інших вимог СКС. Зокрема відмова від застосування пасивних індуктивних компонентів, та їх моделювання підсилювальними каскадами зі зворотним частотозалежним зв'язком вимагає додаткових енергозатрат. За для подолання проблеми такого роду запропоновано наступні кроки та розв'язані наступні задачі на основі заміни струму провідності струмом зсуву.

1. Розроблена ланцюгова та електродинамічна математична модель трансфілдера та сформульовані можливі варіанти його реалізації.

2. Представлена узагальнена структура математичної моделі трансфілдера довільного порядку та проілюстровані шляхи її реалізації шляхом ланцюгового перетворення потоків індукції електромагнітного поля за довільною наперед заданою топологічною схемою.

3. Виконаний аналіз механізмів взаємоперетворення потоків векторів індукції магнітного та електричного поля на основі диференційно розподілу цих векторів.

4. Встановлено що з ортогонального розташування векторів в кожній точці простору впливає ортогональність напрямки потоків цих векторів, що покладено в основу розробки трансфілдерів.

### 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТРАНСФІЛДЕРІВ

#### 3.1. Напрями розробки високочастотних енергоощадних компонентів

Керуючись викладеними вище принципами можна запропонувати різноманітні шляхи розробки створення пасивних реактивних компонентів (трансфілдерів) за двома напрямками: речовинний; структурний. Обидва шляхи ґрунтуються на використанні струму зсуву, у відповідності з (2.14), як джерела магнітного потоку.

*Речовинний напрям* – це напрям, що обумовлений використанням інших та (або) нових матеріалів, з яких виготовляється трансфілдер. Модифікація стосується частини, або усіх без винятку композиційних складових трансфілдера. Зокрема можлива заміна металевих дротів котушок, обмоток, пластин конденсаторів та концентраторів потоків векторів індукції на напівпровідникові, діелектричні, електретні (сегнетоелектрики), діамагнітні та магнітопровідні матеріали].

*Структурний напрям* ґрунтується на розробці трансфілдерів за схемою, рис. 2.3, структурна модифікація яких визначається індексами оператора  $T_{x,y}^n$ , табл. 2.1. Варіанти модифікацій за цими ознаками наведені в табл. 3.1, де відображені не лише типи полів збудження та реакції, а і матеріальні параметри  $\epsilon$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$  композиційних складових трансфілдера, в яких розглядаються трансформація полів (2.13) за рівняннями Максвела (2.14).

Вище викладене дозволяє запропонувати наступні види конструкцій трансфілдерів:

- виготовлення діелектричної котушки індуктивності з сегнетоелектрика, магнітний потік якої створюється обвитком, або обвитками діелектричного дроту, що не торкаються один одного, або мають велику діелектричну проникність, величина якої на декілька порядків перевищує діелектричну проникність ізоляційної оболонки сегнетоелектричного дроту;

Таблиця 3.1 - Типи трансфілдерів

Вхідні потоки векторів	Вихідні потоки трансфілдера		
	$N \text{ in } \sigma$	$N \text{ in } \varepsilon$	$\Phi \text{ in } \mu$
$N \text{ in } \sigma$	Частотонезалежні дільники, суматори та узгоджувачі	Конденсатор	Котушка індуктивності
$N \text{ in } \varepsilon$	Конденсатор	Трансформатор ємнісний	Трансформатор ємнісний по входу
$\Phi \text{ in } \mu$	Котушка індуктивності	Трансформатор ємнісний по виходу	Трансформатор магнітний

- створення обмоток трансформаторів з різними діелектричними, провідними (напівпровідними) та магнітними властивостями;
- застосування стрічкових конденсаторів, що володіють властивостями індуктивних імпедансів;
- розробка трансформаторів з ємнісним входом та (або виходом).

Для кожного з розглянутих варіантів реактивних компонентів нескладно привести структурні схеми їх реалізації, окремі елементи яких зазначені в наступних підрозділах.

В підрозділі намічені шляхи створення пасивних реактивних компонентів, з якісно новими характеристиками. Зокрема це може стосуватись енергозаощадливості, високочастотності, здатності працювання в гігагерцному і вище діапазонах, малої вага та розмірів.

### 3.2. Діелектрична котушка індуктивності

Приступимо до висвітлення шляхів та реалізації двополюсних трансфілдерів. Для цього виконаємо аналіз фізичні процеси, що мають місце в

ідеалізованій котушці індуктивності, що характеризується оператором  $T_{i,u}^1$ . Механізм виникнення напруги (вихідна фізична величина) як реакції на струм (вхідна фізична величина) достатньо простий. Згідно з рис. 2.1 та табл. 2.1, вона виникає внаслідок послідовних перетворень: струм зовнішнього джерела  $i(t)$ , що тече через обвитки котушки, створює магнітний потік  $\Phi(t)$ , а останній, пронизуючи осердя котушки, викликає в ній напругу  $u(t)$  у відповідності з (2.8)–(2.12). У зазначеній послідовності перетворень інша складова електромагнітного поля – потік вектора електричної індукції  $N$ , у функціональних перетвореннях  $T_{i,u}^1$  невідображена, але проявляється у вигляді потоку вектора електричної індукції в обвитці останньої в результаті підключення генератора струму до котушки. Зміна (похідну) цього потоку і є джерелом магнітного потоку, що генерує сторонню електрорушійну силу, яка виникає в котушці внаслідок явища самоіндукції. За наявності навантаження (замкнутого електропровідного шляху з опором, що підключений паралельно індуктивності) струм джерела електроенергії перерозподіляється між паралельними гілками котушки та навантаження. Напруга на навантаженні складатиметься з напруги на омичному опорі котушки та напруги за рахунок явища самоіндукції.

У розглянутому випадку котушка виконує подвійну функцію, тобто виконує роль вхідного ЕК, струм якого породжує магнітний потік та – вихідного ЕК, що оперує з іншою складовою електромагнітного поля, а саме з потоком вектора електричної індукції. Цей потік зосереджено в об'ємі провідника, з якого намотана котушка, призводить до переміщення зарядів у лінійному електричному полі цього провідника. Разом з тим, потік вектора магнітної індукції може бути створено не лише рухомими носіями зарядів, а і струмом зсуву. Наприклад, електричні диполі сегнетоелектрика не переміщуються, а розташовуючись в вузлах структурної решітки кристала. Обертаючись навколо свого центру симетрії вини можуть лише змінювати свою орієнтацію (плече). Переорієнтацію може викликати зовнішнє змінне у



часі електричне поле, що створюється підключенням до сегнетоелектричного дроту генератора змінної напруги. У цьому випадку в сегнетоелектричному дроті відсутній струм провідності, але існуватиме змінне електричне поле. З тонкого сегнетоелектричного дроту можна намотати котушку індуктивності. Така котушка індуктивності має великий вхідний опір на нижніх частотах (ємнісний), а на високих частотах – індуктивний реактивний опір. В котушці індуктивності, що намотана дротом з сегнетоелектрика, відбувається практично безінерційна поляризація зв'язаних молекул (електричних диполів) під дією напруги  $u$ , на затискачах котушки. Орієнтація в кожній точці дроту цих диполів повторює орієнтацію траєкторії дроту. Такими властивостями володіють сегнетоелектрики з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_s$ , що на декілька порядків перевищують відносну діелектричну провідність повітря та звичайних діелектриків з  $\epsilon_d \ll \epsilon_s$ . У таких провідниках струмом провідності по відношенню до струму зсуву можна нехтувати в широкому діапазоні частот.

Принцип дії котушки пояснюється на рис. 3.1, де 1 – котушка, з віссю 2 симетрії  $OO'$ , що намотана сегнетоелектричним дротом 1. Прикладання до кінців котушки зовнішнього джерела електроенергії викликає поляризацію доменів, що набувають властивостей електричних диполів. Ці диполі, залишаючись на місці в кристалічній решітці, змінюють лише свою орієнтацію і вибудовуються для певного моменту часу паралельно не вісі  $OO'$ , рис. 3.1, а вісі симетрії діелектричного дроту. Силіві електричного поля котушки повторюють траєкторію сегнетоелектричного дроту 1 котушки. Враховуючи змінний у часі характер зовнішнього джерела електроенергії у середині дроту 1 матимемо пульсуюче електричне поле, що породжує у відповідності з (2.14) густину струму зсуву, величина якого тим більше, чим більше частота зовнішнього джерела. З точки зору зовнішнього прояву струм провідності та струм зсуву рівнозначні [22] – орієнтація магнітного поля котушки з металевим дротом подібна до орієнтації магнітного поля котушки з

сегнетоелектричним дротом. Таким чином, струм зсуву також породжує всередині котушки магнітний потік  $\Phi$ , рис. 3.1.

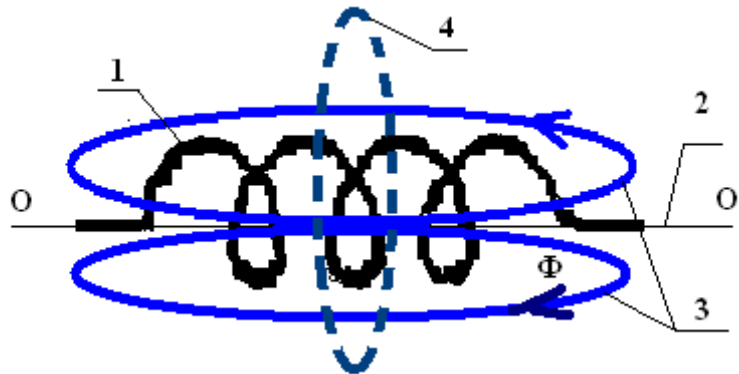


Рисунок 3.1 – Котушка індуктивності: 1 – сегнетоелектричний дріт; 2 – вісь симетрії  $OO'$  котушки; 3 – траєкторія потоку  $\Phi$  в котушці з сегнетоелектрика; 4 – траєкторія потоку  $\Phi$  в котушці з ідеалізованого діелектрика

Як зазначалось, такого виду переорієнтація диполів можлива лише в діелектриках, відносна діелектрична проникність яких  $\epsilon_s \approx 10000$  набагато перевищує відносну діелектричну проникність вакууму  $\epsilon_0 = 1$ , або повітря. Такими властивостями володіють сегнетоелектрики типу сегнетова сіль  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , титанат барію  $\text{BaTiO}_3$  та інші полімерні матеріали, що мають спільну назву електрети. Обмотка котушки індуктивності, що виготовлена з таких матеріалів, створює в її осерді паралельно до вісі 2, рис. 3.1, потік  $\Phi$  вектора магнітної індукції. Цей потік пронизує осердя котушки, охоплює замкнутими траєкторіями 3, бічну поверхню котушки та замикається через її торці.

Покажемо різницю між різними типами діелектриків, щодо створення індуктивності. При виготовленні обмотки котушки звичайним діелектричним дротом з  $\epsilon_d < 10$  прикладення до кінців дроту зовнішнього джерела електроенергії практично не змінює переорієнтацію вектора електричної індукції усередині дроту, оскільки звичайний діелектрик за своїми

властивостями подібний до сухого повітря з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_d \approx 1$ . У цьому випадку, внесення дроту 1, рис. 3.1, в зовнішнє електричне поле, що створено напругою  $u$ , не змінює його орієнтацію усередині дроту. Напрямок силових ліній електричного поля в дроті збігатиметься не з напрямом вісі дроту, а – з напрямом вісі 2 котушки. При цьому потік  $\Phi$  буде циркулювати в ортогональній до вісі  $OO'$  котушки площині по траєкторіям 4, рис. 3.1, подібно до стрілки магнітного компаса навколо провідникового циліндра зі струмом, роль якого виконує котушка. Іншими словами, незважаючи на внесення в зовнішнє електричне поле дроту з майже ідеалізованого діелектрика, може мати місце лише незначна поляризація доменів, а не їх переорієнтація. Останнє не викликає різкого зростання сумарного електричного поля в діелектриці внаслідок хаотичної направленості електричних моментів його окремих диполів.

В підрозділі 3.2 розроблено ескіз конструкції діелектричної котушки індуктивності, обґрунтовується принцип її функціонування та вибір типу діелектричного матеріалу для її реалізації.

### 3.3. Компонентне рівняння сегнетоелектричної котушки

Математична модель діелектричної котушки індуктивності може бути представлена у вигляді компонентного рівняння. Виходячи з описаного в підрозділі 3.2 принципу функціонування трансфілдера  $T_{iu}^1$ , будемо вважати, що до полюсів котушки підключено синусоїдне джерело струму  $\dot{I}$ . Цей струм, підводиться до сегнетоелектричної котушки металевими провідниками. В точках приєднання цих провідників до котушки на її кінцях будуть накопичуватись різнойменні заряди, які породжують електричне поле тобто потік вектора електричної індукції. За нульових початкових умов інтегральна напруга між кінцями котушки може бути визначена за формулами (2.10) та (2.11), як

$$\dot{U} = \dot{U}_L + \dot{U}_c = \dot{I} \cdot j\omega L + \dot{I} \cdot \frac{1}{j\omega C} = \dot{I}(jX) \quad (3.1)$$

де  $\dot{U}$  – напруга на котушці, а

$$X = x_L - x_c = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (3.2)$$

повний реактивний опір котушки, що повністю узгоджується з теорією електричних кіл. Параметри котушки  $L$  та  $C$  визначаються через геометричні розміри та матеріальні параметри середовища в такий самий спосіб, як і для котушки з металевого дроту [49] та ємності між кінцями сегнетоелектричного дроту спіралеподібної форми [47, 48].

Таким чином, в підрозділі 3.3 представлено математичну модель котушки індуктивності.

### 3.4. Розробка розгалуженого трансфілдера

Розглянемо методи розробки трансфілдерів порядок якого  $n \geq 1$ , табл. 2.1. Структура перетворення типу  $T_{i,u}^2$ , рис. 2.1, не обмежуються двополюсними компонентами. Під цей тип підпадають і трансформатори, схематичне перетворення потоків в яких показано на рис. 2.3а.

На циліндричній поверхні виділяється вхідне та вихідне електричне коло. До вхідного ЕК належить обвитка з  $W_{вх}$  витками, що створює магнітний потік  $\Phi$ . Концентруючись усередині обвитки, цей магнітний потік породжує навколо себе потік вектора електричної індукції, рис. 2.4а, що концентрується у вигляді тороподібного віртуального кільця. Вихідним ЕК такого трансфілдера буде вихідна обвитка з  $W_{вих}$  витками, рис. 3.2.

У вертикальній площині розрізу котушки силові лінії електричного поля, що позначені як «х», спрямовані від нас, а – точкою в кружечку – до нас. Створене електричне поле реєструється іншою частиною трансфілдера – вихідним ЕК. Конструктивно вихідне ЕК може мати різну конфігурацію: 1 – обвитка, що намотана металевим провідником; 2 – обвитка, що намотана сегнетоелектричним провідником; 3 – радіальні металеві пластини; 4 – радіальні неметалеві пластини. Кожний із таких пристроїв може мати певне прикладне застосування. Зокрема, варіант 1 відповідає конструкції звичайного трансформатора. Варіант 2 відповідає трансформатору з ємнісним виходом, конструкція якого з точністю до інверсного варіанта відповідає трансформатору з ємнісним входом [50, 51]. Варіанти (3 та 4) можуть бути застосовані в різноманітних чутливих елементах виконавчих механізмів та датчиках медичного обладнання тощо.

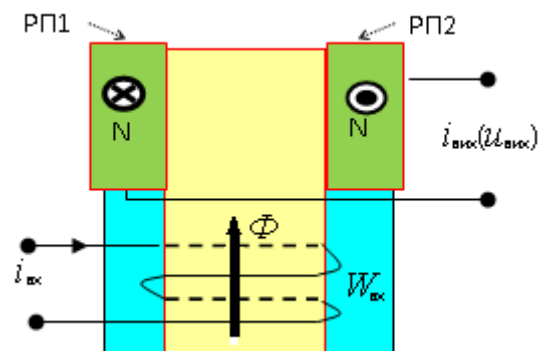


Рисунок 3.2 – Схема конструкції перетворювача струму

Розглянемо детальніше перетворення потоків векторів індукції в чотириполюсному трансфілдері, рис. 3.2. Нехай вихідне коло складається з двох радіальних пластин (РП) РП1 та РП2 (зафарбовані зеленим кольором), які не мають гальванічного контакту між собою. РП1 та РП2 розташовані в круговому потоці вектора електричної індукції  $N$ , зміна у часі якого викликає струм зсуву між ними. Цей струм у відповідності з законом повного струму відводиться провідниками і створює у вихідному ЕК  $i_{\text{вих}} (u_{\text{вих}})$ . У випадку, коли вторинне коло складається з однієї пари РП, у ньому виникає струм та

відповідно падіння напруги на опорі навантаження. Якщо РП багато (подібно до спиць велосипедного колеса), то з'єднавши їх пари послідовно, можна збільшити напругу, величина якої може перевищувати напругу на вході, яка створюється за рахунок течії струму  $i_{ex}$  в котушці вхідного ЕК –  $W_{ex}$ . Якщо ж РП вихідного кола поєднати паралельно, то матимемо пристрій, який може підсилити величину вихідного струму. Розташування РП відносно вхідної обмотки в залежності від конкретної реалізації може бути різним: вище, як вказано на рис. 3.2; нижче; всередині котушки зі струмом  $i_{вх}$ ; зовні; комбінація зазначених видів розташування. Головним чинником вибору місця розташування РП слід вважати максимізацію струму, який досягає найбільших значень в місцях максимального потоку вектора електричної індукції.

Таким чином, застосування системного методу аналізу що ґрунтується на рівняннях теорії електричних кіл та рівнянь Дж. Максвела [19-28] дозволило скласти математичну модель (2.1)...(2.12). На основі цієї моделі розроблені як нові конструкції трансфілдерів, так і існуючі конструкції індуктивних трансформаторів гетерогенного типу (на вході струм, на виході напруга). Для переходу до таких трансформаторів вторинне ЕК на схемі рис. 3.2 слід подати у вигляді вторинної обмотки, що намотана металевим провідником.

*Зауваження 1.* У рамках структурних перетворень, рис. 2.2, рис. 2.3 можна розглядати пристрої, що реєструють електричне поле не провідниками, а напівпровідниками та діелектриками, наприклад, оптоволоконном, анізотропними речовинами, що змінюють поляризацію тощо. При цьому можна комбінувати та використовувати як джерела магнітного потоку не лише провідникові, а й інші джерела, наприклад пульсари магнітного поля, діелектричні котушки тощо.

*Зауваження 2.* Запропонована в прикладі 1 котушка характеризується нульовою реактивною провідністю на частоті  $f = 0$ , тобто вона не проводить постійний струм, оскільки незмінне у часі електричне поле сегнетоелектричного дроту не породжує струм зсуву, а разом з ним і

магнітний потік  $\Phi$  через осердя котушки, джерелом якого і є виключно змінне у часі електричне поле. Якісно нова властивість котушки індуктивності спрощує схеми обробки сигналів, оскільки при цьому відпадає необхідність розробки додаткових підсхем розв'язки електричних ланцюгів, що задають робочі точки напівпровідникових приладів на постійному струмі.

Розглянуті методи формування вихідного кола трансфілдерів, рис. 3.1 та рис. 3.2, можуть скласти основу розробки різноманітних класів функціональних перетворювачів, де як джерело пульсуючого електричного поля, так і реєстратори магнітного потоку можуть мати різну фізичну, хімічну, або навіть біологічну природу та внутрішню структуру.

В даному підрозділі розроблено ескізні варіанти трансфілдерів  $n$ -го порядку. Такого типу трансфілдери склали основу розробки різноманітних гетерогенних та гомогенних трансформаторних пристроїв, сфера застосування яких не обмежується СКС, а може розповсюджуватись на вимірювальну та діагностичну апаратуру медицини, біології, агротехнології та контроль різноманітних виробничих операцій.

### 3.5. Топологічні трансфілдери

Поняття топологічного трансфілдера (ТТ) виявилось достатньо плідним для використання при розробки схем заміщення внутрішніх та зовнішніх по відношенню до КЕ СКС електромагнітних перешкод. Важливість цього напрямку дослідження пов'язана з проблемами сумісності: електромагнітної; енергетичної; інформаційної, - які стають на заваді підвищення продуктивності КС.

Перш за все, звернемо увагу на те, що трансфілдери можуть бути представлені, як реальні пристрої з морфологічними характеристиками, так і навпаки – можуть відтворювати процеси впливу електромагнітних перешкод, що порушують системні функції КЕ СКС, рис. 3.3.

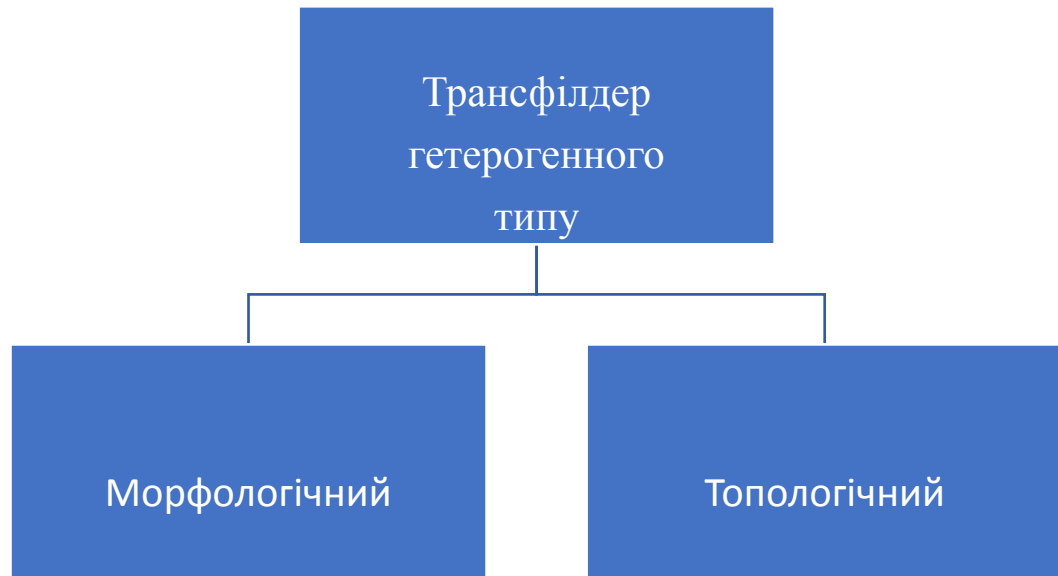


Рисунок 3.3 – Функціональне навантаження трансфілдера.

В підрозділах 3.2 та 3.4 детально розглянуті способи конструювання морфологічних трансфілдерів. До класу морфологічних трансфілдерів першого порядку, рис. 3.3, віднесемо реальні двополюсні котушки індуктивності, конденсатори та опори різноманітної конструкції, що характеризуються геометричними розмірами, та відповідними матеріальними параметрами.

До класу топологічних трансфілдерів віднесемо не реальні конструкції, а схеми імітації електромагнітних спотворень, або перешкод, що виникають в КС внаслідок використання недосконалих моделей в процесі їх проектування, або при штучному створенні непередбачуваних заздалегідь завад та впливів природного характеру. Наявність таких схем, дозволяє розширити та суттєво поліпшити функціональні можливості існуючих САПР електроніки за рахунок моделювання електромагнітних перешкод ТТ.

Теоретичне підґрунтя поточного підрозділу представляють собою симбіоз моделей комунікатора та трансфілдерів. Сукупність таких моделей дозволяє конструювати схемотехнічні макромоделі імітації електромагнітних перешкод у вигляді залежних та незалежних джерел електричної енергії. Такого типу ідеалізовані джерела струму та напруги входять до складу



бібліотек компонентів сучасних САПР: Spice, MicroCap, EWB, OrCad, MultiSim, Altium Designer тощо. Використання таких джерел в схемах імітації електромагнітних перешкод дозволяє будувати схемотехнічні моделі зовнішніх перешкод у вигляді незалежних, а внутрішніх – у вигляді залежних джерел електроенергії. Враховуючи лінійну залежність між збуренням та реакцією цих джерел, такого типу схеми відображають не лише рівні амплітуд, а також і фазові співвідношення між системними та позасистемними (індукованими, наведеними, паразитними) напругами та струмами, що дозволяє з високим ступенем точності розв'язувати задачі як внутрішньої, так і зовнішньої електромагнітної сумісності.

В залежності від типу позасистемного впливу: електрична або магнітна складова електромагнітного поля; теплові втрати енергії в провідниках комунікатора або в діелектриках, що розділяють дерева комунікатора, – схеми заміщення перешкод мають свої специфічні особливості. Обмежимося моделюванням виключно магнітних потоків. Решту проявів позасистемного характеру можна буде врахувати в аналогічний спосіб.

В підрозділі введено поняття та дано означення морфологічного та топологічного трансфілдера, за для його використання при побудові впливу електромагнітних перешкод на характеристики КЕ. Звертається увага на різницю між задачами зовнішньої та внутрішньої електромагнітної сумісності.

### 3.6. Імітатори магнітних потоків

Сформулюємо вимоги до магнітної макромоделі ТТ. Основу розробки схем імітації магнітної складової електромагнітної перешкоди склали рівняння (2.8)...(2.14), які ілюструють зв'язок між класичною теорією електричних кіл та електродинамікою в межах, що дозволяють будувати ТТ, рис. 3.3.

Схему заміщення ТТ, що моделює вплив потоків вектора магнітної індукції, (ТТМ) можна синтезувати у вигляді макромоделі та включити її до бібліотеки компонентів будь-якої САПР електроніки. Математичну модель ТТМ можна побудувати на основі рівнянь (2.12)...(2.14), (2.8), (2.9) в наступній послідовності. Напруги, що наводяться в  $p$  незалежних контурах комунікатора, можна представити матричним рівнянням

$$[U_H]_{\delta,1} = [Z_d]_{p,M} [I]_{M,1}, \quad (3.3)$$

де  $[Z_d]_{p,M}$  – елемент матриці електродинамічних параметрів, що розташований на перетині  $q$ -го рядка та  $k$ -го стовпця

$$Z_{q,k}^x = -j\omega L_{q,k} \quad (3.4)$$

$p$  – кількість незалежних контурів,  $M$  загальна кількість полюсів,  $L_{q,k}$  – коефіцієнти лінійної комбінації комплексних струмів  $[I]_{M,1}$  полюсів, які в повному складі створюють потік вектора магнітної індукції через  $q$ -й контур комунікатора:

$$\Phi_q = I_1 \cdot L_{q,1} + I_2 \cdot L_{q,2} + \dots + I_k \cdot L_{q,k} + \dots + I_M \cdot L_{q,M} \quad (3.5)$$

Цілком очевидно що, згідно з останньою формулою (3.5) напруга

$$u_q(t) = \frac{d\Phi_q(I_1, \dots, I_M)}{dt}, \quad (3.6)$$

представляє собою величину наведеної напруги в  $q$ -контурі ( $q = 1 \dots p$ ). Величина цієї напруги залежить від струмів усіх  $M$  полюсів компонентів. Таким чином, наведена перешкода, що виникає в  $q$ -му незалежному контурі, моделюється в вигляді залежного джерела напруги, величина якої дорівнює  $u_q(t)$ (3.6). Іншими словами, ми отримали інструментарій відображення

електромагнітних перешкод, який дозволяє скласти схему макромоделі комунікатора, головними елементами якої будуть залежні джерел напруги та диференціатор. Головні вимоги до ТТМ, що складається з  $p$  незалежних контурів формулюються так:

Макромодель мусить мати вигляд  $2M+2p$  – полюсника (чорна скринька), що має  $M$  – двополюсних входів і  $p$  двополюсних виходів. Реакція – напруга кожного  $q$ -го виходу мусить дорівнювати часовій похідній від лінійної комбінації базисних струмів (збурень)(3.5). В даному випадку поняття базисний вжито в тому розумінні, що з метою спрощення моделі їх кількість може і не дорівнювати кількості полюсів компонентів  $M$ .

Коефіцієнти пропорційності  $L_{q,k}$ , що входять до складу лінійної комбінації (3.5) мусять бути формальними параметрами ТТМ, що конкретизуються, тобто перетворюються у фактичні параметри на етапі виклику макромоделі, подібно до того як задаються конкретні значення параметрів базових компонентів  $R, L, C, G$  в полі VALUE вікна вводу атрибутів компонента.

На входи подаються базисні (перешкоджаючі) струми полюсів компонентів, шляхом їх приєднання до відповідних полюсів макромоделі.

Виходи, що імітують залежні джерела напруг, підключаються в ту гілку контура, що визначає його, як незалежний. В такий спосіб кожний  $q$ -й вихід підключається в розріз  $q$ -го незалежного контуру, а вхід - в розріз полюса компонента, що живить джерело магнітного потоку комунікатора. При цьому додатною напругою вважатимемо напругу, що співпадає з напрямом контурного струму.

Реакція вхідних та вихідних опорів залежних джерел макромоделі не повинна впливати на рівень електромагнітної перешкоди, що вноситься в контур, а тому як на вході, так і на виході слід встановити розв'язувальні залежні джерела електроенергії відповідного типу. Одне з цих джерел мусить мати коефіцієнт передачі рівним одиниці, інше – відповідному значенню магнітного електродинамічного параметра  $L_{q,k}$  з рівняння (3.5).

В підрозділі розроблено математичну модель імітатора наведеної в контурі напруги, внаслідок потоку вектора магнітної індукції через цей контур. Джерелом струму, що генерує цей потік може бути будь-яка окрема гілка або їх сукупність гілок ( друкованих доріжок, або металевих дротів реальної конструкції ЕК).

### 3.7. Базова модель топологічного імітатора магнітних потоків

Базовою, або канонічною моделлю імітації магнітних перешкод будемо називати модель, що складається з мінімальної кількості бібліотечних компонентів та відтворює процес наведення напруги в одному з незалежних контурів. Джерелом магнітного потоку через контур вважатимемо струм розподіленого у просторі будь-якого одного провідника комунікатора. Як щойно зазначалось, базова модель мусить перетворювати струм в напругу. На перший погляд задачу можна розв'язати за допомогою стандартної моделі джерела *Dependent sources - Linear V\_of\_I*, яка є ідеальним лінійним 2x2-полюсним (двохпортовим – два полюси на вході, для підключення струму та 2 - на виході для підключення залежного джерела напруги до заданих вузлів схеми). Функціональне перетворення струму на вході в напругу виходу має вигляд  $V_{out} = \langle value \rangle * I_{in}$ . При його схемному задаванні необхідно ввести наступні імена та параметри: *PART <name>* - титульне ім'я залежного джерела, що візуалізується на схемному екрані, наприклад, *Vst2*, або *Vlink*; *VALUE <value>* - значення коефіцієнта пропорційності, наприклад, *10m*, або *12.5*.

Але, таким чином проблема не вирішується внаслідок того, що величина вихідного струму мусить бути пропорційна не вхідному струму, а його похідній (2.12) у часі. При цьому для забезпечення диференціювання без зміни масштабу за допомогою індуктивності потребує, щоб її величина дорівнювала одиниці, а числове значення електродинамічного параметра мусить бути введено до, або після диференціювання у вигляді параметра залежного

джерела (струм-струм, або напруга-напруга). Числове значення цього параметра мусить вводитись в ТТМ на етапі вибірки цієї моделі з бібліотеки макромоделей.

Синтезована у відповідності до зазначених вимогам схема представлена на, рис. 3.4. Вона виконує диференціювання магнітного потоку (3.6), а через те і струму, оскільки між ними існує лінійний зв'язок (3.5). Така схема використовує властивість реактивного компонента, в даному випадку індуктивності, одночасного виконання двох операцій – диференціювання і перетворювача струму в напругу з коефіцієнтом перетворення  $L1=1$ , що і забезпечує необхідне збереження масштабності схемотехнічним диференціюванням.

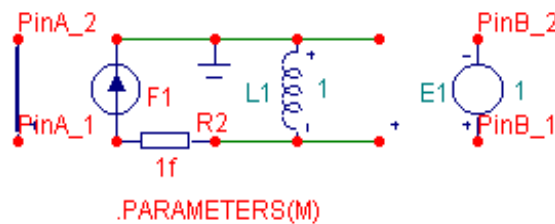


Рисунок 3.4 – Схема канонічної макромоделі ТТМ

Вхідною величиною схеми є струм, що тече з додатнім напрямом від полюса PinA\_1 до полюса PinA\_2 всередині макромоделі.

Вихідна величина – напруга, між полюсами PinB\_1, PinB\_2, яка індукується в контурі. Як видно з рис. 3.4, потенціал полюса PinB\_1 вище за потенціал PinB\_2. Її величина обчислюється похідною струму в індуктивності L1 (1 Гн) та множенням похідної на формальний параметр  $F1=M$ , що конкретизується електродинамічний параметр при виклику макромоделі в схему. Цей параметр, є коефіцієнтом передачі струму, що тече від полюса PinA\_1 до полюса PinA\_2 у струм, що тече через індуктивність L1 у напрямку від «+», до «-».

$$U(B) = M \frac{dI(A)}{dt} \quad (3.7)$$

Зазначені операції реалізовані двома залежними джерелами електроенергії ланцюжком R2, L1, що диференціює. Зокрема схема, рис. 3.4, складається з двох джерел Dependent sources - Linear IofI, та реактивного диференціатора (індуктивності), послідовно до якої приєднується незначний опір R2= 1f Ом=10<sup>-15</sup> Ом (f означає множник фемто) з метою забезпечення коректної роботи алгоритму диференціювання (без втрат). Перше залежне джерело I\_of\_I з формальним параметром M, що представляє собою коефіцієнт передачі цього джерела, забезпечує розв'язку та перетворення струму джерельного контура у вхідний струм диференціатора, з метою його диференціювання індуктивністю, друге залежне джерело – V\_of\_V, що введено з фіксованим одиничним коефіцієнтом передачі по напрузі – забезпечує розв'язку по виходу і перетворює напругу індуктивності у вихідну напругу, що підключається до контура – вимушеного приймача магнітної перешкоди. Параметр усієї макромоделі M вводиться, як коефіцієнт пропорційності між вхідним та вихідним струмом першого джерела. Його величина мусить бути апріорі визначена в електродинамічний спосіб як елемент трансфілдерної матриці, методами електродинаміки що викладаються в розділі стаціонарні електромагнітні поля, [19 - 29]. Схему рис. 3.4 доцільно називати канонічною, оскільки вона як «атомарний елемент» впливу магнітного потоку складатиме основу побудови багатополюсних імітаторів електромагнітних перешкод. Приклад застосування такої моделі ілюструє рис. 3.5, де віддзеркалюється дія "власного" магнітного потоку контура.

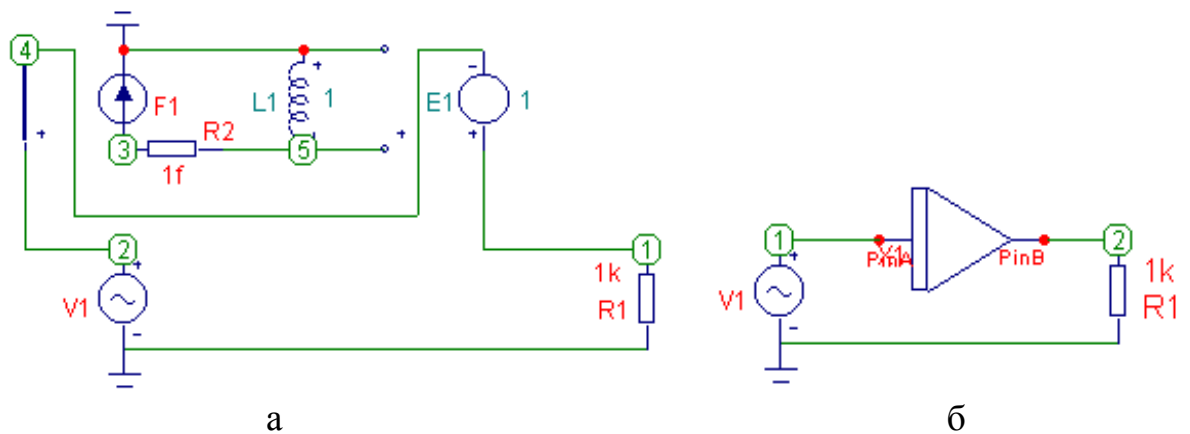


Рисунок 3.5 – Застосування ТТМ:

а – схема; б – подання імітатора у вигляді макромоделі

Схему диференціатора струму, що покладена в основу створення макромоделі пакета MicroCap, названо DIF\_L, що умовно «натякає» на дві обставини: диференціатор розроблено на основі індуктивності L1, по друге – вона імітує дію саме магнітного потоку. Результати аналізу схеми, рис. 3.5, ілюструються на рис. 3.6.

Як свідчать результати аналізу, рис. 3.6, струм через резистор співпадає по фазі з напругою на ньому, а амплітудне значення напруги резистора майже вдвічі менше ніж амплітуда напруги джерела внаслідок існування ефекту самоіндукції контура, дію якої моделює ТТМ. Цей висновок стосується як схеми, рис. 3.5а, так і схеми, рис. 3.5б, де принципова схема диференціатора подається в вигляді розробленої бібліотечної макромоделі з ім'ям DIF\_L. Аналіз виконано за умови, що магнітний параметр контура дорівнював 500 мкГн, а частота джерела напруги – 1МГц.

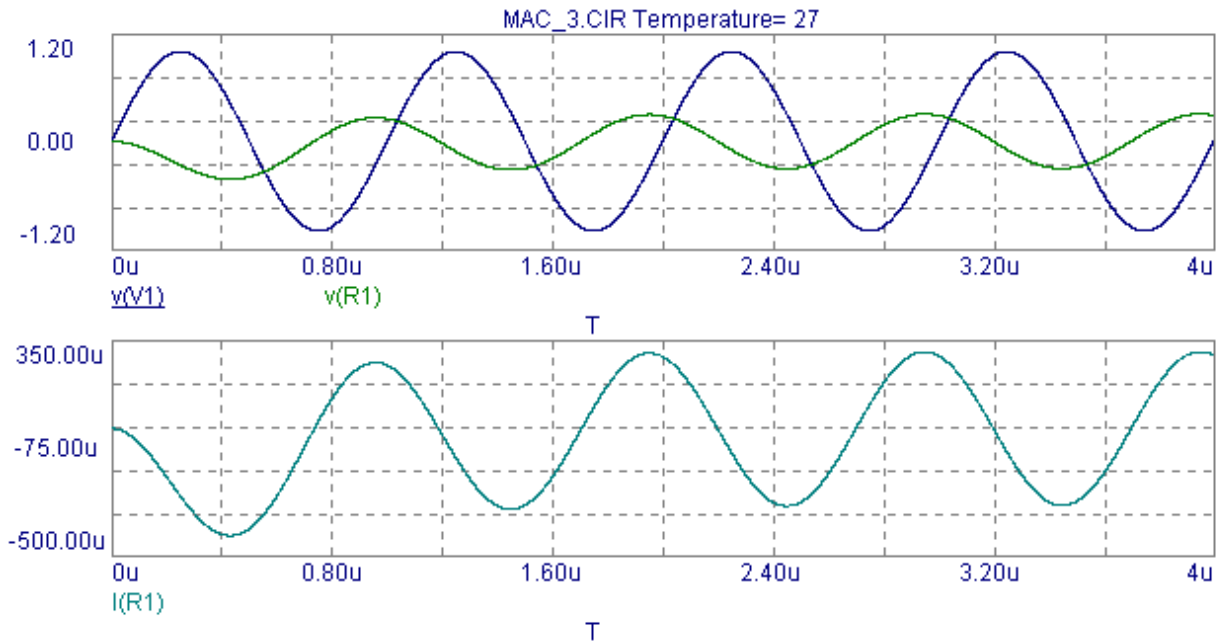


Рисунок 3.6 – Результати аналізу схеми на основі базової ТТМ:

$v(V1)$ ,  $v(R1)$  – напруги джерела та навантаження;

$I(R1)$  – струм джерела та резистора.

В загальному вигляді структурна схема заміщення комунікатора, у відповідності до структури матриці магнітних параметрів (3.5), мусить мати декілька входів та декілька виходів, реакції яких є – лінійними комбінаціями похідних від вхідних сигналів. При цьому коефіцієнти пропорційності  $L_{q,k}$  мусять бути формальними параметрами макромоделі, які відіграють роль магнітних параметрів матриці ТТМ. Для розробки такої універсальної моделі пропонується поступове ускладнення щойно створеної моделі шляхом введення декількох входів та виходів. В подальшому будемо користуватись універсальними іменами, так, якщо йдеться про макромодель ТТ, з  $m$  входами та  $n$  виходами, що імітують магнітні потоки, то позначка матиме вигляд **ТТМ\_m\_n**.

В підрозділі синтезовано схему ТТМ з одним струмовим джерельним входом та створеною цим струмом напругою. Оскільки схема має один вхід та один вихід її означено як базову або канонічну.



### 3.8. Формування ТТМ з декількома виходами

Розробимо макромодель залежного джерела ТТМ\_1\_2, що має один вхід, та два виходи, яка похідну вхідного струму перетворює у вихідні напруги з заданими зовні параметрами (коефіцієнтами перетворення). Така макромодель має вигляд рис. 3.7, де пунктирним прямокутником обведена, власне, принципова схема макромоделі.

Приклади використання цієї моделі ілюструються, рис. 3.8, а результати обчислення струмів та напруг схем, рис. 3.7, рис. 3.8, приведені на рис. 3.9.

Елементи матриць комунікатора можуть, в даному випадку, бути прописані коефіцієнтам перетворення джерел  $V\_of\_V$  а, коефіцієнт пропорційності моделі  $I\_of\_I$  покладається рівним одиниці.

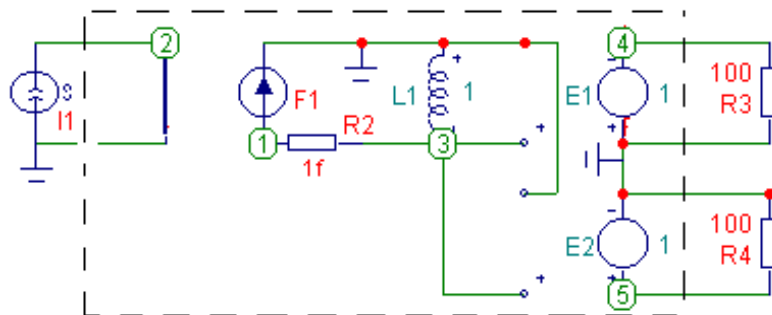
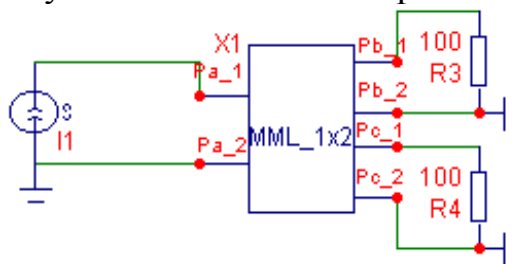


Рисунок 3.7 – Схема ТТМ\_1\_2 (в прямокутнику)

Рисунок 3.8 – Схема використання ТТМ\_1\_2



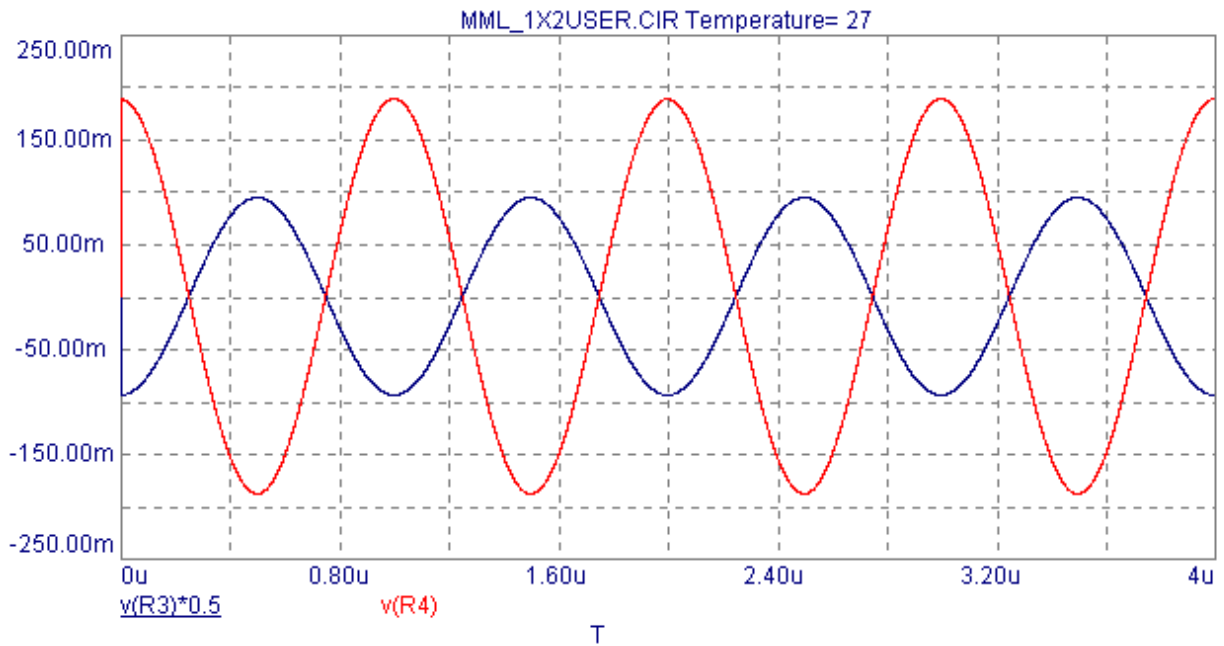


Рисунок 3.9 – Часові залежності напруг схеми з TTM\_1\_2

В підрозділі розроблено схемотехнічну модель TTM\_1\_2 на два виходи, що генерують напруги в різних незалежних контурах, джерелом якої є струм однієї гілки, або контурний струм друкованої доріжки плати (або провідника) реальної конструкції.

В підрозділі синтезовано TTM\_1\_2, тобто схему проходження перешкоди, як індукованих напруг в різних контурах, від струму будь-якого контура, або гілки. Для функціонування такої схеми при виклику макромоделі TTM\_1\_2 необхідно задати 2 формальні параметри, величини яких обчислюються методами електродинаміки.

### 3.9. Макромодель TTM\_2\_1 з декількома входами

Макромодель залежного джерела TTM\_2\_1 має один вихід, та два входи. Синтез схеми з зазначеними характеристиками можна отримати скориставшись принципом суперпозиції канонічних схем з одним входом та одним виходом, рис. 3.4. Для цього слід виконати схемотехнічну реалізацію

похідних лінійної комбінації вхідних струмів з певними коефіцієнтами, що визначаються морфологічними особливостями конструкції, як електродинамічні параметри. Результат цієї операції необхідно трансформувати у вихідну величину залежного джерела напруги. Схемотехнічна реалізація цих перетворень представлена на рис. 3.10. Бібліотечна макромодель такої схеми обведена на рис. 3.10 пунктирним прямокутником. Приклади використання цієї моделі ілюструються на рис. 3.11, а результати обчислення струмів та напруг відповідних схем ілюструються на рис. 3.12. Подібним чином можуть бути створені макромоделі з довільною кількістю як входів, так і виходів.

Звернемо увагу на особливостях вводу параметрів комунікатора в макромоделі. По-перше, треба з'ясувати необхідну кількість параметрів, що їх необхідно вводити. Для цього слід викликати принципову схему моделі та звернути увагу на оператор `.PARAMETERS(праметр1, праметр2,...)`. Кількість параметрів, що їх необхідно вводити дорівнює кількості змінних в дужках цього оператора. По-друге, треба знати, що конкретні значення цих параметрів вводяться на етапі виклику макромоделі у вікні Component <(ім'я)> : Definition в полі Value, де після візуалізованого імені макромоделі треба ввести дужки та в дужках відповідні фактичні параметри.

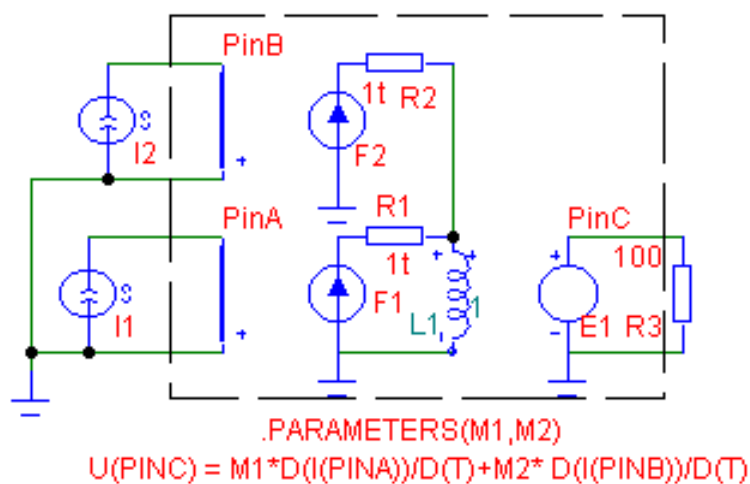


Рисунок 3.10 – Схема TTM\_2\_1 (в прямокутнику)

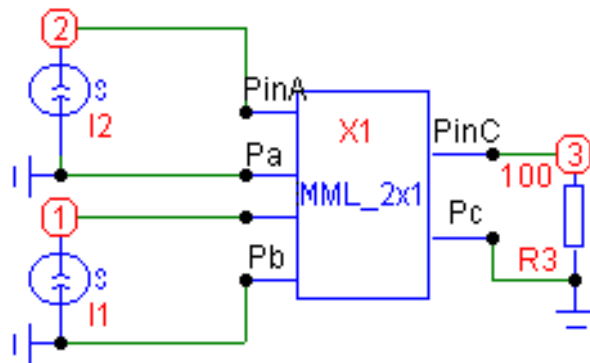


Рисунок 3.11 – Приклад використання ТТМ\_2\_1

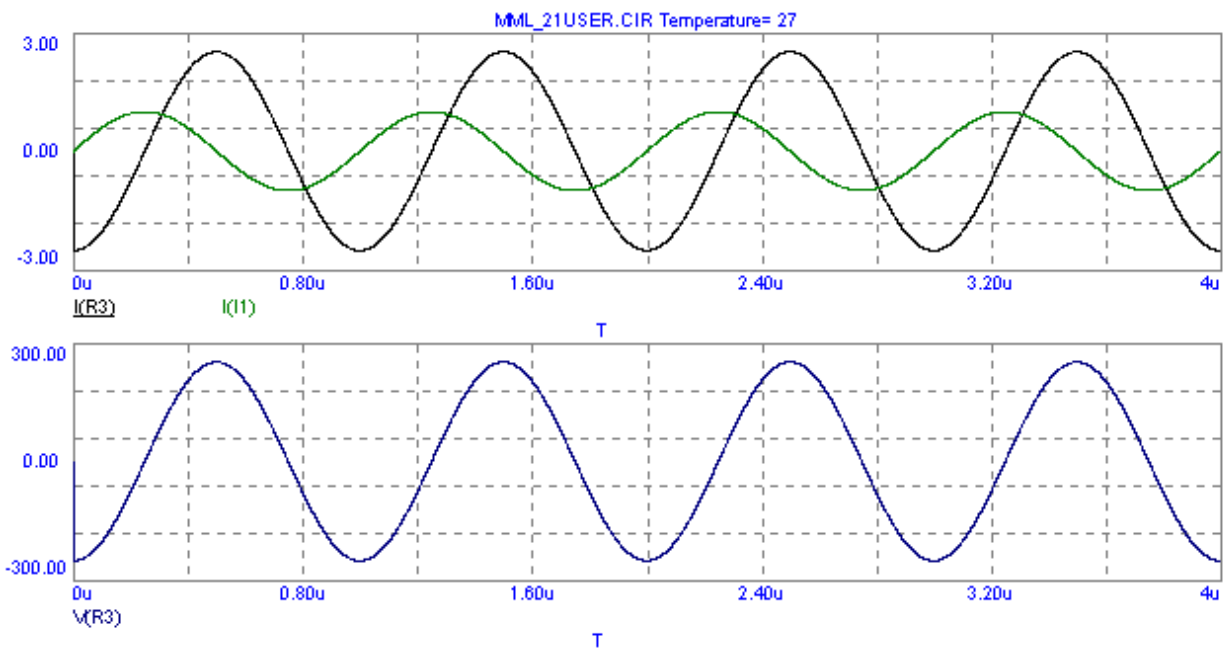


Рисунок 3.17 – Часові залежності струмів та напруг в схемі з ТТМ\_2\_1.

В підрозділі 3.9 синтезовано схемотехнічна модель ТТМ\_2\_1, що має 2 входи, для підключення гілок з максимально можливими струмами. Послідовні схемотехнічні операції взяття похідної цих струмів та множення їх на відповідні електродинамічні параметри (аналог коефіцієнта взаємоіндукції) дозволило сконструювати вираз для електрорушійної сили в контурі,

внаслідок перетину його поверхні потоком вектора магнітної індукції, джерелом якого і є вхідні струми.

### 3.10. Висновок за розділом 3

В розділі 3 розроблені топологічні трансфілдери у вигляді схем імітація впливу потоку вектора магнітної індукції через задані поверхні за для відображення електромагнітного стану ТТМ. З цією метою виконана низка досліджень, результати яких розширюють функціональні можливості пакетів програм САПР КЕ комп'ютерних систем.

Сформульовано головні вимоги, для схеми імітації магнітних потоків. Представлена канонічна структура схеми на базі компонентних елементів MicroCap у вигляді двох залежних джерел електроенергії та диференціюючого блока.

Запропонована процедура побудови складання схем на базі «атомарної канонічної структури», що дозволило побудувати імітаційні моделі впливу магнітних потоків з необхідною кількістю входів та виходів.

Проведено комп'ютерний експеримент на перевірку працездатності запропонованих схем. Результати експерименту, що представлені в у вигляді графічних залежностей, повністю підтвердили правильність наукового обґрунтування їх побудови.

Доповнено бібліотеку макромоделей САПР MicroCap схемами імітації впливу потоків вектора магнітної індукції що, в свою чергу, розширило сферу її застосування.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаної кваліфікаційної роботи по темі: “ **Моделі та методи розробки пасивних компонентів комп’ютерних систем** ” можна зробити наступні висновки.

В основу дослідження були закладені сучасніші методологічні принципи, що ґрунтуються на системному аналізі. Це дозволило розробити моделі, методи та ескізи конструкції трансфілдерів високочастотних ЕК СКС та просунути використання пасивних реактивних компонентів в діапазоні частот, в яких їх застосування в рамках існуючих технологій було неможливе.

Зрозуміло, що для досягнення цілей КРМ такий підхід пов’язаний з розробкою більш складних фізичних та математичних моделей. Ця задача була виконана про що свідчать отримані результати:

- отримало подальший розвиток теоретичне обґрунтування функціонування як двополюсних, так і багатополюсних пасивних реактивних компонентів на основі дослідження взаємоперетворень потоків індукції електромагнітних полів та запропоновані шляхи їх реалізації;

- вперше розроблено моделі, методи та конструктивна реалізація нових КЕ, що дістали обґрунтовану назву трансфілдери за принципами фізичних процесів, що забезпечують їх функціонування;

- отримала подальший розвиток розробка принципів синтезу схем заміщення струмових електромагнітних перешкод у вигляді залежних джерел напруг, що управляються струмами;

- отримало подальший розвиток схемотехнічні моделі обліку електромагнітних перешкод, джерелом яких є струми провідників комунікатора.

- отримала подальший розвиток розробка макромоделей пакету MicroCap імітації перешкод, що створюються магнітними потоками в контурах комунікатора;

- отримала подальший розвиток валідація розроблених методів та схемотехнічного синтезу на основі проведеного комп'ютерно-імітаційний аналізу топологічних трансфілдерів в рамках САПР MicroCap;

- отримало подальший розвиток обґрунтування переваги розроблених КЕ, які дозволяють зменшити енергетичні втрати, збільшити добротність, розширити верхню межу частотного діапазону та зменшити вартість за рахунок заміни благородних металів сегнетоелектричною керамікою.

Таким чином, можна зазначити, що кваліфікаційно робота виконана повністю у відповідності з технічним завданням.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дорфман В.Ф. Эволюция технологий или новая история времени. – М.: Знание, 1990. – 64 с. (Новое в жизни науке, технике. Сер. “Радиоэлектроника и связь”; №11).
2. Смирнов А.И. ИС, БИС, СБИС (Взаимообогащающее развитие технологий). – М.: Знание, 1989. – 64 с. (Новое в жизни науке, технике. Сер. “Радиоэлектроника и связь”; №1).
3. Балакирев М.В., Вохмяков Ю.С., Журиков А.В. и др. Радиопередающие устройства. М.: Радио и связь, 1982 - 256с.
4. Радиопередающие устройства / Под ред. В. В. Шахгильдяна. – М.: Связь, 1980.- 328 с.
5. Проектирование радиопередающих устройств СВЧ: Учеб. пособие для вузов/ под ред. Г. М. Уткина.- М.: Сов. радио, 1979.- 320 с.
6. Проектирование радиопередающих устройств с применением ЭВМ: Учеб. Пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, А.Я. Дмитриев и др.; Под ред. О.В. Алексеева. – М.: Радио и связь, 1987.- 392 с.
7. Справочник по учебному проектированию приёмно-усилительных устройств / М.К. Белкин, В.Т. Белинский, Ю.Л. Мазор и др. – 2-е изд. – К.: Выща школа Головное изд-во, 1988.– 472 с.
8. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределёнными параметрами (справочное пособие). – М.: Наука, 1979, 224 с.
9. Князь А.И. Электродинамика информационных систем. - М.: Радио и связь, 1994. – 392 с.
10. Князь А.И. Электродинамическое обоснование схемотехнического проектирования РЭА. – Одесса: ОЭИС им. А.С. Попова, 1980, 55с.
11. Кудря В.Г. Моделювання електромагнітних перешкод комунікатора електронної апаратури діапазону частот 0,03...3 ГГц./ В кн.: Труды третьей международной научно-практической конференции



"Современные информационные и электронные технологии" — Одесса: СИЭТ-2002, 2002р. с. 52

12. Кудря В. Г. Электродинамическое обоснование адекватности математических моделей радиотехническим цепям. – Автореферат дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук, Одесса: ОЭИС им. А.С. Попова, 1983

13. Кудря В.Г. Расчёт наводимых напряжений в контурах коммутатора/— В кн.: Прикладная электротехника. Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1981, с. 34-39

14. Князь А.И., Кудря В.Г. Электродинамически обоснованные схемотехнические модели параметрического видео усилителя. "Радиотехника", 1985, №6, — М.: Радио и связь с. 87-88

15. Верхопятницкий П. Д., Латинский В.С. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры. – Л.: Судостроение, 1983, - 232 с.

16. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженера. – М.: Энергия, 1980.-344с.

17. Емеличев В.А. и др. Лекции по теории графов – М.: Наука, 1990. 386 с.

18. Кудря В.Г. Збірник методичних вказівок до лабораторних робіт по курсу "Теоретичні основи електротехніки" – Одеса: ОГМІ, 1999, 66 с.

19. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. 775 с.

20. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники./ В 2-х томах. – Л.: Энергоиздат, 1981. 534 с.

21. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. – М. – Л.: ОГИЗ, 1949. – 540 с.

22. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971. 487 с.

23. Гахов Ф.Д. Краевые задачи. \ Изд. 3, - М.: Наука, 1977. 640 с.

24. Гахов Ф.Д., Черский Ю.И. Уравнения типа свёртки. - М.: Наука, 1978. 296 с.

25. Обэн Ж.П. Приближенное решение эллиптических краевых задач. – М.: Мир, 1977. 384 с.
26. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. - М.: Наука, 1967. 460 с.
27. Бухгольц Г. Расчёт электрических и магнитных полей. - М.: ИЛ, 1961. 712 с.
28. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. – М.: Энергия, 1975. 296 с.
29. Кудря В.Г., Миронченко Б.Т. Аналітичний потенціал дискретних поверхонь – Тези доповіді на міжнародній конференції м. Дніпропетровськ “ДНІ НАУКИ – 2005”. 2 с
30. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчёт электрических и магнитных полей. – Пер. с англ., М.: Энергия, 1970. 376 с.
31. Тозони О.В. Математические модели для расчёта электрических и магнитных полей. Киев: Наукова думка, 1964. 304 с.
32. Тозони О.В. Расчёт электромагнитных полей на вычислительных машинах. Киев: Техніка, 1967. 252 с.
33. Шебес М.Р. Теория линейных электрических цепей в упражнениях и задачах. – М.: Высшая школа, 1973. 656 с.
34. Кудря В.Г. Системне проектування функціональних перетворювачів. // Труды пятой международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии" ,17 — 21 мая 2004 г. , Одесса: СИЭТ, 2004, с. 165.
35. Бондаренко М.Ф. та ін. Комп’ютерна дискретна математика. – Харків: «Компанія СМІТ», 2004. 408 с.
36. Список ТОП500 [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.ixbt.com/news/2020/06/23/spisok-top500-vpervye-vozglavil-superkompjuter-na-processorah-arm.html> Останній доступ 19.09.2021
37. Kudrya, V. G. Electrodynamics Settings of the Communicator / V. G. Kudrya // American Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2015. – Vol.

3, No. 6. – P. 130-136. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://pubs.sciepub.com/ajejee/3/6/1> .

38. Kudrya, V. Ways to improve the efficiency of the design components of a computer system / V. Kudrya, V. Sytnikov // International Journal of Current Research [April, 2016] – 2016.–Vol. 8, Issue, 04. P. 29252-29256. [ISSN: 0975-833X] [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.journalcra.com/article/ways-improve-efficiency-design-components-computer-system> .

39. Кудря, В. Г. Моделювання нанотехнологічних електронних засобів. Монографія / В. Г. Кудря. – Україна, Херсон: Олді-плюс, 2013. – 780 с. – ISBN 978-966-2393-4 [Електронний ресурс] - Режим доступу:(каталоги): <http://www.nbu.gov.ua/>

40. Кудря, В. Г. Моделювання швидкодіючих електронних пристроїв / В. Г. Кудря // Вісник НТУУ "КПІ". Серія : Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ, 2013. – №54 – С. 151 – 159. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://radar.kpi.ua/index.php/radiotechnique/article/view/453/667> . – Дата доступу 24.09.16.

41. Нанотехнология / Википедия. Свободная энциклопедия // [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F> . – Дата доступа : 25.09.16.

42. Князева, Н. О. Теорія проектування комп'ютерних систем і мереж. Ч. 1. Основи системного підходу до проектування: Навчальний посібник / Н.О. Князева, О.А. Князева. – Одеса: ВМВ, 2008. 212 с.

43. Князева, Н. О. Теорія проектування комп'ютерних систем і мереж. Ч. 2. Методи аналізу і синтезу комп'ютерних мереж: Навчальний посібник / Н.О. Князева. – Одеса: СПД Бровкін О. В., 2012 – 240 с.

44. Канер, С. Тестирование программного обеспечения. Фундаментальные концепции менеджмента бизнес-приложений: пер. с англ. / Сэм Канер, Джек Фолк, Енг Кек Нгуен. – Киев: ДиаСофт, 2001. – 544 с.

45. Тимченко, А. А. Основы системного проектирования та системного аналізу складних об'єктів: Основы системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки: навч. посібник / А. А. Тимченко. – Київ: Либідь, 2004. – 288 с.

46. Рівняння Максвелла [Електронний ресурс] - Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%96%D0%B2%D0%BD%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8F\\_%D0%9C%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B0](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%96%D0%B2%D0%BD%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%9C%D0%B0%D0%BA%D1%81%D0%B2%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B0) Дата доступу : 25.09.2021.

47. Иосель, Ю. Я. Расчёт потенциальных полей в энергетике. Справочная книга / Ю.Я. Иосель. - Л. : Энергия, 1978. - 351 с.

48. Иоссель, Ю. Я. Расчёт электрической ёмкости – 2-е изд. перераб и доп. / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – Л. : Энергоиздат. 1981 – 288 с.

49. Калантаров, П. Л. Расчёт индуктивностей: Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд. перераб и доп. – Л. : Энергоатомиздат. 1986. – 488 с.

50. Патент. 95381 Україна, МПК (2014) H01F 27/34 / В. Г. Кудря, С. П. Кудря . Ємнісний трансформатор / — № u 2014 06627; заявл. 13.06.14 ; опубл. 25.12.14, Бюл.№ 24. — 1 с. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search> . Дата доступу: 13.10.16.

51. Патент 112665 Україна, МПК (2014) H01F 27/34 / В. Г. Кудря, С. П. Кудря. Ємнісний трансформатор / — № a201406626; заявл. 25.12.14; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19/2016. — 1 с [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search> . Дата доступу: 13.10.16.