

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Одеська політехніка»
Навчально-науковий інститут штучного інтелекту та робототехніки
Кафедра комп'ютерних систем

Слюсаренко Володимир Юрійович,
студент групи УК-161

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Дослідження об'єктно-орієнтованих моделей швидкодіючих електронних
пристроїв

Спеціальність:

123 - Комп'ютерна інженерія

Спеціалізація, освітня програма:

Спеціалізовані комп'ютерні системи

Керівник:

Стрельцов Олег Васильович,

к.т.н., доцент

Одеса – 2021

З М І С Т

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП	11
1 ВЗАЄМОУЗГОДЖЕННЯ ПРАВИЛ ТА ВИМОГ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	18
1.1 Принципи побудови систем автоматизованого проектування.....	18
1.2 Критерії внутрішньої електромагнітної сумісності електронних нановиробів	21
1.2.1 Види критеріальних оцінок оптимальності нановиробу	21
1.2.2 Схемотехнічні критерії оптимізації	22
1.2.3 Конструктивні критерії	22
1.3 Чутливість по дескрипторам моделі	24
1.4 Структурна схема системи проектування	25
1.5 Підсумок та пропозиції за розділом 1	29
2 КОМПОНЕНТНО КОМУНІКАТОРНІ РІВНЯННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	31
2.1 Декомпозиція електричного кола на компоненти та комунікатор	31
2.2 Компонентні рівняння	33
2.3 Компонентно-комунікаторні рівняння	39
2.4 Матричне рівняння комунікатора	42
2.5 Базова модель функціонального перетворювача.....	50
2.6 Підсумки та пропозиції за розділом 2.....	55

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

3 РОЗРОБКА АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ	59
3.1 Адаптивні алгоритми.....	59
3.2 Модель з фізичними дескрипторами процесу	60
3.3 Метод струмів полюсів	64
3.4 Метод напруг дуг компонентів.....	67
3.5 Дедуктивне моделювання нанотехнологічної електроніки.....	70
3.5.1 Допоміжні розрахункові дескриптори	70
3.5.2 Контурні дескриптори	72
3.5.3 Струмові математичні моделі.....	74
3.6 Індуктивні способи моделювання	75
3.6.1 Стратегія отримання моделі	75
3.6.2 Напругові дескриптори, як фізичні величини.....	76
3.6.3 Напругові дескриптори дерев, контурів та компонентів	77
3.7 Структурна схема адаптивних алгоритмів	81
3.7.1 Критерії вибору методу схемотехнічного аналізу.....	81
3.7.2 Аналіз первинних даних.....	82
3.8 Висновки та пропозиції по розділу 3	84
ВИСНОВКИ	87
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	91

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВІС – велика інтегральна схема
ДВЧ - дуже високі частоти - (30...300) МГц
ЕГ – енергогрань
ЕЗ - електронні засоби
ЕК – електричне коло
ЕП – електронний пристрій
КЕ – композиційний елемент
МСК – метод струмів компонентів
МКС – метод контурних струмів
МНД – методами напруг дуг
МСД – метод струмів дерев
МСП – метод струмів полюсів
НВЧ - надвисокі частоти – (3...30) ГГц
ІКЗ - інфокомунікаційні засоби
ОВНС однозначне визначення напруг та струмів
ПП – площинно паралельні
РТЦ – радіотелевізійний та цифровий
САПР – система автоматизованого проектування
СКС – спеціалізовані комп'ютерні системи
СП – сферо паралельні
УВЧ - ультрависокі частоти – (0,3...3) ГГц
АС – змінний струм (частотна область)
ДС – постійний струм

ВСТУП

Методи проектування компонентів спеціалізованих комп'ютерних систем (СКС), робототехніки та інших електронних засобів (ЕЗ) містять суттєві недоліки, що пов'язані з недостатнім рівнем узагальненості, структуризації та спадковості окремих етапів їх проектування. Якщо на ранніх «низькочастотних» етапах розвитку електроніки вказані недоліки практично не проявлялись, то на високих частотах та швидкостях обробки сигналів, що сягають 10^{16} флопсів ці недоліки суттєво гальмують розвиток інфокомунікаційних технологій.

Розвиток нанотехнологій, всепроникність яких в різні сфери діяльності людини: вивчення структури макрокосмосу, відновлювальної енергетики, мікросвіту, інфокомунікацію, медицину, біоелектроніку, геоінформаційні системи різноманітного призначення тощо – вимагає нових досліджень що відбивають рівень сучасних технологій та сприяють їх розвитку. Саме до цієї проблеми прикута увага в кваліфікаційній роботі «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв» в якій в системний спосіб розробляються нові та удосконалюються існуючі фізичні та математичні моделі високочастотних (швидкодіючих) електронних пристроїв.

Інтегруючи широкий спектр різноманітних наукових напрямів в єдине цілеспрямоване русло по моделюванню нанотехнологічних електронних пристроїв тематична спрямованість роботи практично повністю задовольняє вимогам 123 спеціальності – комп'ютерна інженерія. Зокрема в ній представлена концептуальна модель в рамках якої розробляються адаптивні методів аналізу швидкодіючих електронних аналогових та цифрових засобів інфокомунікаційних технологій.

Достатньо широкий список рекомендованої літератури включає з півтори сотні найменувань, не лише друкованих, а і електронних інтернет-видань.

Технології проектування та виробництва високочастотних інфокомунікаційних засобів: дуже високочастотного – {30...300} МГц (ДВЧ), ультрависокочастотного

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

{300...3000} МГц (УВЧ) та надвисокочастотного – {3...30} ГГц (НВЧ) діапазонів на сьогодні різко дисонує методам їх проектування, а тому представляється достатньо актуальною.

Метою дослідження є розробка системних [8...10, 13...15, 20, 21, 27, 31, 35, 36, 49, 58, 59, 67, 71...75, 80, 81, 85...87, 92, 113, 117, 123, 131, 141, 157] методів аналізу, в яких окрім класичних процедур схемотехнічного проектування закладені алгоритмічні способи системного віддзеркалення електромагнітних перешкод та інших природничих явищ. Дослідження спрямоване на удосконалення технологічних процедур виготовлення високопродуктивних електронних нанозасобів шляхом адекватно-структурного відображення їх морфології.

Моделювання інфокомунікаційних засобів (ІКЗ) в зазначених діапазонах частот нашою вважається на необхідність використання моделей як зосереджених, так і розподілених у просторі компонентів та сигналів [71]. При цьому системних способів суворого обліку електромагнітних впливів комунікаторів [72...75] та не автономності компонентів не існує. А тому уточнення цілі роботи складає розробка фізико-математичних моделей, що відрізняється системним аналізом впливу електромагнітних перешкод та інших факторів, які впливають на надійність, швидкодію, енергозатратність та інформаційний захист ІКЗ. Іншими словами дослідження спрямоване на аналіз та синтез таких моделей СКС, що дозволили б створювати нові, або модифікувати існуючі системи моделювання ІКЗ з урахуванням внутрішнього та зовнішнього електромагнітного стану. Приклад системного підходу, що ілюструється роботою, може бути використаний і для обліку інших природничих явищ, що закладені в фізичні процеси функціонування нановиробів або використовуються під час технологічних процесів їх реалізації.

Враховуючи що такі програмні продукти як MicroCap 9, OrCAD 16, EWB, MultiSim 7, MatLab R2008b - Simulink – не мають відповідних процедур обрахування електромагнітного впливу комунікатора на робочі характеристики, дану роботу можна вважати певним науковим досягненням в сфері проектування та розробки нових більш досконалих моделей спеціалізованих СКС.

Суттєвою відмінністю запропонованих новацій є розробка системних методів аналізу швидкодіючої електронної апаратури. Сучасні мікро- та нанотехнології ІКЗ не

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

мають достатньо серйозних системних методів, що забезпечували б їх наскрізне проектування від структурно-логічного до конструкторсько-технологічного етапів. Зрозуміло, що в така постановка проблеми в повному об'ємі не вирішує. Для розв'язання сформульованої масштабної науковотехнічної задачі необхідні додаткові дослідження та наукові пошуки, які за певних умов можуть суттєво вплинути на економічний розвиток багатьох країн світу. Для цього необхідно не лише фінансування, а і переосмислення низки філософсько-гносеологічних проблем, суть яких пояснюється нижче.

Швидкоплинний біг часу та величезний обсяг інформації на сьогоднішньому етапі розвитку людства вступають в протиріччя. Дійсно, кількість та об'єм наукових публікацій в різноманітних виданнях, в тому числі інтернетвиданнях, майже не залишають шансів на її опрацювання, принаймні однією людиною. Причому тенденції невідповідності психофізичних та інтелектуальних можливостей індивіда до системного відслідковування наукових робіт, навіть в вузькопрофільній науковій галузі посилюються. Неважко спрогнозувати, що наступить час «ікс», після якого серйозною науковою роботою займатись в індивідуальному порядку буде неможливо.

До того ж, колективний розум, створює більш глибоку прірву між “науковими одинаками” та “науковими колективами”. Ще більш дивною та вражаючою стає ситуація коли працюючи, практично по одним і тим же напрямам, різні наукові школи не лише не визнають одна одну, а навіть не намагаються порозумітися. Останнє стосується не лише маловідомих академіків та професорів, а й лауреатів Нобелівських премій. В контексті викладеного можна стверджувати, що “конфлікти” між науковими напрямами лежать не в площині квазінаукових підходів однієї із сторін, а в площині браку часу на сумісний детальний аналіз протиріч.

Враховуючи, що за “спинами” Нобелівських лауреатів стоять чималі колективи, можна зробити ще один важливий висновок, що інформаційні тайфуни поглинають не лише окремих аматорів науки, а цілі колективи.

Як бачимо, при продовженні існуючої системи освіти (а саме її, на наш погляд, треба змінювати кардинально) та методів обміну науковою інформацією, людство підстерігає науковий хаос та колапс.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Що до першої тези, то виникають сумніви: “А до чого тут освіта?”. На перший погляд освіта дійсно не причетна до інформаційного хаосу. Але як можна відшукати потрібну інформацію в інформаційному океані ? А відповідь проста! Використайте накопичений багаж знань не на пошуки, а на самостійне її створення в ланцюжку реалізації власної ідеї. Дійсно, якщо ви загубили голку в скірті сіна, то чи не краще припинити пошук, взяти іншу голку та пришити гудзика ?

Аналогічно можна вчинити з інформацією, яку Ви бажаєте отримати. Тобто, якщо Вам невідомі якісь наукові факти, чи результати математичного аналізу, спробуйте створити їх самостійно, як винахідник. А саме, проведіть фізичне моделювання, створіть математичну модель, проаналізуйте отримані результати, порівняйте результати з експериментом. Саме на такий спосіб діяльності мусить орієнтувати освіта майбутніх інженерів, дослідників та науковців.

Інший рецепт, що до подолання кризи, слід шукати в системності наукових досліджень. Інформаційні знання, що накопичуються по певним науковим напрямам, повинні філософськи переосмислюватись з кожним новим відкриттям, з кожним новим науковим фактом, що заслуговує на увагу. Кількість старих фактів та відомостей, що потрапляють в навчально-пізнавальну літературу повинно скорочуватись. Ракурс переосмислення накопичених знань повинен бути спрямований на вживання найбільш узагальнених понять та законів, що не звужують, а розширюють їх в даній сфері. Протиріччя між об'ємом накопичених фактів та скороченням інформаційної частини усувається при застосуванні філософського закону переходу кількості інформації в якісно нову інформацію. Якісна переробка можлива лише за умов системних досліджень явищ на основі аналізу окремих фактів та синтезу їх прояву в рамках узагальнених фізикоматематичних моделей. При цьому слід знаходити перетини одних наукових напрямів з іншими. Об'єкти, що досліджуються, мусять розглядатися різнопланово з позицій теорії складних систем. Дескриптори (тобто фізичні величини, які описують поведінку системи та її стани) мусять бути узагальненими та працювати для якомога більшої кількості окремих елементів складної системи. Якщо маємо справу з різнорідними її елементами, то для опису поведінки складної системи треба віднаходити такі дескриптори, що описують складну систему, як єдине ціле, що складається з окремих частин. Складна система може розглядатись як об'єкти, в яких

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

мають місце різні за фізичними проявами явища, але для використання системного аналізу, виявлені зв'язки цих об'єктів, або певні відношення повинні характеризуватись однозначними фізичними величинами для всіх без винятку елементів множини складної системи. Іншими словами відомості про ці елементи мусять бути складені, як мозаїка, в єдину теоретичну узгоджену з введеною аксіоматикою картинку. У випадку взаємозв'язку різнохарактерних (фізичних, хімічних, біологічних, ядерних тощо) складових об'єктів доцільніше використовувати енергетичні дескриптори. Але в багатьох випадках математичне та фізичне моделювання спрощується при виборі інших оптимальних величин, які можуть і не мати фізичного сенсу, а існувати в вигляді математичних, чи напівфізичних абстракцій. Як зразок таких абстракцій в дослідженні часток мікросвіту можуть бути, поняття “струни”, з яких, як вважають сьогодні фізики, складаються кварки.

Переконавшись в плідності системних методів дослідження, перейдемо до обґрунтування застосування цих методів для проектування швидкодіючих функціональних перетворювачів (ФП). До ФП відносять двох, або багатополюсні пристрої, під якими розуміють інтегральні мікросхеми, цифрової техніки, окремі компоненти різноманітних систем. До таких систем можна віднести телекомунікації системи, системи управління технологічними процесами; системи інформаційних технологій; електронні дидактичні навчальні системи, нейросистеми 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 ФП ґрунтуються на різноманітних фізичних та хімічних явищах. Деякі з ФП, наприклад, мікропроцесори та мікропроцесорні комплекси, програмовані логічні схеми, 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 ФП 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

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

аналізаторів, наприклад, іонізаційні, теплові, хроматографічні, то можна уявити спектр різноманітних теорій та технологій розробки ФП різноманітного призначення.

Аналізуючи технології виготовлення ФП, слід звернути увагу на те, що вона прогресує від механічної обробки твердих речовин, до технологічних конвеєрів хімічних реакцій речовин, що взаємодіють між собою на рівні орбітальних станів електронів, атомів та молекул, до технологій мікро- та нановсесвіту 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 самих ФП. 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 [52, 58, 59, 117, 144], що вже сьогодні дозволяє виготовляти ФП 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 так і хімічних явищ, що можуть мати місце в процесі нанесення пошарових атомарних (молекулярних) речовин з відповідним рівнем опромінення (радіаційного, лазерного, бомбардування частками тощо) на заданих за технологією шарах. При цьому, за необхідності, можна проводити діагностичні операції, як незалежні, так і такі, що керують технологією в цілому, або експозицією на кожному кроці пошарового 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, як на наш погляд, певні рівні технологій, мусять відповідати певним рівням психологічного та морального стану як окремих індивідів, так і суспільства в цілому, за для продовження його існування. Саме системність вимагає паралельне дослідження сумісності біологічних об'єктів з

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

технологічними принципами, що забезпечують існування людини в злагоді з існуючим середовищем. При цьому «техногенне навантаження» на середовище, як категорія, мусить підпорядковуватись узагальненій категорії «шкоди екосистемі в цілому», а не лише людині. Іншими словами, не треба «вчити» природу, з нею треба жити в злагоді та в мирі, як, наприклад, живуть бджолині сім'ї.

Таким чином, з визначення об'єкту дослідження, випливають і методи що закладені в його основі. Зокрема, це системний метод аналізу, що використовує різноманітні фізичні явища, які описують ФП, як складну систему. Для розробки математичних моделей планується використання теорії математичної фізики при розв'язанні крайових задач, теорії матриць для опису системної математичної моделі, теорії електромагнітного поля та інтегральних рівнянь для обчислення параметрів комунікатора, теорії системотехніки та структуризації матеріальних об'єктів тощо.

Переконавшись в необхідності використання системних методів аналізу при розробці проекту перейдемо до конкретики.

У відповідності зі спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», моделювання компонентів та комунікаторів, в першу чергу, розглядається з позицій інформаційних технологій забезпечення проектування нанотехнологічної електроніки. Для цього вперше виділені певні класи методів аналізу з адаптивними властивостями, що враховують морфологічну структуру ФП. В результаті створені нові, як алгоритмічні, так і організаційні способи проектування нанотехнологічних ФП. Відмінною рисою запропонованих новацій стала можливість створення адаптивної САПР, критерій вибору алгоритму аналізу якому передують дослідження морфологічної структури нановиробу.

Equation Chapter 1 Section 1

1 ВЗАЄМОУЗГОДЖЕННЯ ПРАВИЛ ТА ВИМОГ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1 Принципи побудови систем автоматизованого проектування

Достатньо складній системі [137], якою є комп'ютерна система автоматизованого проектування в повній мірі можна дати універсальне означення [68]: об'єктивна єдність елементів, зв'язків, цілі та спостерігача (розробника). Причому це означення стосується як внутрішньої (яка розробляється), так і зовнішньої (якою користуються) структури САПР.

Створення САПР нанотехнологій представляє собою велику науково-технічну проблему, її впровадження вимагає значних капіталовкладень. На поточний момент людство накопичило величезний досвід по розробці різноманітних САПР, що застосовуються у всіх сферах людської діяльності: мистецтво; гуманітарна сфера (соціологія, юриспруденція); медицина (діагностики, психологія, лікування) технологічна (електроніка, архітектура, машинобудування), екологічна (геоінформаційні системи, метеорологія); інфокомунікаційна (комп'ютерні мережі, масове обслуговування, зв'язок тощо); управління процесами (експертна); освіта; наукова діяльність; – далеко не повний перелік напрямів по кожному з яких існують по декілька конкурентно–спроможних САПР.

Разом з тим, як на мій погляд, найменше уваги приділяється технологіям розробки самих САПР. Універсальної програми, що конструювала (проектувала) сам САПР, (тобто САПР САПРу) будь-якого призначення не існує. Разом з тим, нагромаджений людством досвід по створенню предметних САПР надає можливість окреслити основні засади побудови САПР САПРів. Розглянемо основні засади, які повинна задовольняти така система.

1. Взаємодія між людиною та машиною. Незважаючи на те, що процес проектування є автоматизованим і рутинну обчислювальну роботу виконує комп'ютер, значну роль в них відіграє людина — фахівець, що розробляє проект технічного засобу. В діалозі з системою проектування при прийнятті вузлових рішення головна роль належить людині. Проектант мусить вирішувати, які з завдань є формалізованими, а які потребують певних евристичних здібностей, що не залежить від потужностей

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

комп'ютерної техніки. Тісна взаємодія людини та комп'ютера в процесі проектування — найважливіший принцип побудови та експлуатації САПР.

2. Ієрархія. САПР реалізує комплексний підхід до автоматизації всіх рівнів проектування. Ієрархія рівнів проектування відбивається у структурі програмного забезпечення на різних рівнях ієрархічних елементів, що віддзеркалюють підсистеми. Чудовим прикладом такої САПР є системи проектування локальних комп'ютерних мереж: Netcracker, Cisco, тощо – що дозволяють ієрархічно-структурне проектування у вигляді вкладених одна в одну мереж. Автоматизація проектування лише одного з ієрархічних рівнів виявляється непродуктивною у порівнянні з повним програмним забезпеченням усіх рівнів. Проектування ієрархічних структур доцільно забезпечувати технічними засобами, що дозволяють розпаралелювати роботу через використання розподілених можливостей САПР як на центральному обчислювальному комплексі, так і на периферійних автоматизованих робочих місця проєктантів.

3. Сукупність інформаційно-узгоджених підсистем. Це важливий принцип, стосується як зв'язків між великими підсистемами, так і зв'язків між дрібнішими частинами підсистем. Інформаційна узгодженість вимагає виконання проекту інформаційно-узгодженими програмами. Дві програми є інформаційно-узгодженими, якщо вихідні дані, однієї з програм не потребують змін під час переходу в масив вхідних даних іншої програми. Якщо для узгодження програм потрібно істотна переробка загального масиву з участю людини, який додає відсутні параметри, вручну перекомпоновує масив чи змінює числові значення окремих параметрів, то програми вважаються інформаційно-неузгодженими. Подібне перекомпонування даних веде до істотних часових затримок, зростанню кількості помилок, і тому зменшує конкурентоздатність програмного продукту. Інформаційна неузгодженість перетворює САПР в сукупність автономних програм, результати роботи яких неможна оцінити іншими підсистемами, чим знижується якість проектних розв'язків.

4. Відкритість системи та її розвиток. Існує, як мінімум, дві вагомні причини, з яких САПР мусить бути мінливою у часі системою. По-перше, розробка такого складного об'єкта, як САПР, займає тривалий час, й економічно вигідно вводити в експлуатацію частини системи по мірі їх готовності. Запроваджений в експлуатацію базовий варіант системи в подальшому розширюється. По-друге, постійний прогрес

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

техніки, об'єктів проектування, обчислювальної техніки та обчислювальної математики призводить до появи нових, досконаліших математичних моделей і програм, які мають замінювати старі, менш вдалі аналоги. Тому САПР мусить бути відкритою системою, тобто мати властивість використання нових методів, принципів та засобів проектування.

5. Суперечливість між уніфікацією та спеціалізацією завжди була предметом дискусій. САПР — спеціалізована система з максимальним використанням уніфікованих модулів. Висока ефективність, що виражається передусім малими часовими і матеріальними витратами під час вирішення проектних завдань, забезпечується, як правило, спеціалізацією систем. Вочевидь спеціалізація звужується коло завдань системи, що потребує для кожного з таких завдань окремої САПР.

З іншого боку, щоб знизити витрати на розробку багатьох спеціалізованих САПР, доцільно використовувати її складові частини, з максимально можливим рівнем уніфікації. Необхідною умовою уніфікації є пошук спільних рис і положень в моделюванні, аналізі та синтезі різнорідних технічних об'єктів, якими і являються нанотехнологічні засоби інфокомунікаційних технологій.

6. САПР мусить бути об'єктно-орієнтованим програмним продуктом у тому розумінні, що його модулі і сам їх списочний склад мусять орієнтуватися не на увесь клас в цілому, а на окремий об'єкт цього класу. Початковим кроком проектування мусить бути дослідження інформації про об'єкт та первинний вибір програмних модулів. Зрозуміло, що список модулів в процесі проектування може змінюватись шляхом заміни, добавлення або вилучення одного (декілька) модулів в залежності від результатів проектування. Підставами для такої адаптивної структури САПР можуть слугувати недоліки відомих програмних пакетів радіоелектроніки: Spice, MicroCap, OrCad, MultiSim, Atium Design – що дістали світове визнання. Можна вказати як мінімум на два недоліка: по-перше, імітація процесів, тобто такі види аналізу як DC, AC, TC не орієнтуються на топологію електричного кола, яка є підставою вибору оптимального алгоритму аналізу, по друге, лінеаризація характеристик в робочій точці та заміна в цій точці компонентів на лінійні не дозволяє правильно відтворювати імітацію роботи нелінійних компонентів в режимі «великого сигналу». Уникнути такого недоліку можна, наприклад, заміною моделі компонента з лінійної на нелінійну,

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

що вимагає зміну програмного модуля опису моделі компонента. Як одна з можливостей модифікації алгоритму пов'язується з заміною нелінійної характеристики компонента ламаними прямими відрізками в залежності від рівня сигналу. Оскільки в задачах аналізу електронних пристроїв рівні сигналу заздалегідь невідомі, стає очевидною і необхідність заміни одного модуля на інший під час числової імітації роботи компонента.

Ліквідацію першого недоліку можна здійснити за попереднім аналізом кількості усіх полюсів, вузлів, гілок та видів (резистор, індуктивність, ємність), компонентів в перерахунку: один компонент – одна гілка. Порівняння цих відомостей дозволило б обрати як вид аналізу, так і спосіб (числовий, аналітичний, якісний за умов нелінійності), що орієнтується на конкретний об'єкт проектування.

Таким чином, система проектування складних об'єктів має свої внутрішні закони та правила самоорганізації, частина з яких висвітлена в даній роботі.

1.2 Критерії внутрішньої електромагнітної сумісності електронних нановиробів

1.2.1 Види критеріальних оцінок оптимальності нановиробу

Критерії оптимізації, які висуваються на етапі проектування нановиробу можуть бути сформульовані, як в термінах схемотехніки на рівні дескрипторів математичної моделі нановиробу, так і на рівні конструкторсько-топологічної метрики.

Якщо серед критеріальних оцінок превалує будь-яка одна з них то, таку оцінку будемо називати скалярною. У разі висування критерію, що об'єднує сукупність зважених різноманітних критеріїв їх можна назвати векторними, або матричними критеріями. До таких множинних різнохарактерних критеріїв можуть бути віднесені: множини струмів, та(чи) напруг, що генерують електромагнітні поля, які формують як внутрішню, так і зовнішню електромагнітну сумісність; енергетичний критерій розподілу по координатах нановиробу потужності енергетичних втрат на тепло; певні конструктивно-технологічні геометричні критерії та фізичні властивості (тканинна гнучкість, твердотіла жорсткість, плавучість, або навпаки, занурювальність, електромагнітна прозорість, термостійкість, радіаційна стійкість тощо). Певна неузгодженість та плутанина цих критеріальних оцінок оптимізації інколи призводить

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

до неправильного їх вживання в алгоритмах оптимізації конструкції – нехтуванням суттєвими та зайва деталізація несуттєвих чинників.

Нанотехнології функціональних перетворювачів, з одного боку не дозволяють створювати автономні компоненти, а з іншого – провокують суттєві електромагнітні взаємовпливи композиційних елементів ФП. Зі зменшенням міжкомпонентних відстаней, що при тих же самих рівнях джерел електромагнітного поля, що спотворює ланцюгову структуру нановиробу. Тому серед множини різноманітних дестабілізуючих чинників, в першу чергу необхідно електромагнітну не автономність композиційних елементів. Алгоритми, що розв'язують конструктивні задачі реалізації об'ємної ФП: прокладка міжкомпонентних з'єднань, окрім розв'язку головної задачі, - повинні в першу чергу мінімізувати електромагнітний вплив комунікатора, а через те і решту взаємообумовлених задач, наприклад, задач теплорозподілу по об'єму нановиробу.

Таким чином, серед різноманітних заважаючих впливів електромагнітна внутрішня сумісність виділена як основна серед тих, що може порушувати корисні властивості (характеристики) нановиробу.

1.2.2 Схемотехнічні критерії оптимізації

До схемотехнічних видів критеріїв віднесемо такі, що накладають певні вимоги на дескриптори математичної моделі: струм, напруга, потужність, фантомні коефіцієнти зворотного та прямого зв'язку, потужність, відношення сигнал/шум тощо. У цьому випадку критеріальними оцінками можуть бути мінімаксні значення цих величин з певним «страхувальним» множником, що посилює цю оцінку в межах достатньої для практики точністю. Окрім того, не зайвою буде використання такої оцінки, як кількість інформації та пропускна спроможність [68] комунікатора.

1.2.3 Конструктивні критерії

Критерії, що в класичному варіанті впливають з конструкторсько-топологічного етапу проектування нановиробу, перш за все, визначаються геометричною метрикою: лінійні поверхневі та об'ємні розміри. Менш важливими є

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

критерії ваги, та надійності. Остання може бути визначена з наперед заданою ймовірністю, шляхом паралельно-послідовного дублювання. Механічна жорсткість гнучкість, та аморфність, стійкість працездатності в агресивних середовищах, та в середовищі з замежними параметрах довкілля: вологість, температура, теплова радіація, радіоактивний розпад, можливість саморозпаду та розкладу на певні інгредієнти, що самотужки виводяться з організму, довговічність – все це може бути предметом складання векторно-матричних критеріїв оптимізації конструкції нановиробу. Не варто залишати по за увагою критерії конструктивної (а не схемотехнічної) електромагнітної секретності, під якою слід розуміти розробку комунікаторних структур з протилежними властивостями:

- локалізація власного випромінювання супроводжується підвищення чутливості до сторонніх електромагнітних імпульсів;
- захист від сторонніх електромагнітних імпульсів супроводжується підвищеними рівнями власного випромінювання електромагнітної енергії.

Системний підхід до методів вибору критеріїв оптимізації дозволив виявити цілу низку як неточних понять та уявлень про нанотехнології електронних пристроїв, так і способів досягнення сформульованих критеріїв оптимальності. Як приклад системного підходу можна запропонувати використання нанотехнологічних електронних комунікаторів разом з комунікаторами тепла, що може бути доставлено, або відведено з певних зон нановиробу для задоволення вимог по тепловому режиму. Очевидно, що розв'язок таких задач окремо одна від одної призводить до використання додаткових охолоджувачів, як наприклад, радіаторні, чи вентиляторні охолоджувачі комп'ютерних мікропроцесорів, що суттєво погіршує, або зводить нанівещь нанотехнологічну мініатюризацію у зв'язку зі збільшенням розмірів комп'ютера в цілому.

Необхідно додатково зауважити, що плутанина в критеріальних оцінках, та заміна схемотехнічних критеріїв конструктивно-технологічними призводить до певної невідповідності між заявленими можливостями окремих САПР та реально отриманими результатами проектування. Як класичний приклад, слід вказати на вимогу мінімізації сумарної довжини усіх доріжок друкованих плат при розв'язанні задач трасування, що далеко не завжди відповідає мінімізації електромагнітного впливу комунікаторної структури нановиробу на його характеристики.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Таким чином, в підрозділі розглянуті множинні критерії оптимізації нановиробу з їх класифікацією по рівням важливості та виділення найважливішого з них – електромагнітної внутрішньої та зовнішньої сумісності.

1.3 Чутливість по дескрипторам моделі

Як відомо, коректне формулювання задачі вже містить в собі як мінімум половину її розв'язку. Скориставшись принципами системного моделювання, [71...75, 80, 81, 85...88] можна запропонувати як схемотехнічні, так і конструкторсько-технологічні критерії мінімізації впливу комунікатора на характеристики нановиробу.

Схемотехнічні критерії. Якщо допустити, що цільовою функцією оптимізаційної задачі є функція перетворення

$$F = F(I_1, \dots, I_M, U_1, \dots, U_M) \quad (1.1)$$

де $I_1, \dots, I_M, U_1, \dots, U_M$ модулі дескрипторів математичної моделі (струми полюсів та напруги дуг компонентів), то приріст значення функції (1.1) за рахунок можливих варіацій зміни аргументів

$$dF = \frac{\partial F}{\partial I_1} dI_1 + \dots + \frac{\partial F}{\partial I_k} dI_k + \dots + \frac{\partial F}{\partial U_k} dU_k + \dots + \frac{\partial F}{\partial U_M} dU_M \quad (1.2)$$

що надає можливість оцінити допустиму величину варіації дескриптора в робочій точці [21, 31, 35, 64, 107, 128, 131]

$$\Delta I_k \approx \alpha_k^I \Delta F_I; \quad \Delta U_k \approx \alpha_k^U \Delta F_U, \quad (1.3)$$

де $\Delta I_k, \Delta U_k$ – максимально допустимі критеріальні оцінки k-х дескрипторів; α_k^I, α_k^U – чутливість функції перетворення до відповідного k-го дескриптора, яка дорівнює значенню приватній похідній похідної, обчисленої в робочій точці [86], [151, 155, 157]; $\Delta F_{I(U)}$ – максимально допустиме відхилення, що встановлюється технічним завданням.

Конструктивно-технологічні критерії також встановлюють на основі (1.1) у випадку їх подання через параметри компонентних рівнянь [75, 80]. Причому, як і у випадку побудови схем заступу комунікатора, таке порівняння можливе, як на рівні опосередкованих, так і на рівні безпосередніх параметрів. Алгоритми обчислення аргументів функції (1.1) приводяться в розділі 3.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Представлені результат обчислення чутливість до зміни дескрипторів математичної моделі надають можливість оцінити рівень небезпечних відхилень від номінальних характеристик та прийняти відповідно конструктивні, або схемотехнічні зміни на етапі проектування РТЦА якщо ці відхилення перевищують допустимий рівень.

1.4 Структурна схема системи проектування

Системні фізикоматематичні моделі РТЦА ЕЗ [71...75, 80, 81, 85...89], що складають предмет дослідження, в достатній мірі складні. В перекладі на мову сучасних САПР їх алгоритмізація визначається одночасною тематичною направленістю та складністю пакетів: схемотехнічного (MicroCap, MultiSim, OrCAD); конструктивно-топологічного (Atium Design): електродинамічного (MicroWave Office) – проектування. Але САПР нанотехнологій, це не проста арифметична сума окремих САПРів, а якісно нове моделювання, що відрізняється від зазначеної сукупності пакетів практично по усім пунктам вимог підрозділу 1.1 та представляє цілу низку нових можливостей, які не можуть бути принципово отримані на основі існуючих пакетів. САПР, що розробляється в даній роботі, ґрунтується на системній математичній моделі, яка увібрала в себе специфіку нанотехнологій, оперує єдиними дескрипторами, що пронизують усі етапи проектування від початку до самого кінця. Зрозуміло, що виконання аналізу навіть найпростіших схем вручну, без створення відповідної САПР практично неможливо. Запропонована модель знайде свого споживача лише за умови розробки відповідного САПР у вигляді програмних продуктів для персональних комп'ютерів. Саме з цих позицій в цьому підрозділі, як перший крок до реалізації цієї ідеї, розглядаються принципові засади на яких ґрунтується САПР нанотехнологій.

1. Для початку розглянемо принципи побудови структурної схеми такої САПР, основні елементи фізико-математичної моделі якої приведені в [71, 72, 80, 81, 140, 141]. Враховуючи складність функціональних взаємозв'язків між різноманітними частинами такої схеми можна цілком впевнено стверджувати, що її детальне графічне зображення в повному об'ємі практично неможливо. Принаймні в двомірному просторі за умов відсутності компланарності окремих елементів схему побудувати

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

неможливо принципово. Іншими словами зображення взаємозв'язків складної системи необхідно переводити в багатомірний простір. Але при цьому виникає сумнів в доцільності такого зображення: для алгоритмічної комп'ютерної обробки таке зображення практично не має сенсу, а для суб'єктивного охоплення усіх зв'язків людським інтелектом така схема також не несе корисної інформації. Вихід з цієї дилеми існує у використанні структурного програмування, із застосуванням принципів послідовності, паралельності та вкладеності структурних елементів САПР один в інший. Найбільш придатними для програмування таких структур є алгоритмічні мови типу ПРОЛОГ та їх сучасні еквіваленти, типу Delphi. При цьому блок-схему САПР слід будувати на основі діалектичного поєднання дедуктивного (направленого вниз) та індуктивного (направленого вверх до узагальнень) методів, як це пропонується, наприклад, в [25, 62, 90]. Таким чином, зображення структурної блок-схеми САПР залежить від рівня та степеню деталізації і може бути виконано у різноманітні способи, які зокрема залежать і від того, який головний зміст, або навантаження несе ця схема, або для кого вона розробляється: користувача чи розробника.

2. Керуючись вищевикладеним, найпростіший варіант структурної схеми САПР можна представити у вигляді рис.1.1.

3. Проектування конкретного ЕК починається з технічних вимог (паспорту), які формулюють на спеціалізованій мові САПР **«Технічне завдання»**.

4. В блоці **«Розробка первинного варіанту схеми»** виконується схемотехнічне проектування, тобто побудова схеми ЕК: вибір компонентів, їх параметрів, задавання, по можливості, компланарних гальванічних зв'язків та вибір вхідних та вихідних полюсів (вхід-вихід) тощо.

5. Елемент САПР, в якому виконуються розрахунки характеристик схеми, має назву **«Схемотехнічний аналіз»**. В цьому найголовнішому елементі формується математична модель та розраховуються потрібні характеристики схеми, що

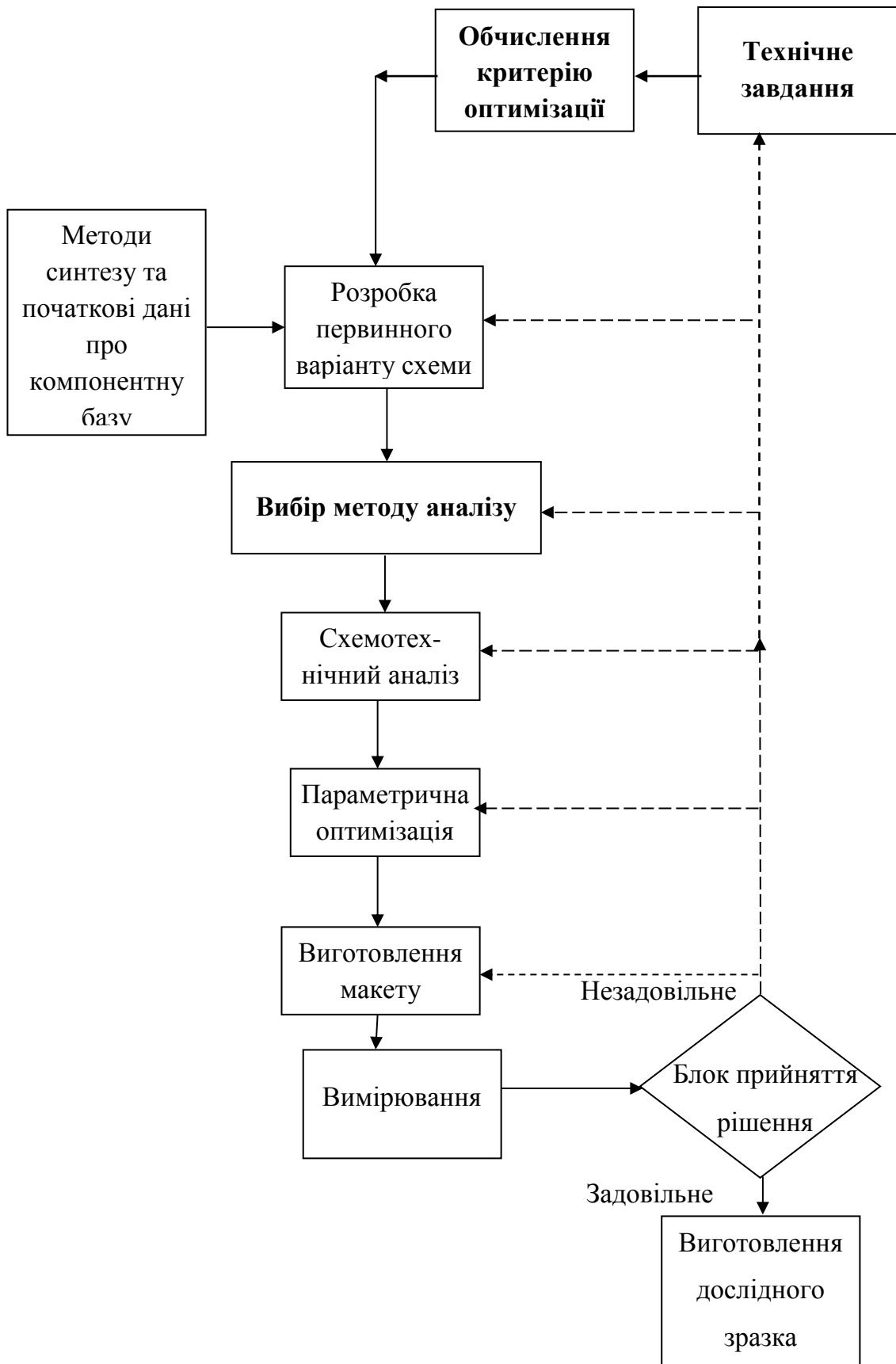


Рисунок 1.1 - Структурна схема САПР РТЦА електронних засобів

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

подаються попереднім блоком. При цьому можна виконувати частотний, часовий аналіз (як перехідні процеси, так і сталий режим при змінних у часі діях), обраховувати робочі точки на постійному струмі, робочі точки напівпровідникових приладів в динаміці (автозсуви) тощо.

«Параметрична оптимізація» – блок в якому виконується перший крок до конструктивного етапу проектування. На цьому етапі можна оцінити рівень впливу на характеристики ЕК заміни ідеалізованих параметрів компонентів на параметри, що мають певні відхилення в межах технологічних допусків при виробництві компонентів.

Блок **«Виготовлення макету»** суттєво відрізняється від аналогічного блоку в схемі САПР [20] тим, що початковий варіант конструктивної реалізації, що завершується алгоритмічним розв'язанням задач розміщення, компоновання та трасування друкованих плат перестає бути «крайнім» на машинних етапах проектування. Дійсно, запропоновані системні моделі аналізу ЕК з урахуванням внутрішньої ЕМС та теплових режимів дозволяють виконати комп'ютерну імітацію вдалої, чи навпаки - невдалої конструктивній реалізації результату схемотехнічного проектування.

6. Таким чином, цей блок в запропонованому варіанті САПР реалізується не лише у традиційний спосіб – виготовлення макету, а і за допомогою комп'ютерно-імітаційного моделювання.

7. Блок **«Вимірювання»**, що тісно пов'язаний зі способом реалізації макету, як і в попередньому блоці може нести подвійне смислове навантаження: реальний експеримент, імітаційно-комп'ютерний експеримент. Результатом цього блоку мусять бути ті характеристики та вимоги, що формулюються в першому блоці. Форма подання цих результатів мусить бути узгодженою з мовою блока **«Технічне завдання»**.

8. Прийняття рішення про відповідність макета ЕК технічним характеристикам виконує **«Блок прийняття рішення»**, алгоритм роботи якого прозоро висвітлюється, на рис.1.1. Слід лише зауважити, що кількість ітераційних процесів на кожному етапі проектування цілком обмежена, а тому при переборі цих варіантів на одному з них, переходять до вищого рівня реалізації ЕК, і так аж до зміни технічних вимог. Іншими

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

словами, схема відбиває не лише послідовно паралельну роботу елементів САПР, а і циклічну вкладеність одних структурних елементів в інші.

9. На схемі, рис. 1.1, по за увагою залишився блок «**Методи синтезу та початкові дані про компонентну базу**», робота якого, як бібліотекаря, заснована на зборі та видачі інформації про компонентну базу, зокрема про математичні моделі та геометричні характеристики множини існуючих на поточний момент двополюсних та багатополюсних елементів електричного кола. В цьому ж блоці можуть накопичуватись відомості про певні підсхеми (макроси), що створюються самим користувачем САПР.

10. Нарешті останній блок «**Виготовлення дослідного зразка**» – є завершальною операцією САПР. Результатом його роботи мусить бути або сам зразок ЕК, або програма для роботи нанотехнологічного процесу напилення ФП електродинамічного типу.

11. Таким чином в підрозділі запропонований гібридний варіант структурної схеми САПР нанотехнологій, що поєднує в собі, як традиційні так і нові елементи проектування. При цьому алгоритмізація ґрунтується на електродинамічно обґрунтованих системних моделях аналізу нанотехнологічної електроніки.

1.5 Підсумок та пропозиції за розділом 1

В даному розділі формулюється вимога по розробці САПР нанотехнологій, вказуються на недоліки існуючих САПР радіоелектроніки, пояснюються принципові відмінності запропонованої схеми САПР, вказуються шляхи її реалізації та виконується порівняльна оцінка складності, яка компенсується універсалізмом запропонованої САПР. З цією метою виконано дослідження в результаті якого отримані наступні результати.

➤ Запропоновані нові принципові засади побудови САПР наноелектроніки, у відповідності зі своєю специфікою: власними внутрішніми законами та правилами самоорганізації, частина вперше представлена в даній роботі.

➤ Виконана класифікація критеріальних оцінок оптимальності нановиробу: серед яких виділені схемотехнічні та конструктивні критерії.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

➤ Визначений домінуючий критерій оптимізації по електромагнітній внутрішній та зовнішній сумісності. Справедливість твердження ґрунтується на принциповій властивості композиційних складових нановиробу, які неможливо сконструювати у вигляді автономних по електромагнітній взаємодії компонентів.

➤ Представлені результат обчислення чутливість до зміни дескрипторів математичної моделі надають можливість оцінити рівень небезпечних відхилень від номінальних характеристик та прийняти відповідно конструктивні, або схемотехнічні зміни на етапі проектування, якщо ці відхилення перевищують допустимий рівень.

1.4 Представлена структурна схема САПР електронних нанотехнологічних виробів, що включає в себе такі нові елементи, що відтворюють її адаптивний характер з орієнтацією на морфологію об'єкта проектування та гнучкість (мінливість) програмних модулів в залежності від поточних результатів обчислення

Таким чином, запропонований гібридний варіант структурної схеми САПР нанотехнологій, що поєднує в собі, як традиційні, так і нові елементи проектування. При цьому алгоритмізація ґрунтується на електродинамічно обґрунтованих системних моделях аналізу нанотехнологічної електроніки.

Equation Section (Next)

2 КОМПОНЕНТНО КОМУНІКАТОРНІ РІВНЯННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

2.1 Декомпозиція електричного кола на компоненти та комунікатор

Обговоривши принципові засади побудови САПР наноелектроніки, перейдемо до реалізації пропозицій розділу 1.

Будемо стверджувати, що аксіоматика проектування високочастотних електричних кіл, обґрунтованих в електродинамічний спосіб, [28, 52, 67, 68, 71...73, 80, 81, 85, 108, 137...139] відображає специфіку проектування нанотехнологічної електроніки. І, допоки експеримент не доведе протилежне будемо вважати, що ідеї та принципи проектування наноелектронних виробів співпадають з тими, що приведені в вище означених наукових роботах. Специфічні тунельні та інші екзотичні ефекти нанотехнологічних компонентів [27, 52, 58, 59, 99, 112, 117, 133, 143, 144] не заперечують цієї тези, а, навпаки, доводять її істинність, позаяк для фізикоматематичних моделей (з щойно приведеного списку робіт) байдуже які саме внутрішні природничі ефекти формують зовнішні, феноменологічні характеристики композиційних елементів. Важливим, в кінцевому підсумку, є лише факт їх існування, або відсутності. Ілюстративні приклади такого виду аналізу частково знайшли своє відображення в роботах [75, 80, 87].

Перш за все, побудуємо універсальну модель аналізу електричного кола, яка б увібрала в себе задачі схемотехнічного та конструктивно-морфологічного проектування. Для цього, уявимо, що маємо справу з електричним колом з відомою початковою електричною схемою його реалізації та початковою реальною конструкцією. Виконуючи декомпозицію першого рівня, представимо, електричне коло, у вигляді двох композиційних складових: комунікатора та компонентів. Критерієм такого розбиття на першому ітераційному кроці може слугувати співвідношення довжини електромагнітної хвилі, яка випромінюється у простір комунікатором та неавтономними компонентами, і розмірами функціонального перетворювача в цілому. Кожна з цих композиційних складових характеризується

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

різними математичними моделями, які відбивають ланцюговий (для компонентів) та хвильовий (для комунікатора) процес.

Серед різноманітних дескрипторів математичної моделі слід розрізняти дескриптори компонентів, дескриптори комунікаторів та дескриптори процесів, що описують електричне коло, як певний функціональний перетворювач.

Дескриптори компонента описуються:

- власним складеним ім'ям, що може відображати клас компонентів та його індивідуальну специфікацію у цьому класі;
- параметрами, що мають певну фізичну розмірність (Ом, Гн, Ф тощо);
- характеристиками: лінійними, параметричними, нелінійними, можливо (як для нанокомпонентів) і нелінійно-параметричними;
- морфологією, яка, в першу чергу, відображає геометричні розміри та електродинамічні (речовинні) параметри (ϵ , μ , σ) зовнішньої поверхні об'єму компонента та інші суттєві для експлуатаційних цілей властивості;
- математичною моделлю, що описує характеристику на окремій робочій ділянці, яка задається вибором робочої точки та розмахом сигналу, [21, 83, 86, 106]. До речі, імітація нелінійно-параметричного компонента можлива в такий же спосіб, як і лінійно-параметричного, в режимах середнього та великого сигналів [86].

В загальному вигляді дескриптори компонентів повинні описуватись у вигляді скалярних, або операторних матриць, що встановлюють взаємозв'язки між вектором впливів та вектором реакцій дескрипторів процесу. Морфологічні дані про компонент використовуються для розв'язання задач конструкторсько-технологічного характеру: просторового, або площинного розміщення, трасування, рівня електромагнітної автономії, мається на увазі внутрішню та зовнішню електромагнітну, теплову, можливо радіаційну та біологічну сумісність тощо.

Дескриптори комунікатора представляють собою також матриці, що пов'язують між собою впливи та реакції на усіх полюсах комунікатора. Елементи матриць дескрипторів, для яких доречно вжити специфічну назву електродинамічних параметрів, визначаються шляхом розв'язку крайових задач електродинаміки. Слід зауважити, вибір методу розв'язку таких задач також визначається співвідношенням

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

розмірів: хвиля - комунікатор. Як правило, комунікатор має лінійну структуру, але неоднорідні матеріальні параметри середовища: провідники, екрани, ізоляційні об'єми, що ізолюють дерева комунікатора одне від одного, тощо.

Дескриптори процесів це список фізичних величин, що утворюють множину впливів та реакцій на полюсах (дугах) усіх компонентів та комунікатора. Фізична природа цих дескрипторів обирається в такий спосіб, що вони носили універсальний характер з точки зору поєднання різноманітних етапів проектування в єдине ціле, з метою формування узагальненої для усіх етапів проектування математичної моделі.

Універсальна математична модель і мусить встановити функціональні взаємозв'язки між зазначеними видами дескрипторів у вигляді узгодженої відносно процесуальних дескрипторів замкнутої системи рівнянь.

В даному підрозділі уточнюється поняття узагальненої математичної моделі нановиробів, яку запропоновано розробляти на засадах високочастотних електричних кіл, що обґрунтовані в електродинамічний спосіб. Аргументація пропозиції ґрунтується на тому, що модель використовує феноменологічні властивості композиційних компонентів нановиробу, а не його внутрішню природу, яка в даному випадку відображається його зовнішніми характеристиками.

Виконана класифікація дескрипторів нанотехнологічного електронного функціонального перетворювача та намічені шляхи розробки математичної моделі, як такої, що мусить зв'язати дескриптори у вигляді замкнутої системи рівнянь.

2.2 Компонентні рівняння

Компонентним рівнянням, умовне зображення якого представлено на рис. 2.1, будемо називати співвідношення, що встановлює взаємозв'язки між дескрипторами процесів через матричні дескриптори компонентів у вигляді

$$[U]_m = [Z]_{m,m} [I]_m + [U_0]_m, \quad (2.1)$$

$$[I]_m = [Y]_{m,m} [U]_m + [I_0]_m. \quad (2.2)$$

де $[U]_m$ та $[I]_m$ – матриці-стовпці дескрипторів процесів, за які обрано напруги усіх m дуг та струми усіх m полюсів компонента, рис. 2.1:

$$[U]_m = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \end{bmatrix}, \quad [I]_m = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{bmatrix},$$

Матриці $[U_0]$, $[I_0]$ подібні до (2.3) характеризують приведені до відповідних дуг та полюсів додаткові напруги та струми, що характеризують активні компоненти, тобто такі, що мають власні внутрішні джерела електроенергії. Для пасивного компонента усі елементи векторів $[U_0]$, $[I_0]$ дорівнюють нулю.

Матриці $[Z]_{m,m}$ та $[Y]_{m,m}$ – і є матричними дескрипторами компонента.

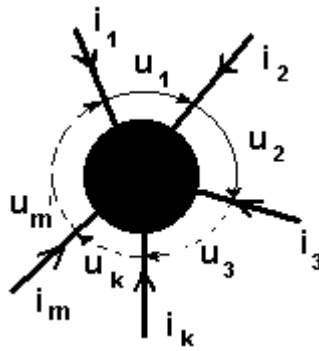


Рисунок 2. 1 – Зображення m-полюсного компонента

Як зазначалось в підрозділі 2.1, аналізуючи компонент методами теорії квантової, нано-, мікро та макро- електродинаміки, такий взаємозв'язок завжди можна встановити в аналітичній формі [108, 109], або на основі експериментальних досліджень [155] у вигляді натурного, або імітаційного моделювання, з заміною реальних процесів, їх певними еквівалентними аналогами, для правомірності застосування яких можна знайти числові оцінки.

Компонентну матрицю функціонального перетворювача що містить j_{\max} - окремих компонентів можна скласти на основі індивідуальних компонентних матриць $[Z]_{m,m}$ та $[Y]_{m,m}$. Опускаючи квадратні дужки, матриці комплексних опорів та провідностей для окремого j -го компонента [39, 72, 80, 131], запишемо у вигляді

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$[Z]_{m,m} \Rightarrow Z_{m_j,m_j}^j = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1,m_j-1} & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2,m_j-1} & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{m_j-1,1} & Z_{m_j-1,2} & \cdots & Z_{m_j-1,m_j-1} & 0 \\ Z_{m_j,1} & Z_{m_j,2} & \cdots & Z_{m_j,m_j-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$$[Y]_{m,m} \Rightarrow Y_{m_j,m_j}^j = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1,m_j-1} & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2,m_j-1} & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{m_j-1,1} & Y_{m_j-1,2} & \cdots & Y_{m_j-1,m_j-1} & 0 \\ Y_{m_j,1} & Y_{m_j,2} & \cdots & Y_{m_j,m_j-1} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

де

$$Z_{m_j,\zeta} = -\sum_{k=1}^{m_j-1} Z_{k,\zeta}, \quad Y_{m_j,\zeta} = -\sum_{k=1}^{m_j-1} Y_{k,\zeta}. \quad (2.6)$$

З використанням матриць невизначеності (2.4), (2.5) компонентна Z-матриця функціонального перетворювача в цілому може бути представлена в блочному виді

$$[Z]_{m_{\max},m_{\max}}^{j_{\max},j_{\max}} = \begin{bmatrix} Z_{m_1,m_1}^{1,1} & Z_{m_1,m_2}^{1,2} & \cdots & Z_{m_1,m_{j_{\max}-1}}^{1,j_{\max}-1} & Z_{m_1,m_{j_{\max}}}^{1,j_{\max}} \\ Z_{m_2,m_1}^{2,1} & Z_{m_2,m_2}^{2,2} & \cdots & Z_{m_2,m_{j_{\max}-1}}^{2,j_{\max}-1} & Z_{m_2,m_{j_{\max}}}^{2,j_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{m_{j_{\max}-1},m_1}^{j_{\max}-1,1} & Z_{m_{j_{\max}-1},m_2}^{j_{\max}-1,2} & \cdots & Z_{m_{j_{\max}-1},m_{j_{\max}-1}}^{j_{\max}-1,j_{\max}-1} & Z_{m_{j_{\max}-1},m_{j_{\max}}}^{j_{\max}-1,j_{\max}} \\ Z_{m_{j_{\max}},m_1}^{j_{\max},1} & Z_{m_{j_{\max}},m_2}^{j_{\max},2} & \cdots & Z_{m_{j_{\max}},m_{j_{\max}-1}}^{j_{\max},j_{\max}-1} & Z_{m_{j_{\max}},m_{j_{\max}}}^{j_{\max},j_{\max}} \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

де елементи головної діагоналі є матрицями індивідуальних компонентів (2.4), а саме, для j-го компонента має місце матрична рівність

$$Z_{m_j,m_j}^j = Z_{m_j,m_j}^{j,j} \quad (2.8)$$

Решта блочних елементів (2.7) репрезентують можливу взаємодію неавтономних компонентів. Якщо при зміні місцями верхніх індексів блочних елементів (2.7) відповідні матриці взаємовпливів залишаються однаковими, то компонент можна

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

вважати взаємним, у випадку якщо ці матриці різні – невзаємним. Необхідно зауважити, що випадку автономності компонентів не діагональні блочні елементи представляють собою нульові матриці.

В аналогічний спосіб, можна отримати і компонентну Y -матрицю

$$[Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{j_{\max}, j_{\max}} = \begin{bmatrix} Y_{m_1, m_1}^{1,1} & Y_{m_1, m_2}^{1,2} & \dots & Y_{m_1, m_{j_{\max}-1}}^{1, j_{\max}-1} & Y_{m_1, m_{j_{\max}}}^{1, j_{\max}} \\ Y_{m_2, m_1}^{2,1} & Y_{m_2, m_2}^{2,2} & \dots & Y_{m_2, m_{j_{\max}-1}}^{2, j_{\max}-1} & Y_{m_2, m_{j_{\max}}}^{2, j_{\max}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{m_{j_{\max}-1}, m_1}^{j_{\max}-1, 1} & Y_{m_{j_{\max}-1}, m_2}^{j_{\max}-1, 2} & \dots & Y_{m_{j_{\max}-1}, m_{j_{\max}-1}}^{j_{\max}-1, j_{\max}-1} & Y_{m_{j_{\max}-1}, m_{j_{\max}}}^{j_{\max}-1, j_{\max}} \\ Y_{m_{j_{\max}}, m_1}^{j_{\max}, 1} & Y_{m_{j_{\max}}, m_2}^{j_{\max}, 2} & \dots & Y_{m_{j_{\max}}, m_{j_{\max}-1}}^{j_{\max}, j_{\max}-1} & Y_{m_{j_{\max}}, m_{j_{\max}}}^{j_{\max}, j_{\max}} \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

де, як і у матриці комплексних опорів (2.7), індекси зверху вказують на нумерацію блочних елементів, а індекси знизу – загальну кількість усіх елементів при розгортанні, тобто підстановці внутрішніх елементів блочних матриць по місцю їх розташування в матрицях (2.7), або (2.9).

Таким чином, якщо ФП містить j_{\max} компонентів (багатополісників), кожний з яких має по m_j полюсів (дуг), де

$$j = 1, 2, \dots, j_{\max} \quad (2.10)$$

та загальна кількість полюсів (дуг) ФП обчислюється за формулою

$$m_{\max} = \sum_{j=1}^{j_{\max}} m_j = \sum_{j=1}^{j_{\max}} \sum_{k=1}^{m_j} 1_{j,k}. \quad (2.11)$$

Якщо ж кожному полюсу присвоїти свій номер де кількість полюсів j -го компонента

$$m_j = \sum_{k=1}^{m_j} 1_{j,k} \quad (2.12)$$

Зробимо ще одне суттєве зауваження відносно запису компонентних рівнянь (2.1) та (2.2). Формі запису цих рівнянь можна надати більш простішого вигляду, якщо замінити різницю векторів, що входять до цих рівнянь одним вектором і знову позначити цю різницю як (2.3)

$$[U]_m \Rightarrow [U]_m - [U_0]_m, \quad [I]_m \Rightarrow [I]_m - [I_0]_m \quad (2.13)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

маючи при цьому на увазі, що напруга дуги складається з напруги, що виникає як під дією зовнішнього струму, так і завдяки внутрішнім джерелам електроенергії, тобто є не пасивною а активною ділянкою кола. Аналогічно, струм полюса компонента при цьому будемо вважати таким, що створюється не лише дією зовнішньої напруги, а додатково струмом від дії внутрішніх енергетичних джерел компонента. Якщо говорити мовою електричних ланцюгів, то при цьому в дугу послідовно додається додаткова гілка з приведеною напругою від внутрішніх джерел, а до гілки зі струмом полюса паралельно підключається додаткова гілка з джерелом приведеного струму.

Застосуванням процедури діакоптики, як відомо, завжди можна активний багатополісник перетворити на пасивний, з еквівалентними джерелами електроенергії, що виносяться за його межі, та вмикаються по периферії в дуги, еквівалентної схеми, що будується у вигляді опуклого багатокутника, або по його полюсам, якщо еквівалентна схема має вигляд зірки. Власне, цей факт дозволяє сформулювати наступну тезу: незалежно від внутрішньої «начинки» довільного m -полісника його схему можна трактувати, як таку, що складається з m гілок та одним вузлом, або з m вузлами та однією гілкою. У відповідності до змісту назвемо її тезою про структуру багатополісника.

При цьому сам процес визначення приведених величин залишається таким, як і був, змінюється лише форма запису компонентних рівнянь, які тепер можна записати в цілому для функціонального перетворювача у компактній формі.

$$[U]_{m_{\max}} = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} [I]_{m_{\max}}, \quad (2.14)$$

$$[I]_{m_{\max}} = [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}}. \quad (2.15)$$

де на основі щойно сформульованої тези про структуру у відповідності з зауваженнями (2.13)

$$[U]_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 - \dot{U}_{01} \\ \vdots \\ \dot{U}_{m_{\max}} - \dot{U}_{0m_{\max}} \end{bmatrix}, \quad [I]_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 - \dot{I}_{01} \\ \vdots \\ \dot{I}_{m_{\max}} - \dot{I}_{0m_{\max}} \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

а компонентні Z- та Y-матриці обчислюються як і раніше за (2.7) та (2.9).

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Узагальнені компонентні рівняння (2.14), (2.15) зв'язують дескриптори процесів (2.16) на аналізі основі внутрішніми природничих явищ, а що стосуються зовнішнього прояву композиційні елементів, по відношенню до системи яку вони формують, то струми полюсів та напруги дуг як кожного окремого компонента, так і пристрою в цілому повинні підкорятись законам Кірхгофа. Запис останніх в матричній формі можна представити як

$$[M]_{j_{\max}, m_{\max}} [I]_{m_{\max}} = [0]_{m_{\max}}, \quad (2.17)$$

$$[M]_{j_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = [0]_{m_{\max}}, \quad (2.18)$$

де $[I]_{m_{\max}}$ – вектор струмів; $[U]_{m_{\max}}$ – вектор напруг. Результатом перемноження кожного окремого рядка матриці $[M]_{j_{\max}, m_{\max}}$ на вказані вектори процесів (2.16) відповідає записує рівнянь Кірхгофа для кожного окремого компонента. Елементами матриці $[M]_{j_{\max}, m_{\max}}$ є одиниці або нулі, які фіксують інцидентність полюсів (дуг), що належать певному j -му компоненту. За умови нумерації полюсів та дуг так, як вказано на рис. 2.1, (по ходу часової стрілки) елементи матриці формуються в наступний спосіб: номери стовпців m є номери полюсів (дуг), а номери рядків відповідають номерам багатополіусників j . Належність полюса (дуги) саме даному багатополіуснику відзначається елементом матриці, що дорівнює одиниці. У протилежному випадку ставиться нуль.

Таким чином, в підрозділі виконана побудова математичної моделі компонентних рівнянь, що реалізована у вигляді матричних рівнянь в блочному вигляді. На відміну від існуючих, форма запису запропонованої моделі дозволяє проводити оцінки взаємовпливів компонентів, тобто моделювати роботу як автономних, так і неавтономних компонентів у випадку їх взаємодії один з одним в межах об'єкту, що аналізується.

Для цього виконані наступні кроки:

Вибрана матрична форма запису окремого компонентного рівняння, що в однаковій мірі придатна як для пасивних, так і для активних компонентів, що

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

пов'язують між собою дескриптори процесів, зокрема струми полюсів та напруги дуг компонентів.

Вказані можливі варіанти обчислення або виміру елементів Z - або Y -компонентної матриці. Блокова форма матриці за ненульових недіагональних блоків дозволяє виконати оцінку взаємних електромагнітних впливів компонентів ФП.

Запропонована модель відображення джерел електричної енергії компонентів у вигляді додаткових напруг дуг та струмів полюсів, шляхом заміни діючих напруг та струмів на їх суперпозицію з приведеними величинами. Такий підхід дозволив утворити компактну форму компонентних рівнянь з їх доповненням рівняннями Кірхгофа у вигляді матриці інциденції компонентів та полюсів.

Модель окремо-взятого компонента стала основою побудови блокових Z - та Y -матриць, що характеризують сукупність усіх компонентів одночасно.

2.3 Компонентно-комунікаторні рівняння

Узагальнені компонентні рівняння (2.14), (2.15) визначають лише сукупність композиційних елементів, що створюють ФП в цілому. Інформацію про способи їх схемотехнічного (топология) об'єднання та конструктивного планарного, або об'ємного розподілу (морфология) міститься в компонентно-комунікаторних рівняннях. На відміну від компонентних рівнянь, які встановлюють взаємозв'язок сигнальних дескрипторів одного і того ж компонента, компонентно-комунікаторні рівняння пов'язують між собою сигнальні дескриптори різних компонентів. Зв'язки між дескриптори процесів (2.16) ґрунтуються на використанні морфологічних рівнянь Кірхгофа.

Для низькочастотних процесів компонентно-комунікаторні рівняння повністю відповідали класичним законам Кірхгофа [18, 21, 81, 159, 161], які описували лише топологію (електричну схему) у відриві від її морфологічної реалізації, справедливо вважаючи їх розміри мізерними у порівнянні з довжинами електромагнітних хвиль міжкомпонентних з'єднань. Разом з тим, різке підвищення швидкодії та зменшення міжпровідникових відстаней, що супроводжує нанотехнології не дозволяє нехтувати впливом комунікатора. Саме з цих причин топологічні рівняння Кірхгофа замінюємо морфологічними, в яких електродинамічні ефекти враховуються як скаляри, що

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

модифікують рівняння Кірхгофа на рівні обліку інтегральних характеристик електромагнітного поля.

Застосовуючи електродинамічний закон повного струму в інтегральній формі для кожного з дерев комунікатора можна записати

$$\sum_{\text{полюси}} i_k(t) = i_{zc}(t) + i_{вит}(t) \quad (2.19)$$

де $i_{zc}(t)$ – струм зсуву (струм, що наводиться), $i_{вит}(t)$ – можливий струм витоку при недосконалому діелектрику, на якому розташований провідник.

На підставі закону електромагнітної індукції для замкнутого контура комунікатора, що створюється провідниками, та дугами компонентів, які увійшли до його складу, можна записати:

$$\sum_{\text{дуги}} u_k(t) = u_H(t) + u_R(t) \quad (2.20)$$

де $u_i(t)$ – напруга, що наводиться, а $u_R(t)$ – падіння напруги за рахунок опору проводів, що входять до контура.

Рівняння (2.19) та (2.20) можна трактувати, як еквіваленти першого та другого законів Кірхгофа для комунікатора. В цих рівняннях на відміну від класичних рівнянь Кірхгофа доданки правих частини рівнянь (2.19) та (2.20) відбивають морфологічну структуру комунікатора.

Використовуючи тезу про структуру можна стверджувати, що для будь-якого електричного кола, а тому числі і нанотехнологічного, що містить j_{max} компонентів, з кількістю полюсів m_{max} та комунікатора, що має $r_{max} + 1$ дерев (нагадаємо, що дереву в класичній теорії ланцюгів відповідає поняття вузла) можна скласти r_{max} незалежних рівнянь виду (2.19) та

$$p_{max} = m_{max} - \{[(r_{max} - 1) + j_{max}] - 1\} = m_{max} - r_{max} - j_{max} \quad (2.21)$$

рівнянь (2.20) для незалежних контурів, тобто таких – що вирізняються один від одного принаймні одним полюсом (гілкою). Структура формули (2.21) відповідає визначенню цикломатичного числа з теорії графів [25, 90], або, що одне і теж, підрахунку незалежних контурів в класичній теорії ланцюгів [86]. Дійсно, в виразі (2.21) m_{max} відповідає кількості гілок, а вираз в квадратних дужках – кількості вузлів.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

В матричному вигляді для комплексних амплітуд така система рівнянь має вигляд.

Для незалежних дерев

$$[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [I]_{m_{\max}} = [I_H]_{r_{\max}}, \quad (2.22)$$

де $[D]_{r_{\max}, m_{\max}}$ – матриця дерев, рядки якої відповідають номерам дерев, а стовпці – номерам полюсів компонентів, бінарні елементи матриці, обчислюються за фактом інцидентності m -го полюса r -му дереву D_r :

$$d_{r,m} = \begin{cases} 1 & m \in D_r \\ 0 & m \notin D_r \end{cases} \quad (2.23)$$

наведені на деревах струми:

$$[I_H]_{r_{\max}} = [I_G]_{r_{\max}} + [I_C]_{r_{\max}} \quad (2.24)$$

обчислюються на основі електродинамічної матриці комунікатора, про яку піде мова в наступному підрозділі.

Для незалежних контурів

$$[K]_{p_{\max}, m_{\max}} [\dot{U}]_{m_{\max}} = [\dot{U}_H]_{p_{\max}}, \quad (2.25)$$

де $[K]_{p_{\max}, m_{\max}}$ – матриця контурів, рядки якої відповідають номерам окремих контурів K_p , $p = \overline{1, p_{\max}}$, а стовпці – номерам полюсів компонентів, бінарні елементи матриці, обчислюються за фактом інцидентності m -ї дуги p -му контуру K_p :

$$k_{p,m} = \begin{cases} 1 & m \in K_p \\ 0 & m \notin K_p \end{cases} \quad (2.26)$$

наведені на в контурах напруги:

$$[\dot{U}_H]_{p_{\max}} = [\dot{U}_R]_{p_{\max}} + [\dot{U}_L]_{p_{\max}} \quad (2.27)$$

де складові наведеної напруги (2.27) також обчислюються на основі електродинамічної матриці комунікатора. Детальніше це йде мова в наступному підрозділі.

У підсумку зазначимо, що цьому підрозділі розвинуті алгоритми формування компонентно-комунікаторних рівнянь. В основу зазначеної процедури покладені морфологічні рівняння Кірхгофа, в яких в неявний спосіб міститься інформація про просторову структуру нановиробу та способи поєднання окремих компонентів в між собою. При формуванні компонентно-комунікаторних рівнянь використанні матриці дерев та контурів комунікатора. Бінарні елементи цих матриць формуються в звичайний спосіб на основі інциденції дуг та полюсів, до відповідних елементів комунікатора. Розмір матриць визначається кількістю незалежних дерев та контурів комунікатора, що допускає певну свободу вибору їх множини. Остання обставина має чимале значення при спрощенні задач електродинаміки за для визначення елементів матриці електродинамічних параметрів про яку йде мова в наступному підрозділі.

2.4 Матричне рівняння комунікатора

Комунікатор як структурний елемент нановиробу, що виконує об'єднувачу функцію компонентів, можна представити у вигляді багатополусного компонента кількість полюсів якого, а відповідно дуг, співпадає з кількістю полюсів та дуг усіх компонентів. Іншими словами, вектори дескрипторів процесу комунікатора

$$\begin{bmatrix} \tilde{U} \end{bmatrix}_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} \tilde{U}_1 \\ \vdots \\ \tilde{U}_{m_{\max}} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \tilde{I} \end{bmatrix}_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \vdots \\ \tilde{I}_{m_{\max}} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

співпадають з векторами дескрипторів процесу компонентів (2.16).

$$\begin{bmatrix} \tilde{U} \end{bmatrix}_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} U \end{bmatrix}_{m_{\max}}, \quad \begin{bmatrix} \tilde{I} \end{bmatrix}_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} I \end{bmatrix}_{m_{\max}} \quad (2.29)$$

Суттєвою відмінністю одних від інших є форма їх подання: дескриптори (2.28), необхідно вважати просторово-часовими сигналами, а дескриптори компонентів (2.16) або (2.3) – лише часовими. Строго кажучи, вони дорівнюють одне одному на межі комунікатора. В середині комунікатора, в залежності від допустимого рівня ідеалізації

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

його роботи, розподіляючись по провідниковим зонам (проводам, екранам, смуговим лініям тощо) їх величини вже залежить від просторових координат струмопровідних елементів і можуть суттєво відрізнятись від граничних величин, що задані топологічними дескрипторами (2.16) або (2.3) на межі комунікатора. І першою задачею на шляху визначення електромагнітного збурення комунікатора є визначення розподілу струмів та напруг (зарядів) по провідниковим поверхням комунікатора.

Форма запису рівнянь (2.29) дозволяє для комунікатора ввести схемотехнічне зображення, рис. 2.2, та вказати напрями струмів полюсів, як такі, що течуть від комунікатора, а облік напруг дуг комунікатора в напрямку зростання номера полюса. Задача по отриманню матричного рівняння комунікатора зводиться до встановлення співвідношень між його дескрипторами (2.28), як на рівні внутрішнього так і зовнішнього прояву.

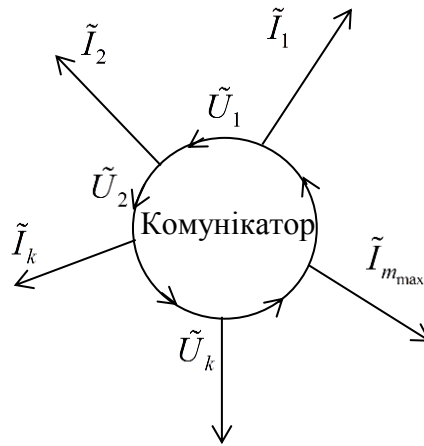


Рисунок 2. 2 – Схема комунікатора

На рівні внутрішніх процесів електромагнітного впливу комунікатора його можна описати подібно до рівнянь (2.14), (2.15)

$$[\tilde{U}]_{m_{\max}} = [\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} [\tilde{I}]_{m_{\max}}, \quad (2.30)$$

$$[\tilde{I}]_{m_{\max}} = [\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} [\tilde{U}]_{m_{\max}}, \quad (2.31)$$

де символ тильди \sim , як і в формулах (2.28), (2.29) означає приналежність до комунікатора.

Будемо вважати, що на рівні взаємодії комунікатора з компонентом (зовнішній

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

прояв) залишаються також справедливими рівняння (2.17), (2.18), що для комунікатора приймають форму

$$\sum_{m=1}^{m_{\max}} \tilde{I}_m = 0; \quad \sum_{m=1}^{m_{\max}} \tilde{U}_m = 0. \quad (2.32)$$

Тут є сенс зауважити, що струми та напруги в (2.32) мають різне смислове навантаження: для неавтономних комунікаторів, під впливом зовнішніх електромагнітних потоків, робота комунікатора подібна до активного компонента. При цьому дескриптори (2.32) слід визначати в такий же спосіб, як в (2.16).

Рівняння (2.30) та (2.31) корисні тим, що дозволяють визначити загальну кількість задач електродинаміки, яка мусить бути розв'язана для визначення елементів матриці електродинамічних параметрів $[\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}}$ або $[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}}$ комунікатора. Кожен з елементів вимагатиме, як мінімум розв'язання 4 різнорідних задач, по визначенню потоків густини струму, в провідних середовищах (провідниках металевих дротів та недосконалих ізоляційних матеріалів) та потоків векторів електричної та магнітної індукції з поверхонь дерев та контури комунікатора. Як крайові умови, такі і поверхні інтегрування реальних комунікаторів достатньо складні, тому кожна з перерахованих різнорідних задач, в свою чергу, розбивається на декілька простих (канонічних) задач, що при накладенні їх розв'язків представляє розв'язок початкової задачі. Таким чином, обчислювальну складність [25] алгоритмічних процедур можна оцінити формулою

$$T > (4m_{\max}^2) \varpi \Delta t \quad (2.33)$$

де ϖ - середнє число композиційних задач на один параметр, Δt – середній час обчислення однієї задачі електродинаміка. Результатом кожної з задач повинно бути обчислення величини \dot{i}_{zc} , $\dot{i}_{вит}$, u_n , u_R що формують елементи матриць (2.24), (2.27) за формулами

$$\dot{i}_{\hat{e}i}(t) = -\frac{d}{dt} \int_{S_a} \bar{D} \cdot d\bar{S}, \quad (2.34)$$

$$\dot{i}_{\hat{a}e\hat{o}}(t) = \gamma_a \int_{S_a} \bar{E} d\bar{S}, \quad (2.35)$$

$$u_H(t) = -\frac{d}{dt} \int_{S_k} \bar{B} \cdot d\bar{S}, \quad (2.36)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$u_r(t) = -\sum_l \int \bar{E} \cdot d\bar{l}, \quad (2.37)$$

де S_b – бічна поверхня провідника-дерева, а S_k – площа, що охоплюється контуром.

Обчислення векторів індукції та напруженості електромагнітного поля спряжено з розв'язком відповідних задач електродинаміки з цілком коректним заданням джерел електромагнітного поля, граничних умов та матеріальних параметрів середовища.

Інтеграли в лівих частин формул (2.34)...(2.37), представляють собою потоки векторів електричної N та магнітної Φ індукції через поверхні, що відповідають фізичному змісту частин комунікатора. Враховуючи, що кожен з потоків створюється відповідно усіма зарядами (напругами) та, відповідно струмами, кожен з них можна достатньо просто подати у вигляді лінійної комбінації згаданих щойно джерельних струмів та напруг. На підставі чого, опускаючи низку очевидних перетворень, складові наведеного струму (2.24), можна представити у вигляді матричних рівнянь:

$$[I_G]_{r_{\max}} = [\tilde{G}]_{r_{\max}, m_{\max}} [\tilde{U}]_{m_{\max}} \quad (2.38)$$

де $[\tilde{G}]_{r_{\max}, m_{\max}}$ – матриця омичних провідностей ізоляційних проміжків, що відділяють дерева комунікатора одне від одного.

$$[\tilde{G}]_{r_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1,k} & \cdots & g_{1,m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{r1} & \cdots & g_{r,k} & \cdots & g_{r,m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{r_{\max}1} & \cdots & g_{r_{\max}k} & \cdots & g_{r_{\max}m_{\max}} \end{bmatrix}, \quad (2.39)$$

де $g_{r,k}$ – провідність між координатами точок розташування довільного дерева s , $r = \overline{1, r_{\max}}$, та k -ю дугою компонента $k = \overline{1, m_{\max}}$.

$$[I_C]_{r_{\max}} = -j[\tilde{B}]_{r_{\max}, m_{\max}} [\tilde{U}]_{m_{\max}} \quad (2.40)$$

де

$$[\tilde{B}]_{r_{\max}, m_{\max}} = \omega[C]_{r_{\max}, m_{\max}}, \quad (2.41)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

де матриця ємнісних дескрипторів комунікатора:

$$[C]_{r_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1k} & \cdots & C_{1m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{r1} & \cdots & C_{r,k} & \cdots & C_{r,m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{r_{\max}1} & \cdots & C_{r_{\max}k} & \cdots & C_{r_{\max}m_{\max}} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

В свою чергу, омичні напруги на відрізках провідників представляються елементами матриці опірних параметрів $[R_d]_{p_{\max}, m_{\max}}$ комунікатора як

$$[\dot{U}_R]_{p_{\max}} = [\tilde{R}]_{p_{\max}, m_{\max}} [\tilde{I}]_{m_{\max}}, \quad (2.43)$$

де

$$[\tilde{R}]_{p_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1k} & \cdots & r_{1m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{q1} & \cdots & r_{qk} & \cdots & r_{q,m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{p_{\max}1} & \cdots & r_{p_{\max}k} & \cdots & r_{p_{\max}m_{\max}} \end{bmatrix}. \quad (2.44)$$

Елементами $r_{q,k}$ матриці (2.44) є опори провідника комунікатора, які входять до складу q-го незалежного контуру k-й ділянки, по якій тече струм \tilde{I}_k .

Індуковані в незалежних контурах напруги

$$[\dot{U}_L]_{p_{\max}} = j[\tilde{X}]_{p_{\max}, m_{\max}} [\tilde{I}]_{m_{\max}}. \quad (2.45)$$

де

$$[\tilde{X}]_{p_{\max}, m_{\max}} = \omega[L]_{p_{\max}, m_{\max}}, \quad (2.46)$$

де матриця індуктивних параметрів комунікатора

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$[L]_{p_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} L_{11} & \cdots & L_{1k} & \cdots & L_{1m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{q1} & \cdots & L_{qk} & \cdots & L_{q, m_{\max}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{p_{\max} 1} & \cdots & L_{p_{\max} k} & \cdots & L_{p_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

Ємнісні та провідні параметри, що фігурують в формулах (2.38)...(2.42) в подальшому будемо називати напруговими, а опірні та індуктивні, (2.43)...(2.47), струмовими за ознакою джерельних дескрипторів, що задаються при їх визначенні.

Виконуючи серію підстановок (2.42) \rightarrow (2.41) \rightarrow (2.40) \rightarrow (2.24) та (2.38) \rightarrow (2.24) можна отримати

$$[I_H]_{r_{\max}} = [\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} [\tilde{U}]_{m_{\max}}, \quad (2.48)$$

де $[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}}$ – комплексна матриця провідності комунікатора

$$[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} = [\tilde{G}]_{r_{\max}, m_{\max}} - j[\tilde{B}]_{r_{\max}, m_{\max}} \quad (2.49)$$

В такий же спосіб з (2.27) та (2.43)...(2.47) отримують

$$[\dot{U}_H]_{p_{\max}} = [\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} [\tilde{I}]_{m_{\max}}, \quad (2.50)$$

де комплексна матриця опорів електродинамічних параметрів комунікатора

$$[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} = [\tilde{R}]_{p_{\max}, m_{\max}} + j[\tilde{X}]_{p_{\max}, m_{\max}} \quad (2.51)$$

Порівняльний аналіз структур, матриць (2.49), (2.51) з матрицями $[\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}}$ або $[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}}$, що входять до складу комунікаторних рівнянь (2.30), та (2.32) свідчить про певну їх невідповідність принаймні за кількістю рядків.

Але ця суперечність уявна: справа в тому, що матриці (2.49), (2.51) отримані внаслідок виділення систем лінійно незалежних рівнянь з множини усіх можливих варіантів використання морфологічних законів Кірхгофа. Така процедура дозволяє чітко формулювати задачі електродинаміки по визначенню параметрів матриць (2.49), (2.51). Разом з тим, якщо можливо провести декомпозицію комунікатора, на композиційні елементи, що допускають однозначне визначення параметрів комунікатора у формі $(m_{\max} \times m_{\max})$ то можна цілком коректно побудувати математичну

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

модель і для такого варіанту. При цьому слід мати на увазі що рівняння (2.30) шляхом перегрупування в перших рядках p_{\max} незалежних контурів можна представити, як

$$\begin{bmatrix} [\tilde{Z}]_{p_{\max}, p_{\max}} & [\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max} - p_{\max}} \\ [\tilde{Z}]_{(m_{\max} - p_{\max}), p_{\max}} & [\tilde{Z}]_{(m_{\max} - p_{\max}), (m_{\max} - p_{\max})} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} \begin{bmatrix} [\tilde{I}]_{p_{\max}} \\ [\tilde{I}]_{(m_{\max} - p_{\max})} \end{bmatrix}_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} [\dot{U}_H]_{p_{\max}} \\ [\dot{U}_{H(m_{\max} - p_{\max})}] \end{bmatrix}_{m_{\max}} \quad (2.52)$$

або, переписуючи (2.52) у вигляді двох матричних рівнянь отримуємо

$$\begin{aligned} [\tilde{Z}]_{p_{\max}, p_{\max}} [\tilde{I}]_{p_{\max}} + [\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max} - p_{\max}} [\tilde{I}]_{(m_{\max} - p_{\max})} &= [\dot{U}_H]_{p_{\max}} \\ [\tilde{Z}]_{(m_{\max} - p_{\max}), p_{\max}} [\tilde{I}]_{p_{\max}} + [\tilde{Z}]_{(m_{\max} - p_{\max}), (m_{\max} - p_{\max})} [\tilde{I}]_{(m_{\max} - p_{\max})} &= [\dot{U}_{H(m_{\max} - p_{\max})}] \end{aligned} \quad (2.53)$$

У зв'язку з отриманими результатами слід привернути увагу до декількох важливих обставин:

➤ перше з рівнянь (2.53) в точності співпадає з (2.50), що свідчить про коректність результату.

➤ вектор струмів усіх полюсів комунікатора $[\tilde{I}]_{m_{\max}}$, як і повна ($m_{\max} \times m_{\max}$) матриця електродинамічних параметрів в (2.53), представлений у вигляді сукупності блочних матриць). Перший з векторів $[\tilde{I}]_{p_{\max}}$ представляє собою незалежні контурні струми, другий $[\tilde{I}]_{(m_{\max} - p_{\max})}$ – залежні струми, кожний з яких обчислюються у вигляді лінійних комбінації незалежних струмів. Алгоритми обчислення залежних струмів через незалежні добре відомі [106, 157, 161] і застосовуються в багатьох САПР електроніки.

➤ На відміну від ланцюгової трактовки для обчислення параметрів комунікатора необхідно, щоб струми комунікатора задавались у вигляді просторово-часовому вимірі [28]. Іншими словами, для розв'язку задач електродинаміки по обчисленню параметрів комунікатора необхідно задавати просторові координати кожної точки лінійного (поверхневого, об'ємного) струму та його значення в цій точці, тобто закон розподілу струму вздовж провідника. Але просторове закріплення різних струмів призводить до конфліктних ситуацій, суть яких: «Якому з полюсів приписати струм однієї і тієї ж гілки?» Розв'язання конфліктної ситуації можливо в будь який спосіб, але в такий, щоб одне і теж просторове джерело формувало лише параметр один раз. Найпростіший вихід з цієї ситуації наділяти геометричними характеристиками

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

лише фактичні струми, що співпадають зі струмом незалежного контурів, а струми залежних контурів залишити з нульовою геометрією (тобто визнати їх, як і струми компонентів (2.3) точковими).

➤ Друге рівняння з (2.53) дозволяє при необхідності обчислювати контурні наведені напруги в залежних контурах. Корисність цих рівнянь визначається можливістю знаходження контурів з мінімальним та максимальними значеннями наведених напруг. При цьому можна змінити склад незалежних (облікових) контурних струмів, при розв'язанні задач виділення безпечних та небезпечних електромагнітних взаємодій в комунікаторі.

Аналогічні зауваження можна зробити і що до напругових дескрипторів. Порівнюючи (2.49) з матрицею $[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}}$, що входять до складу комунікаторних можна отримати подібне до (2.53) рівняння

$$\begin{aligned} [\tilde{Y}]_{r_{\max}, r_{\max}} [\tilde{U}]_{r_{\max}} + [\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max} - r_{\max}} [\tilde{U}]_{(m_{\max} - r_{\max})} &= [\dot{I}_H]_{r_{\max}} \\ [\tilde{Y}]_{(m_{\max} - r_{\max}), r_{\max}} [\tilde{U}]_{r_{\max}} + [\tilde{Y}]_{(m_{\max} - r_{\max}), (m_{\max} - r_{\max})} [\tilde{U}]_{(m_{\max} - r_{\max})} &= [\dot{I}_H]_{(m_{\max} - r_{\max})} \end{aligned} \quad (2.54)$$

Висновки, що зроблені при аналізі (2.53) подібні до тих що можна зробити по відношенню до (2.54). Єдине суттєве зауваження в тому, що модель передбачає задавання напруги дуги компонента на межі комунікатора у вигляді координат двох точок, в між якими зберігається різниця потенціалів (зовнішньої) дуги компонента.

Таким чином, в підрозділі на основі системних методів структурного аналізу розроблена математична модель комунікатора, що відбиває характер взаємодій його композиційних складових, що представлені у вигляді дерев та контурів. Взаємовпливи композиційних елементів представлені у вигляді матричних співвідношення вплив-реакція по усіх дугах та полюсах комунікатора.

Для досягнення цих результатів проведені наступні дослідження:

- вперше виконана диференціація сигнальних дескрипторів процесів комунікатора на топологічні та просторово часові. Вказана принципова відмінність цих процесів та способи задавання граничних умов;

- складені комунікаторні рівняння, що пов'язують впливи та реакції на дугах та полюсах комунікатора, через матриці електродинамічних параметрів;

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

- вказані методи та способи обчислення елементів матриць електродинамічних параметрів, які відбивають різноманітні процеси: втрати в провідниках, втрати в діелектриках, потоки векторів електричної індукції між деревами та магнітні потоки векторів в контурах комунікатора. Зазначені процеси представляються масштабними співвідношеннями між впливом та реакцією, які репрезентуються опірними, провідними, індуктивними та ємнісними параметрами.

- приведені як узагальнена форма комунікаторних рівнянь, так і її різноманітні видові модифікації, що орієнтовані на визначення наведених напруг в незалежних контурах та струмів зсуву з незалежних дерев комунікатора. Встановлені алгоритми перетворень форм верхнього рівня до форм нижнього рівня.

2.5 Базова модель функціонального перетворювача

Фізико-математичні процеси високочастотних (швидкодіючих) електричних кіл, в тому числі і наноелектроніки, представлені компонентними, компонентно-комунікаторними та комунікаторним рівняннями в підрозділах 2.2...2.4 Саме вони можуть бути використані для побудови різноманітних адаптивних методів аналізу та синтезу нанотехнологічних РТЦА електронних засобів. З метою створення базової моделі доцільно зібрати результати досліджень, що розкинуті по різних підрозділах 2.2...2.4 в єдине ціле та спробувати побудувати на його основі замкнуту систему матричних рівнянь з максимально-можливим ступенем деталізації різноманітних дескрипторів процесу.

Враховуючи компоненті рівняння внутрішнього (2.14), (2.15),

$$[U]_{m_{\max}} = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} [I]_{m_{\max}}, \quad (2.55)$$

$$[I]_{m_{\max}} = [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}}. \quad (2.56)$$

та зовнішнього (2.17), (2.18)

$$[M]_{j_{\max}, m_{\max}} [I]_{m_{\max}} = [0]_{j_{\max}}, \quad (2.57)$$

$$[M]_{j_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = [0]_{j_{\max}}, \quad (2.58)$$

прояву,

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

компонентно-комунікаторні рівняння, що записані у відповідності з морфологічними рівняннями Кірхгофа (2.22), (2.25)

$$[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [\dot{I}]_{m_{\max}} = [\dot{I}_H]_{r_{\max}}, \quad (2.59)$$

$$[K]_{p_{\max}, m_{\max}} [\dot{U}]_{m_{\max}} = [\dot{U}_H]_{p_{\max}}, \quad (2.60)$$

рівнянням комунікатора у формах (2.30), (2.31)

$$[\tilde{U}]_{m_{\max}} = [\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} [\tilde{I}]_{m_{\max}}, \quad (2.61)$$

$$[\tilde{I}]_{m_{\max}} = [\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} [\tilde{U}]_{m_{\max}}, \quad (2.62)$$

або (2.48), (2.50)

$$[\dot{I}_H]_{r_{\max}} = [\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} [\tilde{U}]_{m_{\max}}, \quad (2.63)$$

$$[\dot{U}_H]_{p_{\max}} = [\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} [\tilde{I}]_{m_{\max}}, \quad (2.64)$$

та зв'язок між часовими та просторово часовими дескрипторами (2.29)



складемо модель, у якій як невідомі будуть фігурувати струми полюсів та напруги дуг як компонентів, так і комунікатора. Іншими словами, вектор невідомих величин моделі матиме вигляд

$$X_{4m_{\max}}^A = [I_{m_{\max}} \quad U_{m_{\max}} \quad \tilde{I}_{m_{\max}} \quad \tilde{U}_{m_{\max}}]^T \quad (2.66)$$

де $X_{4m_{\max}}^A$ – вектор стовпець невідомих величин базової моделі, тут і в подальшому для позначок матриць у вигляді стовпців або рядків квадратні дужки опускаємо, кількість елементів (в даному випадку $4m_{\max}$) позначатиме вираз у нижньому індексу, а смислове навантаження фіксуватимемо верхнім індексом (Б – базова модель). Виконуючи комбінаційний перебір рівнянь (2.55)...(2.65) можна скласти таку базову модель і до того ж не одну. При комбінуванні зазначених рівнянь необхідно враховувати, що кожна окремо взята модель не може мати лінійно залежних рівнянь одного і того ж типу, наприклад, до моделі можна застосувати лише по одному з наступних пар лінійно залежних алгебраїчних рівнянь: {(2.55), (2.56)}; {(2.57), (2.58)}; {(2.61), (2.62)} або одночасно пару рівнянь (2.63), (2.64)}.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Зберемо першу базову модель – Б1.

Для цього відберемо наступні рівняння: (2.55), (2.59), (2.60), (2.57), (2.63), (2.64), (2.65), – та представимо їх у стандартній формі матричної системи рівнянь відносно невідомого вектора (2.66)

$$[A]_{4m_{\max}, 4m_{\max}} X_{4m_{\max}}^A = B_{4m_{\max}}, \quad (2.67)$$

де у відповідності зі структурою вектора (2.66) матрицю $[A]_{4m_{\max}, 4m_{\max}}$ представимо у вигляді матричних блоків

$$[A]_{4m_{\max}, 4m_{\max}} = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 & A14 \\ A21 & A22 & A23 & A24 \\ A31 & A32 & A34 & A34 \\ A41 & A42 & A43 & A44 \end{bmatrix}; \quad B_{4m_{\max}} = \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \end{bmatrix}. \quad (2.68)$$

Розмірності блоків лівої частини $(m_{\max} \times m_{\max})$, а правої – m_{\max} . Їх елементи формуються виділеними рівностями, зокрема (2.55) формує перший ряд коефіцієнтів, як

$$A11 = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad A12 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad A13 = A14 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad B1 = [0]_{m_{\max}} \quad (2.69)$$

Формули (2.59), (2.60), при підстановці в них (2.63), (2.64) та (2.57) формують елементи другого ряду (2.68) як

$$A21 = \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad A22 = \begin{bmatrix} [0]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad (2.70)$$

$$A23 = \begin{bmatrix} [0]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad A24 = \begin{bmatrix} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad B2 = [0]_{m_{\max}}$$

Решта елементів формується рівняннями (2.65)

$$\begin{aligned} A31 &= [1]_{m_{\max}, m_{\max}}; & A32 &= [0]_{m_{\max}, m_{\max}}; & A33 &= -[1]_{m_{\max}, m_{\max}}; & A34 &= [0]_{m_{\max}, m_{\max}}; & B3 &= [0]_{m_{\max}} \\ A41 &= [0]_{m_{\max}, m_{\max}}; & A42 &= [1]_{m_{\max}, m_{\max}}; & A43 &= [0]_{m_{\max}, m_{\max}}; & A44 &= -[1]_{m_{\max}, m_{\max}}; & B4 &= [0]_{m_{\max}} \end{aligned} \quad (2.71)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Таким чином, ми отримали цілком коректну модель аналізу нанотехнологічного електронного кола, у вигляді замкнутої системи рівнянь, розмірності що має що має розмірність $(4m_{\max} \times 4m_{\max})$

Зауваження, безпосередній розв'язок рівнянь за першою базовою моделлю (2.67) очевидно має, на перший погляд нульовий розв'язок, або його взагалі не існує, внаслідок нульової правої частини $V=[0]$. Але це не так, позаяк вивід рівняння проводився відносно різниці струмів полюсів та напруг дуг компонентів з метою спрощення викладок, якщо ж відмовитись від різницевих дескрипторів (2.13) та перейти до «абсолютних», тобто скористатися початковою формою компонентних рівнянь (2.1) та (2.2), то права частина (2.67) не буде нульовою, зокрема $B1 = [U_0]_{m_{\max}}$, решта матричних елементів своїх значень не змінять.

12. Базова модель – Б2. Для цього типу моделі оберемо рівняння (2.56), (2.59), (2.60), (2.57), (2.63), (2.64), (2.65). З урахуванням останнього зауваження при виконанні аналогічних процедур значення першого рядка блочних елементів (2.68) матричного рівняння (2.67) матиме вигляд

$$A11 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}}; A12 = -[Y]_{m_{\max}, m_{\max}}; A13 = A14 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}} \quad B1 = [I_0]_{m_{\max}} \quad (2.72)$$

а решта блоків матимуть такий же вигляд як і в (2.70), (2.71).

Базова модель – Б3. Рівняння, що характеризують дану модель формуються з рівнянь моделі Б1, при заміні рівняння (2.57) на (2.58). У цьому випадку блоки матимуть вигляд

$$A11 = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}}; A12 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}}; A13 = A14 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}} \quad B1 = [U_0]_{m_{\max}} \quad (2.73)$$

$$A21 = \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; A22 = \begin{bmatrix} [0]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad (2.74)$$

$$A13 = \begin{bmatrix} [0]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; A14 = \begin{bmatrix} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad B2 = [0]_{m_{\max}}$$

Рівняння (2.71) залишаються без змін.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Базова модель – Б4. В цій моделі алгоритми формуються в спосіб моделі Б2, з заміною рівнянь (2.57) на (2.58). Блочні вирази при цьому зберігаються такими ж, як і в базовій моделі 2 за виключенням двох блоків, що набувають вигляду

$$A21 = \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} ; A22 = \begin{bmatrix} [0]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (2.75)$$

Базова модель – Б5. Починаючи з цієї моделі приведемо ще декілька варіантів, що суттєво відрізняються від попередніх видів тим, в при складанні рівнянь в них відсутні компонентно-комунікаторні рівняння в явному вигляді (2.59) та (2.60). Їх роль виконують компонентне рівняння комунікатора, що представлене в формі (2.61) або (2.62). Загальна сукупність рівнянь, що входить до складу цієї математичної моделі, складається з (2.55), (2.61), (2.65). Якщо не змінювати блочну структуру матричної системи (2.67), тобто рівнянь (2.66), (2.68), то неважко визначити, що її блоки визначатимуться як:

$$A11 = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A12 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A13 = A14 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}} \quad B1 = [U_0]_{m_{\max}} \quad (2.76)$$

$$A21 = A22 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A23 = [\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A24 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad B2 = [0]_{m_{\max}} \quad (2.77)$$

$$A31 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A33 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A32 = A34 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad B3 = [0]_{m_{\max}} \quad (2.78)$$

$$A41 = A43 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A42 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A44 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad B4 = [0]_{m_{\max}}$$

Базова модель – Б6. У цій моделі, на відміну від моделі Б5, замість компонентного рівняння (2.55), використовується компонентне рівняння (2.56), так що модель складається з рівнянь (2.56), (2.61), (2.65). В ній, на відміну від попередньої моделі, змінюються лише блоки першого рядка, що представляються у вигляді

$$A11 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A12 = -[Y]_{m_{\max}, m_{\max}} ; A13 = A14 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}} \quad B1 = [I_0]_{m_{\max}} \quad (2.79)$$

Решта блоків обчислюються за формулами (2.77) та (2.78).

Базова модель – Б7. При використанні рівняння комунікатора у вигляді провідних параметрів останні два метода можна модифікувати заміною рівняння (2.61) на (2.62). За цих умов у порівнянні з базовою моделлю Б5 змінюються лише блоки другого рядка, які приймають вигляд

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$A21 = A22 = [0]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad A23 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad A24 = -[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad B2 = [0]_{m_{\max}} \quad (2.80)$$

Базова модель – Б8. Формування рівнянь виконується, як і останньому випадку, з заміною (2.61) на (2.62) у порівнянні з моделлю Б6. При цьому, знову ж таки, змінюється лише другий рядок блочних матриць. Таким чином, рівняння формуються з наступних рядків блочних матриць: (2.79); (2.80); (2.78).

Роблячи висновки по підрозділу в цілому слід наголосити, що ньому вперше представлені математичні моделі аналізу електричних кіл, що обґрунтовані в електродинамічній спосіб з метою їх використання в області надзвичайно високочастотних сигналів. Запропоновані моделі зорієнтовані на аналіз швидкодіючих цифрових та аналогових електронних засобів, в тому числі нанотехнологічної електроніки. Для цього були розглянуті наступні моменти фізико-математичного моделювання предмета дослідження.

- Проведена чітка межа між дескрипторами компонентів, комунікатора та процесами, що реалізуються в ФП.
- Складені компонентні, компонентно-комунікаторні та комунікаторні рівняння у вигляді матричних співвідношень.
- Визначені комплексні матриці компонентів та електродинамічних параметрів комунікатора і вказані способи формування їх елементів, які базуються на розв'язанні задач електродинаміки по визначенню потоків векторів електричної та магнітної індукції з поверхонь, форма яких задається морфологією композиційних елементів комунікатора.
- Сформовані вісім базових методів аналізу нанотехнологічних електричних кіл. Відмінність між методами полягає в способах формування дескрипторів комунікатора та їх відображення в математичній моделі.

Таким чином, отримані результати дослідження надають можливість в системний спосіб виконувати аналіз ФП з метою оптимізації як схемотехнічних, так і конструктивно-морфологічних характеристик нанoeлектронних виробів на рівні проектування без відповідного виготовлення ескізних зразків та їх експериментального дослідження, що в нанотехнологіях веде до величезних зайвих фінансових витрат.

2.6 Підсумки та пропозиції за розділом 2

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

В даному розділі розвиваючи основні ідеї розділу 1, що до принципів розбудови САПР нанотехнологічних електронних виробів, виконане фізикоматематичне моделювання, в наслідок якого розроблена серія алгоритмів аналізу, що в однаковій мірі можуть бути застосовані до електронних ланцюгів, в тому числі і нанотехнологічної електроніки, що працює в широкому діапазоні частот: від ДВЧ до НВЧ. Новизна та розширення наукових уявлень про об'єкт дослідження представляється нижче приведеними конкретними результатами.

❖ На основі декомпозиції нанотехнологічного електронного функціонального перетворювача виконана класифікація дескрипторів його композиційних складових (компонентні, комунікаторні та дескриптори процесів) та постульовані шляхи синтезу дескрипторів в єдину математичну модель;

❖ Виконана побудова математичної моделі матричних компонентних рівнянь, що реалізована в блочному вигляді. На відміну від існуючих, форма запису запропонованої моделі дозволяє проводити оцінки взаємовпливів компонентів, тобто моделювати роботу як автономних, так і неавтономних компоненті у випадку їх взаємодії один з одним в межах об'єкту, що аналізується.

❖ Вказані можливі варіанти обчислення або виміру елементів Z- або Y-компонентної матриці. Блочна форма матриці за ненульових недіагональних блоків дозволяє виконати оцінку взаємних електромагнітних впливів компонентів ФП.

❖ Запропонована модель відображення джерел електричної енергії компонентів у вигляді додаткових напруг дуг та струмів полюсів, шляхом заміни діючих напруг та струмів на їх суперпозицію з приведеними величинами. Такий підхід дозволив утворити компактну форму компонентних рівнянь з їх доповненням рівняннями Кірхгофа у вигляді матриці інциденції компонентів та полюсів.

❖ Приведені шляхи побудови матриці узагальнених дескрипторів, що характеризують сукупність усіх компонентів одночасно на основі блочної структури. Кожний блоковий елемент узагальненої матриці відображає матричне рівняння окремо-взятого компонента.

❖ Розвинуті алгоритми формування компонентно-комунікаторних рівнянь. В основу зазначеної процедури покладені морфологічні рівняння Кірхгофа, в яких в неявний спосіб міститься інформація про просторову структуру нановиробу та способи

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

поєднання окремих компонентів в між собою. При формуванні компонентно-комунікаторних рівнянь використанні матриці дерев та контурів комунікатора. Бінарні елементи цих матриць формуються в звичайний спосіб на основі інциденції дуг та полюсів, до відповідних елементів комунікатора. Розмір матриць визначається кількістю незалежних дерев та контурів комунікатора, що допускає певну свободу вибору їх множини. Остання обставина має чимале значення при спрощенні задач електродинаміки за для визначення елементів матриці електродинамічних параметрів комунікатора.

❖ Розвинуті ідеї структурного аналізу – представлення комунікатора у вигляді композиційних складових: дерев та контурів, що моделюють електромагнітні взаємовпливи його композиційних елементів. Розроблена математична модель комунікатора, що відбиває характер взаємодій його композиційних складових, не лише на рівні незалежних дерев та контурів, а і взаємодії – у вигляді матричних співвідношення вплив-реакція по усіх дугах та полюсах комунікатора;

❖ Вперше виконана диференціація сигнальних дескрипторів процесів комунікатора на топологічні та просторово часові. Вказана принципова відмінність цих процесів та способи задавання граничних умов;

❖ Складені комунікаторні рівняння, що пов'язують впливи та реакції на дугах та полюсах комунікатора, через матриці електродинамічних параметрів;

❖ Вказані методи та способи обчислення елементів матриць електродинамічних параметрів, які відбивають різноманітні процеси: втрати в провідниках, втрати в діелектриках, потоки векторів електричної індукції між деревами та магнітні потоки векторів в контурах комунікатора. Зазначені процеси представляються масштабними співвідношеннями між впливом та реакцією, які репрезентуються опірними, провідними, індуктивними та ємнісними параметрами.

❖ Приведені як узагальнена форма комунікаторних рівнянь, так і її різноманітні видові модифікації, що орієнтовані на визначення наведених напруг в незалежних контурах та струмів зсуву з незалежних дерев комунікатора. Встановлені алгоритми перетворень форм верхнього рівня до форм нижнього рівня.

❖ Розвинута математична модель аналізу електричних кіл, що обґрунтована в електродинамічній спосіб з метою її використання в області надзвичайно

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

високочастотних сигналів. Запропонована модель у вигляді симбіозу компонентних, компонентно-комунікаторні та комунікаторні рівняння у вигляді матричних співвідношень.

❖ Визначені комплексні матриці компонентів та електродинамічних параметрів комунікатора і вказані способи формування їх елементів, які базуються на розв'язанні задач електродинаміки по визначенню потоків векторів електричної та магнітної індукції з поверхонь, форма яких задається морфологією композиційних елементів комунікатора.

❖ Вперше запропоновані вісім базових методів аналізу нанотехнологічних електричних кіл. Відмінність між методами полягає в способах формування дескрипторів комунікатора та компонентів і їх відображення в математичній моделі.

❖ Таким чином, отримані результати дослідження надають можливість в системний спосіб виконувати аналіз ФП з метою оптимізації як схемотехнічних, так і конструктивно-морфологічних характеристик наноелектронних виробів на рівні проектування без відповідного виготовлення ескізних зразків та їх експериментального дослідження. Запровадження результатів дослідження веде до скорочення фінансових витрат, за рахунок заміни натурного експерименту комп'ютерним моделюванням, що в нанотехнологіях є надзвичайно актуальною проблемою. Можна лише уявити економічний ефект, якщо на виготовлення одного ескізного зразка витрачаються сотні мільйонів доларів.

Таким чином, головний висновок по розділу – розроблені математичні моделі аналізу швидкодіючих цифрових та аналогових електронних засобів, в тому числі нанотехнологічної електроніки, що відрізняються від існуючих можливістю цілеспрямованого комп'ютерного моделювання морфології з метою мінімізації шкідливого впливу на їх характеристики електромагнітної взаємодії компонентів та комунікатора.

Equation Section (Next)

3 РОЗРОБКА АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ

3.1 Адаптивні алгоритми

На перший погляд здається, велика кількість базових моделей, що отримана в розділі 2 є зайвою. Але це не так ! Проти використання лише однієї моделі виступають принаймні два чинники. По-перше, алгоритмічна складність кожної з моделей визначається вибором адаптивного методу розв'язання рівнянь (2.67), що залежить від таких факторів, як: кількість нульових елементів матриць (2.66), (2.68), симетрія, розмір матриць тощо. По-друге, алгоритмічна складність обчислення самих елементів матриць (2.66), (2.68), як множини вхідних параметрів базової моделі, залежить не лише від алгоритму їх отримання, а від морфологічно-фізичних властивостей самого об'єкту дослідження. Обираючи ті, чи інші моделі можна спростити аналіз. Не торкаючись зараз порівняльної складності розв'язання електродинамічних задач, приведемо приклад обчислювального характеру: якщо елементи електродинамічних параметрів комунікатора дорівнює ∞ , то заміна Z-параметрів та Y-параметри, що можливо при використанні іншої базової моделі допоможе вирішити проблему переповнення комірок пам'яті.

Таким чином САПР мусить виконувати аналіз попередньої обробки вхідних потоків даних на предмет вибору тієї чи іншої розрахункової моделі аналізу функціонального перетворювача.

Кожна з базових математичних моделей зводиться до замкнутої системи алгебраїчних рівнянь, кількість яких більше, ніж кількість полюсів компонентів, в чотири рази. Виникає питання, а чи не можна зменшити кількість рівнянь. Відповідь безумовна схвальна. Так ! А але знову ж таки, це буде призводити до ускладнення розв'язання електродинамічних задач. Разом з тим, для простих форм геометричних структур, що дозволяють апіорі оцінити обчислювальну складність електромагнітного стану, спрощені алгоритми повинні також використовуватись в САПР наноелектроніки. Саме розробка таких алгоритмів складає зміст цього розділу.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Таким чином, в підрозділі приводиться аргументація розробки різноманітних методів моделювання з метою створення адаптивних обчислювальних систем проектування компонентів РТЦА.

3.2 Модель з фізичними дескрипторами процесу

Виконаємо певні кроки по спрощенню базових математичних моделей Б1...Б8, що розроблені в розділі 2. Кожна з них в кінцевому варіанті зводилась до системи алгебраїчних рівнянь (2.67) порядку $4m_{\max}$, тобто кількість яких в чотири рази перевищувала сукупну кількість полюсів усіх компонентів. Спрощення стосуватиметься зменшенню кількості рівнянь за рахунок вибору іншої системи дескрипторів, що описують процес. Методи аналізу, що будуть розроблятися в цьому та наступному підрозділах повністю співпадають в окремому випадку з класичними методами аналізу електричних кіл за умови нульового режиму комунікатора, що в принципі буде з одного боку підтвердженням правильності отриманих результатів, а з іншого – коректності математичних перетворень.

Розпочнемо з сигнальних дескриптори процесу, як фізичних величин, що піддаються безпосередньому вимірюванню: струмів полюсів та напруги дуг усіх компонентів. В базових моделях Б1...Б8 вони задають «крайові умови» на межі комунікатор-компонент. У зв'язку з цим зменшимо кількість сигнальних дескрипторів базових моделей шляхом заміни просторово-часових дескрипторів на часові (топологічні) дескриптори компонентів у відповідності з формулою (2.65). При цьому слід мати на увазі, що така заміна відбувається лише в точках межі комунікатор-компонент, і не стосуються внутрішнього розподілу струмів та зарядів по струмопровідним частинам комунікатора. Нагадаємо, що потоки векторів індукції, що породжуються зазначеним розподілом, формують дескриптори комунікатора, які входять в модель у вигляді $[\tilde{Z}], [\tilde{Y}]$ матриць (2.61)...(2.64) електродинамічних параметрів комунікатора.

Для цього в базис змінних (2.66) підставимо (2.65), а результат підстановки в (2.67). При цьому, з урахуванням (2.68), рівняння (2.67) може бути представлено у вигляді

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$\begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 & A14 \\ A21 & A22 & A23 & A24 \\ A31 & A32 & A34 & A34 \\ A41 & A42 & A43 & A44 \end{bmatrix}_{4m_{\max}, 4m_{\max}} \begin{bmatrix} I_{m_{\max}} \\ U_{m_{\max}} \\ I_{m_{\max}} \\ U_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{4m_{\max}} = \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \end{bmatrix}_{4m_{\max}} \quad (3.1)$$

Система рівнянь (3.1) містить $4m_{\max}$ рівнянь та $2m_{\max}$ невідомих. Розв'язок такої системи за умов сумісності (існування принаймні одного розв'язку, що задовольняє усім рівнянням (3.1)) та визначеності (має єдиний розв'язок) передбачає відкидання зайвих рівнянь та отримання рішення з перших $2m_{\max}$ рівнянь.

$$\begin{bmatrix} (A11 + A13)I_{m_{\max}} & (A12 + A14)U_{m_{\max}} \\ (A21 + A23)I_{m_{\max}} & (A22 + A24)U_{m_{\max}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B1_{m_{\max}} \\ B2_{m_{\max}} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Такий перехід можливий за умови, коли ранг квадратної матриці лівої частини (3.1) дорівнює $2m_{\max}$ та є меншим за загальну кількість рівнянь $4m_{\max}$. Неважко довести, що для пристроїв, що можуть бути реалізовані фізично, усі перераховані признаки: сумісності; визначеності; рангові, – виконуються, що дає підстави здійснити строгий перехід від (3.1), через (3.2) до матричного рівняння (3.3).

$$\begin{bmatrix} A11 + A13 & A12 + A14 \\ A21 + A23 & A22 + A24 \end{bmatrix}_{2m_{\max}, 2m_{\max}} \begin{bmatrix} I_{m_{\max}} \\ U_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} = \begin{bmatrix} B1_{m_{\max}} \\ B2_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} \quad (3.3)$$

Матрична рівність (3.3) дозволяє представити загальну математичну модель у вигляді

$$[a]_{2m_{\max}, 2m_{\max}} x_{2m_{\max}}^{AC} = b_{2m_{\max}} \quad (3.4)$$

де

$$[a]_{2m_{\max}, 2m_{\max}} = \begin{bmatrix} a11 & a12 \\ a21 & a22 \end{bmatrix}_{2m_{\max}, 2m_{\max}} \quad (3.5)$$

– прямокутна матриця лівої частини (3.4), коефіцієнти якої виражаються через параметри компонентів та комунікатора;

$$x_{2m_{\max}}^{AC} = \begin{bmatrix} I_{m_{\max}} \\ U_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} \quad (3.6)$$

– вектор-стовпець невідомих струмів полюсів та напруг дуг компонентів, відносно яких складається математична модель;

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$b_{2m_{\max}} = \begin{bmatrix} b1_{m_{\max}} \\ b2_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} \quad (3.7)$$

– відомий вектор стовпець, значення елементів якого відображають дію активних (джерельних) компонентів, та не автономність компонентів і комунікатора.

В загальних рисах представлена математична модель (3.4) може розкриватися через свої коефіцієнти для кожної з базових моделей Б1...Б8 підрозділу 2.5. Розглянемо їх в тій же послідовності, але назву (Б-базова) кожного з них змінимо на назву БС (базово-скорочена)

Модель зі скороченим базисом – БС1. В цій моделі при підстановці в (3.5) відповідних елементів блочної конструкції (3.3) отримаємо

$$a11 = A11 + A13 = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a12 = A12 + A14 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.8)$$

$$a21 = A21 + A23 = \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} + \begin{bmatrix} [0]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.9)$$

$$a22 = A22 + A24 = \begin{bmatrix} [0]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} + \begin{bmatrix} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} . \quad (3.10)$$

Праві частини обчислюються як

$$b1_{m_{\max}} = [U_0]_{m_{\max}} ; \quad b2_{m_{\max}} = [0]_{m_{\max}} \quad (3.11)$$

Модель зі скороченим базисом – БС2. Для цієї моделі випишемо блокові матриці, що не співпадають з – відповідними матрицями моделі БС1.

$$\begin{aligned} a11 &= A11 + A13 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} + [0]_{m_{\max}, m_{\max}} = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \\ a12 &= -[Y]_{m_{\max}, m_{\max}} + [0]_{m_{\max}, m_{\max}} = -[Y]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \\ b1_{m_{\max}} &= [I_0]_{m_{\max}} . \end{aligned} \quad (3.12)$$

Решта матричних блоків дорівнюють відповідним блоками з БС1.

Результат скорочення базису Б3 співпадає з БС1, а Б4 з БС2 тому, як окремі методи вони не розглядаються.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Модель зі скороченим базисом – БС3. Прототипом цієї моделі є рівняння моделі Б5, у відповідності з якими з усіх блоків моделі обираються до розгляду лише два перших рядка, тобто рівняння (2.76) та (2.77), що формують блоки матриць даної моделі у відповідності з (3.3)...(3.7), як

$$a11 = A11 + A13 = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a12 = A12 + A14 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad b1_{m_{\max}} = [U_0]_{m_{\max}} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} a21 = A21 + A23 &= [0]_{m_{\max}, m_{\max}} + [\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} = [\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ a22 = A22 + A24 &= [0]_{m_{\max}, m_{\max}} - [1]_{m_{\max}, m_{\max}} = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad b2_{m_{\max}} = [0]_{m_{\max}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Модель зі скороченим базисом – БС4. Для цієї моделі, прототипом якої є Б6 властива зміна по відношенню до БС5 лише елементів першого рядка у відповідності з (2.79)

$$a11 = A11 + A13 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a12 = A12 + A14 = -[Y]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad b1_{m_{\max}} = [I_0]_{m_{\max}} , \quad (3.15)$$

а решта блочних елементів співпадають

$$a21 = A21 + A23 = [\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a22 = A22 + A24 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad b2_{m_{\max}} = [0]_{m_{\max}} . \quad (3.16)$$

Модель зі скороченим базисом – БС5. У цій моделі активне застосування найшли матриці електродинамічних провідностей комунікатора. Її прототипом стала модель Б7. У порівнянні з БС3 у цій моделі змінюються лише параметри

$$a21 = A21 + A23 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a22 = A22 + A24 = -[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} . \quad (3.17)$$

Решта блочних матриць зберігають свій вигляд такими як і в БС3

$$a11 = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a12 = -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad b1_{m_{\max}} = [U_0]_{m_{\max}} ; \quad b2_{m_{\max}} = [0]_{m_{\max}} . \quad (3.18)$$

Модель зі скороченим базисом – БС6. Побудова цієї моделі заснована на Б8 і тому, у порівнянні з БС4, підматриці другого рядка блочних матриць (3.4)...(3.7) на відміну від БС4 матимуть вигляд

$$a21 = A21 + A23 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a22 = A22 + A24 = -[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} . \quad (3.19)$$

а решта блочних матриць залишаються без змін

$$a11 = [1]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad a12 = -[Y]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad b1_{m_{\max}} = [I_0]_{m_{\max}} \quad b2_{m_{\max}} = [0]_{m_{\max}} . \quad (3.20)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Резюмуючи, слід відмітити, що в даному підрозділі отримані математичні моделі аналізу РТЦА електронних засобів, що мають меншу алгоритмічну складність у порівнянні з базовими моделями, що приведені в розділі 2. Такий результат досягнуто за рахунок відмови від вживання поняття сигналів дескрипторів процесу які стосуються комунікатора: струмів полюсів та напруг дуг комунікатора. А тому, користуючись розробленими моделями БС1...БС6 слід пам'ятати, що вказані дескриптори комунікатора лише на межі його спряження з компонентами є такими, що дорівнюють одне одному. Всередині його об'єму дескриптори комунікатора залежать від координат точки спостереження. Але оскільки морфологічна структура комунікатора вже означена у вигляді його матриць електродинамічних параметрів, що входить до моделі у вигляді топологічної структури, такий спосіб моделювання є цілком коректним.

Неважко перевірити, що запропоновані 6 різноманітних методів аналізу, БС1...БС6, в режимі відсутності будь-якого впливу комунікатора, що має місце за умови рівності нулю матриці електродинамічних параметрів зводяться до одного з методів аналізу електричних ланцюгів – методу струмів та напруг гілок (МСНГ) електричного кола [83, 86, 159, 161].

3.3 Метод струмів полюсів

13. Знижуючи порядок систем рівнянь (3.4) до m_{\max} шляхом вилучення вектора напруг $U_{m_{\max}}$ зі списку невідомих величин можна розробити алгоритми, які доцільно назвати методи струмів полюсів (МСП). За базову сукупність невідомих в МПС обрано струми полюсів, а тому кількість рівнянь та порядок системи лінійних алгебраїчних рівнянь математичної моделі буде визначатись числом полюсів усіх компонентів m_{\max} . Щоб отримати таку систему з рівнянь підставимо в (3.4) рівняння (3.5)...(3.7)

$$\begin{bmatrix} a11 & a12 \\ a21 & a22 \end{bmatrix}_{2m_{\max}, 2m_{\max}} \begin{bmatrix} I_{m_{\max}} \\ U_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} = \begin{bmatrix} b1_{m_{\max}} \\ b2_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} \quad (3.21)$$

14. замінюючи у (3.21) вектор невідомих $U_{m_{\max}}$ у відповідності з (2.55), отримуємо

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$\begin{bmatrix} a11 & a12 \\ a21 & a22 \end{bmatrix}_{2m_{\max}, 2m_{\max}} \begin{bmatrix} I_{m_{\max}} \\ [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} [I]_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} = \begin{bmatrix} b1_{m_{\max}} \\ b2_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} \quad (3.22)$$

систему з двох матричних рівнянь

$$\begin{cases} \left[a11I_{m_{\max}} + a12[Z]_{m_{\max}, m_{\max}} I_{m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} = b1_{m_{\max}} ; \\ \left[a21I_{m_{\max}} + a22[Z]_{m_{\max}, m_{\max}} I_{m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} = b2_{m_{\max}} . \end{cases} \quad (3.23)$$

15. в якій кількості невідомих перевищують кількість рівнянь в 2 рази.

16. Ранг цієї системи визначається нижнім матричним рівнянням та дорівнює для реальних фізичних процесів m_{\max} . Таким чином, розв'язок системи (3.23) $I_{m_{\max}}$ співпадає з розв'язком нижнього матричного рівняння

$$\left[a21 \cdot I_{m_{\max}} + a22 \cdot [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot I_{m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} = b2_{m_{\max}} \quad (3.24)$$

17. і, в той же час, задовольняє верхнє матричне рівняння. Окрім того, підстановка отриманого розв'язку в (2.1) або, відповідно, в (2.55) надає можливість визначення напруг дуг компонентів.

18. Представляючи (3.24) у вигляді одного рівняння, записуємо кінцевий результат

$$\left[a^c \right]_{m_{\max}, m_{\max}} x_{m_{\max}} = b_{m_{\max}}^c, \quad (3.25)$$

$$\left[a^c \right]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[a21 + a22 \cdot [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad b_{m_{\max}}^c = b2_{m_{\max}} \quad (3.26)$$

відомі коефіцієнти лівої та правої частини системи рівнянь (3.25), де індекс «с» означатиме метод - МСП, а

$$x_{m_{\max}} = I_{m_{\max}} \quad (3.27)$$

19. невідомий вектор струмів полюсів усіх компонентів.

20. Зрозуміло, що достатньо загальна модель (3.25) може бути отримана лише з моделей БС1...БС6.

21. Струмова модель МСП1. Розкриємо матриці (3.26) через матричні блоки, що входять до моделі БС1

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$[a^c]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[\begin{array}{c} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{array} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} + \left[\begin{array}{c} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{array} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.28)$$

$$b_{m_{\max}}^c = \left[\begin{array}{c} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{array} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} U_0 . \quad (3.29)$$

Струмова модель МСП2. Представлення матриці компонентів через обернену до матриці $[Z]_{m_{\max}, m_{\max}}$ матрицю провідності $[Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1}$

$$[Z]_{m_{\max}, m_{\max}} = [Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} \quad (3.30)$$

дозволяє модифікувати алгоритм МСП1, шляхом виконання підстановки (3.30) в (3.28)

$$[a^c]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[\begin{array}{c} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{array} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} + \left[\begin{array}{c} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{array} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} ; \quad (3.31)$$

та корекції при необхідності матриці (3.29).

Струмова модель МСП3. Прототипом моделі є модель БСЗ, коефіцієнти (3.14) якої і формують дану модель

$$[a^c]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[[\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} - [1]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.32)$$

$$b_{m_{\max}}^c = \left[[Z]_{m_{\max}, m_{\max}} U_0 \right]_{m_{\max}} . \quad (3.33)$$

22. Струмова модель МСП4. Ця модель може бути отримана з МСП3 шляхом підстановки (3.30) в рівняння (3.32), (3.33)

$$[a^c]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[[\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} - [1]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.34)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$b_{m_{\max}}^c = \left[\begin{array}{c} [Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} \\ U_0 \end{array} \right]_{m_{\max}}. \quad (3.35)$$

23. Струмова модель МСП5. Такого штибу модель заснована на БС5, рівняння якого (3.17) дозволяють сформулювати

$$\left[a^c \right]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[\begin{array}{c} [1]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} \end{array} \right]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad (3.36)$$

$$b_{m_{\max}}^c = \left[\begin{array}{c} [\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ U_0 \end{array} \right]_{m_{\max}}. \quad (3.37)$$

24. Струмова модель МСП6. Нарешті використання (3.30) дозволяє модифікувати МСП5 в напрямку використання провідних параметрів компонента

$$\left[a^c \right]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[\begin{array}{c} [1]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} \end{array} \right]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad (3.38)$$

$$b_{m_{\max}}^c = \left[\begin{array}{c} [\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ U_0 \end{array} \right]_{m_{\max}}. \quad (3.39)$$

25. В даному підрозділі розроблені математичні моделі аналізу функціональних перетворювачів, що відрізняються від попередніх, скороченою множиною змінних за які обирається однорідні змінні у вигляді струмів полюсів компонентів. У порівнянні з попередніми моделями БС множина змінних в МСП скоротилася вдвічі, а у порівнянні з базовими (Б-моделями) в чотири рази.

3.4 Метод напруг дуг компонентів

Слід зауважити, 6 розроблених в підрозділі 3.3 моделей МСП до певної міри ускладнюються формуванням не лише лівої, а і правої частини загальної для всіх методів системи рівнянь (3.25). Ускладнення виникли при відображенні в моделях активного характеру компонентів. Разом з тим, для спрощення форми отриманих результатів в подальшому будемо використовувати (2.16), що дозволить не конкретизувати праву частину рівняння (3.25), а лише фіксувати нульовий, або ненульовий її характер. Як невідомі в цьому підрозділі обрано однорідну базисну множину невідомих – напруги дуг компонентів, а тому моделі аналізу, що розробляються будемо називати методами напруг дуг (МНД). Для цього,

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

використовуючи компонентні рівняння (2.14), (2.15) виразимо вектор струмів, через вектор напруг

$$, [I]_{m_{\max}} = [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} [U]_{m_{\max}}, \quad (3.40)$$

де

$$[Y]_{m_{\max}, m_{\max}} = [Z]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1}; \quad [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} = [Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} \quad (3.41)$$

26. Підставимо в (3.4) рівняння (3.5)...(3.7)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_{2m_{\max}, 2m_{\max}} \begin{bmatrix} I_{m_{\max}} \\ U_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} = \begin{bmatrix} b_{1m_{\max}} \\ b_{2m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} \quad (3.42)$$

27. замінюючи у (3.42) вектор невідомих (3.40), отримуємо

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_{2m_{\max}, 2m_{\max}} \begin{bmatrix} [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} \\ [U]_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} = \begin{bmatrix} b_{1m_{\max}} \\ b_{2m_{\max}} \end{bmatrix}_{2m_{\max}} \quad (3.43)$$

систему з двох матричних рівнянь

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_{11} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [U]_{m_{\max}} + a_{12} \cdot [U]_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} &= b_{1m_{\max}}; \\ \begin{bmatrix} a_{21} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [U]_{m_{\max}} + a_{22} \cdot [U]_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} &= b_{2m_{\max}}. \end{aligned} \quad (3.44)$$

28. в якій кількості невідомих перевищують кількість рівнянь в 2 рази.

29. Ранг цієї системи визначається нижнім матричним рівнянням та дорівнює для реальних фізичних процесів m_{\max} . Таким чином, розв'язок $U_{m_{\max}}$ системи (3.44)

співпадає з розв'язком нижнього матричного рівняння

$$\begin{bmatrix} a_{21} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [U]_{m_{\max}} + a_{22} \cdot [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [U]_{m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} = b_{2m_{\max}} \quad (3.45)$$

30. і, в той же час, задовольняє верхнє матричне рівняння. Окрім того, підстановка отриманого розв'язку в (3.40) або, відповідно, в (2.55) надає можливість визначення струмів полюсів компонентів.

31. Представляючи (3.45) у вигляді одного рівняння, записуємо кінцевий результат

$$[a^i]_{m_{\max}, m_{\max}} x_{m_{\max}} = b_{m_{\max}}^i, \quad (3.46)$$

$$[a^i]_{m_{\max}, m_{\max}} = [a_{21} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} + a_{22}]_{m_{\max}, m_{\max}}; \quad b_{m_{\max}}^i = b_{2m_{\max}} \quad (3.47)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

відомі коефіцієнти лівої та правої частини системи рівнянь (3.46), де індекс «н» означатиме метод - МНД, а

$$x_{m_{\max}} = U_{m_{\max}} \quad (3.48)$$

32. – невідомий вектор напруг дуг усіх компонентів.

33. Зрозуміло, що достатньо загальна модель (3.25) може бути отримана лише з моделей БС1...БС6.

34. Метод напруг дуг – МНД1. Розкриємо матриці (3.26) через матричні блоки, що входять до моделі БС1

$$\begin{bmatrix} a^i \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} \\ [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.49)$$

$$b_{m_{\max}}^i = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} \\ I_0 \end{bmatrix}_{m_{\max}} . \quad (3.50)$$

Метод напруг дуг – МНД2. Підстановка (3.40) в (3.49) дозволяє модифікувати алгоритм МНД2, в результаті отримуємо

$$\begin{bmatrix} a^i \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} [D]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ -[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [M]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} \\ [Z]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -[\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \\ [K]_{p_{\max}, m_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} , \quad (3.51)$$

а права частина (3.50) залишається без змін.

Метод напруг дуг – МНД3. Прототипом моделі є модель БС3, коефіцієнти (3.14) якої і формують дану модель

$$\begin{bmatrix} a^i \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} = \begin{bmatrix} [\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ -[1]_{m_{\max}, m_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.52)$$

$$b_{m_{\max}}^i = \begin{bmatrix} [Z]_{m_{\max}, m_{\max}} \\ 2_0 \end{bmatrix}_{m_{\max}} . \quad (3.53)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

35. Метод напруг дуг – МНД4. Ця модель може бути отримана з МНД3 шляхом використання оберненої до $[Y]_{m_{\max}, m_{\max}}$ матриці (3.41) до підстановки (3.30) в рівняння (3.32), (3.33)

$$[a^H]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[[\tilde{Z}]_{m_{\max}, m_{\max}} [Z]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} - [1]_{m_{\max}, m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.54)$$

$$b_{m_{\max}}^H = \left[[Y]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} I_0 \right]_{m_{\max}} . \quad (3.55)$$

36. Метод напруг дуг – МНД5. Такого штибу модель заснована на БС5, рівняння якого (3.17) дозволяють сформулювати

$$[a^H]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[[1]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} - [\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.56)$$

$$b_{m_{\max}}^H = \left[[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} I_0 \right]_{m_{\max}} . \quad (3.57)$$

37. Метод напруг дуг – МНД6. Нарешті використання (3.30) дозволяє модифікувати МНД5 в напрямку використання параметрів компонентів у вигляді матриці комплексних опорів

$$[a^H]_{m_{\max}, m_{\max}} = \left[[1]_{m_{\max}, m_{\max}} \cdot [Z]_{m_{\max}, m_{\max}}^{-1} - [\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} \right]_{m_{\max}, m_{\max}} ; \quad (3.58)$$

$$b_{m_{\max}}^H = \left[[\tilde{Y}]_{m_{\max}, m_{\max}} I_0 \right]_{m_{\max}} . \quad (3.59)$$

38. Таким чином, в підрозділі розроблені математичні моделі аналізу функціональних перетворювачів, що відрізняються від попередніх, скороченою множиною змінних за які обирається однорідні змінні у вигляді напруг дуг компонентів. У порівнянні з попередніми моделями БС множина змінних в МНД скоротилася вдвічі, а у порівнянні з базовими (Б-моделями) в чотири рази. Отримані моделі у порівнянні з моделями підрозділу 3.4 по обчислювальній складності рівноцінні, але якщо фізичні задачі вимагають знання напруг на ділянках ФП, то запропоновані в даному підрозділі моделі мають певну перевагу.

3.5 Дедуктивне моделювання нанотехнологічної електроніки

3.5.1 Допоміжні розрахункові дескриптори

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Як невідомі величини у попередніх алгоритмічних процедурах системних методів аналізу, підрозділи 3.2...3.4, використовувались реальні струми полюсів та реальні напруги дуг компонентів. Подальша можливість скорочення базису за умови коли ранг матриці менший за кількість рівнянь, вичерпана. Шляхи розробки алгоритмів з меншою алгоритмічною складністю можливі при введенні допоміжних розрахункових величин на кшталт незалежних контурних струмів, відносних вузлових напруг, струмів та напруг дерев, струмів та напруг компонентів, через які можливо визначення реальних дескрипторів на основі певних алгоритмічно установлених зв'язків. Якщо для зв'язків такого алгоритму не існує, то практична цінність обчислювальних процедур невисока і потребує штучних, погано формалізованих прийомів по визначенню решти дескрипторів, якщо це взагалі можливо.

Принципова можливість розробки таких алгоритмів ґрунтується на уявленні векторів (2.3), (3.27), (3.48) у відповідності зі структурою рівнянь (3.25), (3.46) у вигляді блоків, що стосуються дерев – r_{\max} , контурів – p_{\max} та компонентів – j_{\max}

$$[I]_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} I_{r_{\max}} \\ I_{p_{\max}} \\ I_{j_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}} ; I_{r_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dots \\ \dot{I}_{r_{\max}} \end{bmatrix}_{r_{\max}} ; I_{p_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{r_{\max}+1} \\ \dots \\ \dot{I}_{r_{\max}+p_{\max}} \end{bmatrix}_{p_{\max}} ; I_{j_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{r_{\max}+p_{\max}+1} \\ \dots \\ \dot{I}_{r_{\max}+p_{\max}+j_{\max}} \end{bmatrix}_{p_{\max}} . \quad (3.60)$$

$$[U]_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} U_{r_{\max}} \\ U_{p_{\max}} \\ U_{j_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}} ; U_{r_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dots \\ \dot{U}_{r_{\max}} \end{bmatrix}_{r_{\max}} ; U_{p_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{r_{\max}+1} \\ \dots \\ \dot{U}_{r_{\max}+p_{\max}} \end{bmatrix}_{p_{\max}} ; U_{j_{\max}} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{r_{\max}+p_{\max}+1} \\ \dots \\ \dot{U}_{r_{\max}+p_{\max}+j_{\max}} \end{bmatrix}_{p_{\max}} . \quad (3.61)$$

Зрозуміло, що системи рівнянь (3.27), (3.48) шляхом підстановки можна привести до будь якого блочного елемента, (3.60), (3.61) відповідно, більше того, – до будь-якої комбінації з блоків (3.60), (3.61), але проблема полягає в у можливості повернення від цих блоків до векторів полюсів компонентів $[I]_{m_{\max}}$ та (або) вектору напруг дуг компонентів $[U]_{m_{\max}}$ в цілому.

Зауваження. Нумерація дуг та полюсів компонентів, як зрештою і самих компонентів, для подальшого використання блочних структур (3.60), (3.61), не може

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

бути довільною. Вона мусить виконуватись в такий спосіб, щоб матриці дерев $[D]_{r_{\max}, m_{\max}}$ – (2.22), (2.23), контурів $[K]_{p_{\max}, m_{\max}}$ – (2.25), (2.26) та компонентів $[M]_{j_{\max}, m_{\max}}$ – (2.17), (2.18) містили одиничну матрицю відповідного розміру $r_{\max}, p_{\max}, j_{\max}$. Процедура перенумерації полюсів, дуг, компонентів шляхом перестановки рядків та стовпців добре відома [53, 64, 106, 119, 131, 157], а тому в подальшому будемо вважати, що (3.60) та (3.61) розбиті саме за вказаною вимогою. При конфлікті зазначених вимог слід надавати перевагу формуванню незалежних дескрипторів, у відповідності з обраною моделлю аналізу. Ці моделі докладно розглядаються в наступних пунктах даного підрозділу.

3.5.2 Контурні дескриптори

Перший з алгоритмів, що допускає повернення (визначення усіх елементів) до $[I]_{m_{\max}}$, характеризується тим, що за дескриптори процесу в ньому обираються незалежні контурні струми компонентно-комунікаторної структур функціонального перетворювача. Такі розрахункові величини вводяться в класичній теорії електричних ланцюгів [86] у випадку виключно лінійних компонентів. За найпростіший самостійний елемент, що має власні характеристики обираються незалежні контури. Незалежність визначається тим, що кожний контур повинен мати власну, унікальну гілку (полюс компонента, або комунікатора) яка належить виключно цьому контуру і ніякому іншому. Така гілка дозволяє ідентифікувати (відрізнити) цей контур від інших. В сукупності алгебраїчна сума контурних струмів дозволяє обчислити реальні струми решти гілок, що входять до складу різних незалежних контурів одночасно.

Алгоритмічне виділення незалежних контурів ґрунтується на трансформації матриці $[K]_{p_{\max}, m_{\max}}$ шляхом перестановки рядків матриці (2.25).

Математична моделі, що відбиває такий підхід, очевидно, ґрунтуються на методах МСП, що розроблені в підрозділі 3.3. З означення контурного струму випливає, що кількість незалежних контурів визначається цикломатичним числом [25, 90], яке обчислюється для введеної розрахункової моделі, як (2.21). За аналогією з теорією ланцюгів назвемо математичну модель, методом контурних струмів (МКС).

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Для розробки математичної моделі, у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно контурних струмів розглянемо загальне рівняння (3.25) з МСП та представимо його у відповідності з (3.28), (3.29) та (3.60) як

$$\begin{bmatrix} [a_{11}^{kc}] & [a_{12}^{kc}] & [a_{13}^{kc}] \\ [a_{21}^{kc}] & [a_{22}^{kc}] & [a_{23}^{kc}] \\ [a_{31}^{kc}] & [a_{32}^{kc}] & [a_{33}^{kc}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r_{\max}} \\ I_{p_{\max}} \\ I_{j_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} b_1^{kc} \\ b_2^{kc} \\ b_3^{kc} \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

де елементи $[a_{m,n}^{kc}]$ та b_m^{kc} обчислюються шляхом структуризації матриці (3.26) на блоки, що мають розміри, які задаються як по вертикалі, так і горизонталі числами $r_{\max}, p_{\max}, j_{\max}$. Деталізуючи розбивку (3.62) по заданим числам можна отримати окремі матричні рівності

$$\begin{aligned} & \left[[a_{11}^{kc}]_{r_{\max}, r_{\max}} I_{r_{\max}} + [a_{12}^{kc}]_{r_{\max}, p_{\max}} I_{p_{\max}} + [a_{13}^{kc}]_{r_{\max}, j_{\max}} I_{j_{\max}} \right] = [b_1^{kc}]_{r_{\max}} \\ & \left[[a_{21}^{kc}]_{p_{\max}, r_{\max}} I_{r_{\max}} + [a_{22}^{kc}]_{p_{\max}, p_{\max}} I_{p_{\max}} + [a_{23}^{kc}]_{p_{\max}, j_{\max}} I_{j_{\max}} \right] = [b_2^{kc}]_{p_{\max}} \\ & \left[[a_{31}^{kc}]_{j_{\max}, r_{\max}} I_{r_{\max}} + [a_{32}^{kc}]_{j_{\max}, p_{\max}} I_{p_{\max}} + [a_{33}^{kc}]_{j_{\max}, j_{\max}} I_{j_{\max}} \right] = [b_3^{kc}]_{j_{\max}} \end{aligned} \quad (3.63)$$

З першого рівняння (3.63) находимо

$$I_{r_{\max}} = [a_{11}^{kc}]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [b_1^{kc}]_{r_{\max}} - [a_{11}^{kc}]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [a_{12}^{kc}]_{r_{\max}, p_{\max}} I_{p_{\max}} - [a_{11}^{kc}]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [a_{13}^{kc}]_{r_{\max}, j_{\max}} I_{j_{\max}} \quad (3.64)$$

Підстановка (3.64) в третє рівняння (3.63) надає можливість виразити $I_{j_{\max}}$ у вигляді лінійної комбінації векторів $I_{r_{\max}}$ та $I_{p_{\max}}$

$$I_{j_{\max}} = [\alpha 1] I_{p_{\max}} + [\beta 1]_{p_{\max}} \quad (3.65)$$

де $[\alpha 1], [\beta 1]$ – числові матриці, що виражаються через елементи $[a_{m,n}^{kc}]$ та b_m^{kc} рівняння (3.63) подібно до (3.64). Підстановка (3.65) в (3.64), виразить в такій же формі і

$$I_{r_{\max}} = [\alpha 2] I_{p_{\max}} + [\beta 2]_{r_{\max}} \quad (3.66)$$

Використання співвідношень (3.65) та (3.66) дозволяє друге рівняння (3.63) представити у вигляді, що характерний для МКС.

$$[\alpha]_{p_{\max}, p_{\max}} I_{p_{\max}} = \beta_{p_{\max}} \quad (3.67)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

де, як зазначалось раніше $I_{p_{\max}}$ вектор невідомих контурних струмів, а матриці $[\alpha]_{p_{\max}, p_{\max}}, \beta_{p_{\max}}$ – відомі коефіцієнти матричної системи (3.67) лінійних алгебраїчних рівнянь.

Зрозуміло, що «тягнути» аналітичні перетворення від моделей БС до МКС моделі (3.67) є достатньо громіздкою процедурою. Саме тому тут приведена обчислювальна процедура, яка в першу чергу орієнтується на застосуванні чисельних, а не аналітичних, методів виконання математичних операцій над матрицями. Але при необхідності алгоритм дозволяє представити елементи матриць $[\alpha]_{p_{\max}, p_{\max}}, \beta_{p_{\max}}$ через блоки матриці (3.62) і в аналітичній формі.

3.5.3 Струмові математичні моделі

До струмових моделей доцільно віднести такі, що оперують усіма, або частиною струмів полюсів компонентів. До таких методів можна віднести МСП, МКС та серію наступних методів аналізу, що їх можна отримати з загальної системи рівнянь (3.62).

Метод струмів дерев (МСД). Цілком очевидно, що метод підстановок «частковий розв'язок» системи (3.62) можна виконати не лише по відношенню до контурних струмів, а і по відношенню до незалежних струмів дерев, де елементами матриці $I_{r_{\max}}$ повинні бути струми (3.60), що, як зазначалось, під «незалежністю» розуміють такий порядок формування рівнянь, за якого до матриці $I_{r_{\max}}$ попадають лише по одному струму від кожного незалежного дерева.

Виконуючи послідовність аналітичних перетворень над блочними матрицями (3.63) можна отримати рівняння

$$[\alpha^d]_{r_{\max}, r_{\max}} I_{r_{\max}} = \beta_{r_{\max}}^d \quad (3.68)$$

що і є кінцевим результатом моделювання за МСД

Метод струмів компонентів (МСК). Відмінність цієї моделі від попередньої – лише в послідовності операцій підстановок в рівняннях (3.63), що, в підсумку, також призводить до системи рівнянь типу (3.67), або (3.68), що має розмір, який дорівнює числу компонентів

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$\left[\alpha^k \right]_{j_{\max}, j_{\max}} I_{j_{\max}} = \beta_{j_{\max}}^k \quad (3.69)$$

Поряд з методами МКС (3.67), МСД (3.69), МСК цілком можливо застосування гібридних струмових дескрипторів: дерева-контури; дерева-компоненти; контури-компоненти. Моделі перерахованих методів також створюються на основі (3.63) і в алгоритмічному аспекті подібні до методів з однорідними дескрипторами МКС (3.67), МСД (3.69), МСК.

В підрозділі на основі розбиття вектора невідомих струмів, на блоки однорідних струмів: полюсів дерев; полюсів компонентів та контурних струмів, – розроблені алгоритми, що дозволяють сформувати розрахункові моделі по відношенню до цих окремих блоків, що суттєво зменшує алгоритмічну складність у порівнянні з представленими раніше моделями МСП1...МСП6 підрозділу 3.3.

3.6 Індуктивні способи моделювання

3.6.1 Стратегія отримання моделі

«Струмові» моделі (3.28)...(3.67), тобто такі, в яких як вектор невідомих величин використовувались струми, будувались на основі узагальненої системи рівнянь (3.22)...(3.27), як окремі її випадки. Такий метод їх розробки можна вважати дедуктивним: від загального до окремого. Недоліками такого підходу є складний ланцюжок операцій по отриманню блочних матриць через подрібнення загальних матриць великого розміру за для отримання того, чи іншого «струмового» методу аналізу.

До певної міри, симетричними моделями по відношенню до моделей струмових можна вважати моделі напругові, які можна побудувати, застосовуючи методи та прийоми підрозділів 3.3...3.5 складання рівнянь по відношенню до скорочених множин напруг

$$[U]_{r_{\max}}, [U]_{p_{\max}}, [U]_{j_{\max}} \quad (3.70)$$

що формують вектор (3.61). Але, враховуючи зауваження з попереднього абзацу, вкажемо на іншу можливість побудови моделей, яка ґрунтується на індуктивному способі дослідження, тобто від одиничного до загального. Суть методу складає цілеспрямований відбір рівнянь, що моделюють фізичні процеси компонентів (2.55)...(2.58), комунікатора (2.61)...(2.65) та їх спільної взаємодії, що змодельована

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

компонентно-комунікаторними рівняннями (2.59), (2.60). Відбір окремих рівнянь виконується з метою утворення такої замкнутої системи рівнянь відносно одного з векторів (3.70) у якій ранг матриці $[A]$ (2.67) співпадає з кількістю невідомих в обраного з (3.70) вектора.

3.6.2 Напругові дескриптори, як фізичні величини

Виконаємо побудову математичної моделі з напруговими дескрипторами, як фізичними величинами, що піддаються безпосередньому виміру. Для формування матричної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно вектора (3.61) відберемо з зазначених в пункті 3.6.1 рівняння (2.56), (2.58)...(2.60), (2.63)...(2.65) та покажемо, спосіб формування моделі МНД знизу – вверх. Для цього підставимо перше з рівнянь (2.65) в (2.63), а результат підстановки в (2.59), що дасть

$$[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [\dot{i}]_{m_{\max}} - [\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = [0]_{r_{\max}} \quad (3.71)$$

підставляючи в (3.71) компонентне рівняння (2.56), отримуємо

$$[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} - [\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = -[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [I_0]_{r_{\max}} \quad (3.72)$$

або

$$\left[[D^Y]_{r_{\max}, m_{\max}} - [\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \right]_{r_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = -[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [I_0]_{r_{\max}}, \quad (3.73)$$

де

$$[D^Y]_{r_{\max}, m_{\max}} = [D]_{r_{\max}, m_{\max}} [Y]_{m_{\max}, m_{\max}}. \quad (3.74)$$

Якщо, додатково ввести позначки

$$[D_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, m_{\max}} = \left[[D^Y]_{r_{\max}, m_{\max}} - [\tilde{Y}]_{r_{\max}, m_{\max}} \right]_{r_{\max}, m_{\max}}; [I_0^D]_{r_{\max}} = -[D]_{r_{\max}, m_{\max}} [I_0]_{r_{\max}}, \quad (3.75)$$

то підставляючи (3.75) в (3.73) отримаємо

$$[D_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = [I_0^D]_{r_{\max}}, \quad (3.76)$$

Сформуємо наступні контурних “р” рівнянь на тих же засадах: підставимо друге з рівнянь (2.65) в (2.64), а результат підстановки в (2.60), що дасть

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$[K]_{p_{\max}, m_{\max}} [\dot{U}]_{m_{\max}} - [\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} [I]_{m_{\max}} = [0]_{p_{\max}} \quad (3.77)$$

Застосовуючи до (3.77) компонентне рівняння у формі (2.2)

$$[I]_m = [Y]_{m,m} [U]_m + [I_0]_m. \quad (3.78)$$

отримуємо рівняння

$$[K]_{p_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} - [\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = \left[[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} [I_0]_{m_{\max}} \right]_{p_{\max}}, \quad (3.79)$$

яке також може бути представлено компактною формою

$$[K_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, m_{\max}} [U]_{m_{\max}} = [U_0^{\tilde{Z}}]_{p_{\max}}, \quad (3.80)$$

де

$$\begin{aligned} [K_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, m_{\max}} &= \left[[K]_{p_{\max}, m_{\max}} - [\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} [Y]_{m_{\max}, m_{\max}} \right]_{p_{\max}, m_{\max}}; \\ [U_0^{\tilde{Z}}]_{p_{\max}} &= \left[[\tilde{Z}]_{p_{\max}, m_{\max}} [I_0]_{m_{\max}} \right]_{p_{\max}}. \end{aligned} \quad (3.81)$$

Таким чином, система рівнянь, що складається з матричних рівностей (3.76), (3.80) та (2.18) відображає шляхи реалізації однієї з моделей МНД (3.46), підрозділу 3.4, але з використанням індуктивного способу їх алгоритмізації. Будь-яку модель з МНД1...МНД6 можна отримати комбінуючи між собою рівняння (3.22)...(3.27).

Використовуючи розбиття вектора напруг дуг усіх компонентів на блокові стовпчики (3.61) рівняння (3.76), (3.80), (2.18) можна представити у вигляді об'єднуючої системи алгебраїчних рівнянь з рангом m_{\max} .

$$\begin{bmatrix} [D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}} & [D12_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, p_{\max}} & [D13_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, j_{\max}} \\ [K21_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, r_{\max}} & [K22_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, p_{\max}} & [K23_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, j_{\max}} \\ [M31]_{j_{\max}, r_{\max}} & [M32]_{j_{\max}, p_{\max}} & [M33]_{j_{\max}, j_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}, m_{\max}} \begin{bmatrix} U_{r_{\max}} \\ U_{p_{\max}} \\ U_{j_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}} = \begin{bmatrix} [I_0^D]_{r_{\max}} \\ [U_0^{\tilde{Z}}]_{p_{\max}} \\ [0]_{j_{\max}} \end{bmatrix}_{m_{\max}}. \quad (3.82)$$

3.6.3 Напругові дескриптори дерев, контурів та компонентів

Як невідомі величини оберемо по одній напрузі дуги з кожного окремого дерева, з яких формуємо матрицю стовпець

$$[U]_{r_{\max}} = [U_1, U_2, \dots, U_r, \dots, U_{r_{\max}}]_{r_{\max}}^{-t}, \quad (3.83)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

по одній напрузі дуги з незалежних контурів

$$[U]_{p_{\max}} = [U_1, U_2, \dots, U_p, \dots, U_{p_{\max}}]_{r_{\max}}^{-t}, \quad (3.84)$$

та по напрузі з кожного окремого компонента

$$[U]_{j_{\max}} = [U_1, U_2, \dots, U_j, \dots, U_{j_{\max}}]_{j_{\max}}^{-t} \quad (3.85)$$

Користуючись звичайним методом підстановок в матричній інтерпретації можна отримати з (3.82) три методи аналізу відносно однорідних елементів. Оскільки процедура отримання системи рівнянь відносно будь якого з векторів (3.83)...(3.85) однакова, розглянемо, наприклад, метод дуг компонентів МДК. Для цього представимо (3.82) у вигляді трьох окремих рівнянь

$$\left[[D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{r_{\max}} + [D12_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, p_{\max}} U_{p_{\max}} + [D13_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}} \right] = [I_0^D]_{r_{\max}}. \quad (3.86)$$

$$\left[[K21_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, r_{\max}} U_{r_{\max}} + [K22_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, p_{\max}} U_{p_{\max}} + [K23_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}} \right] = [U_0^{\tilde{Z}}]_{p_{\max}} \quad (3.87)$$

$$\left[[M31]_{j_{\max}, r_{\max}} U_{r_{\max}} + [M32]_{j_{\max}, p_{\max}} U_{p_{\max}} + [M33]_{j_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}} \right] = [0]_{j_{\max}} \quad (3.88)$$

З рівняння (3.86) отримуємо

$$U_{r_{\max}} = [D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [I_0^D]_{r_{\max}} - [D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [D12_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, p_{\max}} U_{p_{\max}} - [D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [D13_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}}, \quad (3.89)$$

яке з введенням позначок

$$\alpha_{r_{\max}}^0 = [D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [I_0^D]_{r_{\max}}; \quad \alpha_{r_{\max}, p_{\max}}^1 = [D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [D12_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, p_{\max}}; \quad (3.90)$$

$$\alpha_{r_{\max}, j_{\max}}^2 = [D11_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} [D13_{\tilde{Y}}^Y]_{r_{\max}, j_{\max}}$$

можна записати, як

$$U_{r_{\max}} = \alpha_{r_{\max}}^0 - \alpha_{r_{\max}, p_{\max}}^1 U_{p_{\max}} - \alpha_{r_{\max}, j_{\max}}^2 U_{j_{\max}} \quad (3.91)$$

Рівняння (3.87) дозволяє записати

$$U_{p_{\max}} = [K22_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, p_{\max}}^{-1} [U_0^{\tilde{Z}}]_{p_{\max}} - [K22_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, p_{\max}}^{-1} [K21_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, r_{\max}} U_{r_{\max}} - [K22_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, p_{\max}}^{-1} [K23_{\tilde{Z}}^Y]_{p_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}}, \quad (3.92)$$

або, з введенням позначок

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

$$\beta_{p_{\max}}^0 = \left[K 22_{\bar{z}}^Y \right]_{p_{\max}, p_{\max}}^{-1} \left[U_0^{\bar{z}} \right]_{p_{\max}} ; \quad \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 = \left[K 22_{\bar{z}}^Y \right]_{p_{\max}, p_{\max}}^{-1} \left[K 21_{\bar{z}}^Y \right]_{p_{\max}, r_{\max}} ; \quad (3.93)$$

$$\beta_{p_{\max}, j_{\max}}^2 = \left[K 22_{\bar{z}}^Y \right]_{p_{\max}, p_{\max}}^{-1} \left[K 23_{\bar{z}}^Y \right]_{p_{\max}, j_{\max}}$$

$$U_{p_{\max}} = \beta_{p_{\max}}^0 - \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 U_{r_{\max}} - \beta_{p_{\max}, j_{\max}}^2 U_{j_{\max}} \quad (3.94)$$

Виконуючи підстановку рівняння (3.94) в (3.91) отримуємо залежність між напругами дерев та полюсів

$$U_{r_{\max}} = \alpha_{r_{\max}}^0 - \alpha_{r_{\max}, p_{\max}}^1 \left[\beta_{p_{\max}}^0 - \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 U_{r_{\max}} - \beta_{p_{\max}, j_{\max}}^2 U_{j_{\max}} \right] - \alpha_{r_{\max}, j_{\max}}^2 U_{j_{\max}} =$$

$$= \left[\chi^0 \right]_{r_{\max}} + \left[\chi^1 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{r_{\max}} + \left[\chi^2 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{j_{\max}}, \quad (3.95)$$

де нові позначки матриць

$$\left[\chi^0 \right]_{r_{\max}} = \alpha_{r_{\max}}^0 - \alpha_{r_{\max}, p_{\max}}^1 \beta_{p_{\max}}^0 ; \quad \left[\chi^1 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} = \alpha_{r_{\max}, p_{\max}}^1 \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 ;$$

$$\left[\chi^2 \right]_{r_{\max}, j_{\max}} = \alpha_{r_{\max}, p_{\max}}^1 \beta_{p_{\max}, j_{\max}}^2 - \alpha_{r_{\max}, j_{\max}}^2 . \quad (3.96)$$

З (3.95) знаходимо, що

$$\left[\chi^4 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{r_{\max}} = \left[\chi^0 \right]_{r_{\max}} + \left[\chi^2 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{j_{\max}}, \quad (3.97)$$

де

$$\left[\chi^4 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} = \left[[1]_{r_{\max}, r_{\max}} - \left[\chi^1 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} \right]_{r_{\max}, r_{\max}} \quad (3.98)$$

З (3.97) та (3.98) знаходимо необхідний зв'язок між напругами

$$U_{r_{\max}} = \left[\chi_0^5 \right]_{r_{\max}} + \left[\chi^6 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{j_{\max}} \quad (3.99)$$

де матриці

$$\left[\chi_0^5 \right]_{r_{\max}} = \left[\chi^4 \right]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} \left[\chi^0 \right]_{r_{\max}} ; \quad \left[\chi^6 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} = \left[\chi^4 \right]_{r_{\max}, r_{\max}}^{-1} \left[\chi^2 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} . \quad (3.100)$$

Підстановка вектора напруг дерев (3.99) в рівняння напруг контурів (3.94)

$$U_{p_{\max}} = \beta_{p_{\max}}^0 - \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 \left[\left[\chi_0^5 \right]_{r_{\max}} + \left[\chi^6 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{j_{\max}} \right]_{r_{\max}} - \beta_{p_{\max}, j_{\max}}^2 U_{j_{\max}} =$$

$$\beta_{p_{\max}}^0 - \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 \left[\chi_0^5 \right]_{r_{\max}} - \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 \left[\chi^6 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} U_{j_{\max}} - \beta_{p_{\max}, j_{\max}}^2 U_{j_{\max}}$$

$$(3.101)$$

з введенням додаткових позначок

$$\left[\delta^0 \right]_{p_{\max}} = \beta_{p_{\max}}^0 - \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 \left[\chi_0^5 \right]_{r_{\max}} ; \quad \left[\delta^1 \right]_{p_{\max}, j_{\max}} = \beta_{p_{\max}, r_{\max}}^1 \left[\chi^6 \right]_{r_{\max}, r_{\max}} + \beta_{p_{\max}, j_{\max}}^2 \quad (3.102)$$

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

представляє матричну залежність напруг контурів від напруг компонентів у вигляді

$$U_{p_{\max}} = \begin{bmatrix} \delta^0 \end{bmatrix}_{p_{\max}} - \begin{bmatrix} \delta^1 \end{bmatrix}_{p_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}} \quad (3.103)$$

Нарешті, підстановка матричних рівностей (3.99) та (3.103) в (3.88) і утворює бажану систему матричних рівнянь відносно дескрипторів напруг компонентів, яку отримують в наступній послідовності операції.

Записують згадану підстановку у вигляді

$$\begin{aligned} & [M31]_{j_{\max}, r_{\max}} \left[\begin{bmatrix} \chi_0^5 \end{bmatrix}_{r_{\max}} + \begin{bmatrix} \chi^6 \end{bmatrix}_{r_{\max}, r_{\max}} U_{j_{\max}} \right]_{r_{\max}} + \\ & + [M32]_{j_{\max}, p_{\max}} \left[\begin{bmatrix} \delta^0 \end{bmatrix}_{p_{\max}} - \begin{bmatrix} \delta^1 \end{bmatrix}_{p_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}} \right]_{p_{\max}} + [M33]_{j_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}} = [0]_{j_{\max}} \end{aligned} \quad (3.104)$$

та представляють її в компактному вигляді, як

$$\begin{bmatrix} \alpha^k \end{bmatrix}_{j_{\max}, j_{\max}} U_{j_{\max}} = \beta_{j_{\max}}^k \quad (3.105)$$

де

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \alpha^k \end{bmatrix}_{j_{\max}, j_{\max}} &= [M31]_{j_{\max}, r_{\max}} \begin{bmatrix} \chi^6 \end{bmatrix}_{r_{\max}, r_{\max}} - [M32]_{j_{\max}, p_{\max}} \begin{bmatrix} \delta^1 \end{bmatrix}_{p_{\max}, j_{\max}} + [M33]_{j_{\max}, j_{\max}}; \\ \beta_{j_{\max}}^k &= -[M31]_{j_{\max}, r_{\max}} \begin{bmatrix} \chi_0^5 \end{bmatrix}_{r_{\max}} - [M32]_{j_{\max}, p_{\max}} \begin{bmatrix} \delta^0 \end{bmatrix}_{p_{\max}}. \end{aligned} \quad (3.106)$$

Процедура складання рівнянь відносно напруг дуг дерев та напруг контурів практично не відрізняється від щойно приведенної. При цьому слід мати на увазі, що визначення векторів напруг, через інші вектори можливо лише у випадку квадратних матриць, як лівих співмножників біля цих векторів. В протилежному випадку неможливо обертання матриць, і перетворення множника на одиничну матрицю при множенні добутків на обернену матрицю зліва.

Таким чином, в підрозділі на відміну від способів розробки моделей, що ґрунтувались на дедуктивних засадах, представлені способи побудови, в основі яких лежить індуктивний метод відбору рівнянь з їх множини, яка складається з фізико-математичних моделей компонентів, комунікаторів та мережі їх об'єднання.

В результаті дослідження отримані наступні результати:

- розроблена стратегія побудови моделей: знизу вверху, що дозволило зменшити алгоритмічну складність внаслідок використання саме тих рівнянь, що формують заданий тип моделі;

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

- на зазначених вище засадах розбудована модель напруг усіх дуг компонентів, спосіб побудови якої має явні переваги в частині її формування (прозорість процедур, інформаційна стислість, тощо);

- запропоновані методи аналізу, що скорочують базисну множину невідомих: частина напруг дуг дерев, компонентів та контурів. Показано, що їх розробка ґрунтується на одних і тих же принципах формування моделі.

- в найдрібніших деталях розроблена алгоритмічна процедура по визначенню частини напруг компонентів (по одній дузі на компонент). З метою недопущення помилок, формування рівнянь від моделей пристроїв до кінцевої алгебраїчної системи рівнянь супроводжується вказівками на усі розміри блочних матриць та векторів після кожної математичної операції, що супроводжують побудову моделі.

На завершення слід відмітити, що запропоновані методи розрізняються один від одного. Розмір задачі кожної моделі залежить від кількості компонентів, дерев та полюсів компонентів. Попередня обробка цієї початкової інформації дозволить вибрати оптимальну розрахункову модель.

3.7 Структурна схема адаптивних алгоритмів

3.7.1 Критерії вибору методу схемотехнічного аналізу

Розглядаючи різні алгоритми розв'язку однієї і тієї ж задачі, слід проаналізувати, скільки обчислювальних ресурсів вони потребують, і обрати найбільш ефективний алгоритм. Ефективність залежить від вибору обчислювальної моделі.

Розрізняють складність самого алгоритму і складність його опису (реалізації). Складність опису алгоритму - це величина, що характеризує довжину опису алгоритму. Складність алгоритму (складність обчислення алгоритму) – це функція, що дає числову оцінку тривалості роботи алгоритму з моменту надходження на його вхід початкових даних до моменту одержання алгоритмом вихідних даних. Для оцінки складності алгоритмів існує багато критеріїв. Найчастіше розглядається оцінка повного розв'язку задачі і зростання місткості пам'яті при збільшенні об'єму вхідних даних.

Розміром задачі називається число, яке виражає міру кількості вхідних даних. Наприклад, розміром задачі множення матриць може бути найбільший розмір матриць

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

співмножників. Розміром задачі на графі може бути число ребер даного графа, або вузлів.

Час, що витрачає алгоритм, як функція розміру задачі, називається часовою складністю алгоритму.

Об'єм пам'яті, що використовує алгоритм, як функція розміру задачі, називається ємнісною (місткістю) складністю цього алгоритму.

Вибір методу схмотехнічного аналізу диктується вище наведеними міркуваннями. Складемо векторний критерій оптимального вибору моделювання нановиробу K у відповідності з розробленими алгоритмами

$$K = \alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 \quad (3.107)$$

де β_1 - оцінка складності опису алгоритму, β_2 - оцінка складності алгоритму. α_1 , α_2 - вагові функції, що задаються розробником із міркувань важливості β_1 та β_2 . Як правило, суму α_1 та α_2 унормовують, тобто покладають:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (3.108)$$

Введення критерію (3.107) дозволяє конкретизувати блок схмотехнічного аналізу, рис.1.1, та представити його у вигляді рис. 3.1.

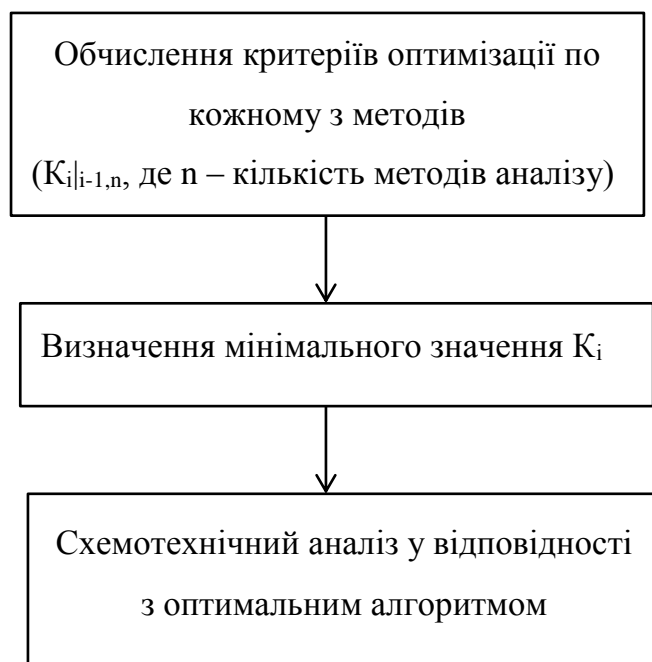


Рисунок 3.1 - Блок схмотехнічного аналізу

3.7.2 Аналіз первинних даних

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Кількість обчислювальних процедур, які оформлені у вигляді математичних моделей аналізу нановиробу, що розроблені в підрозділах 2.5; 3.2...3.6 добігає до пів сотні. Алгоритмічна складність кожного з них залежить від топологічно-морфологічної структури нановиробу. Оптимальним методом аналізу можна вважати той з них, що при заданій кількості компонентів, їх полюсів та дерев має найменшу обчислювальну складність не лише за топологією, а і морфологічною структурою (конструкцією).

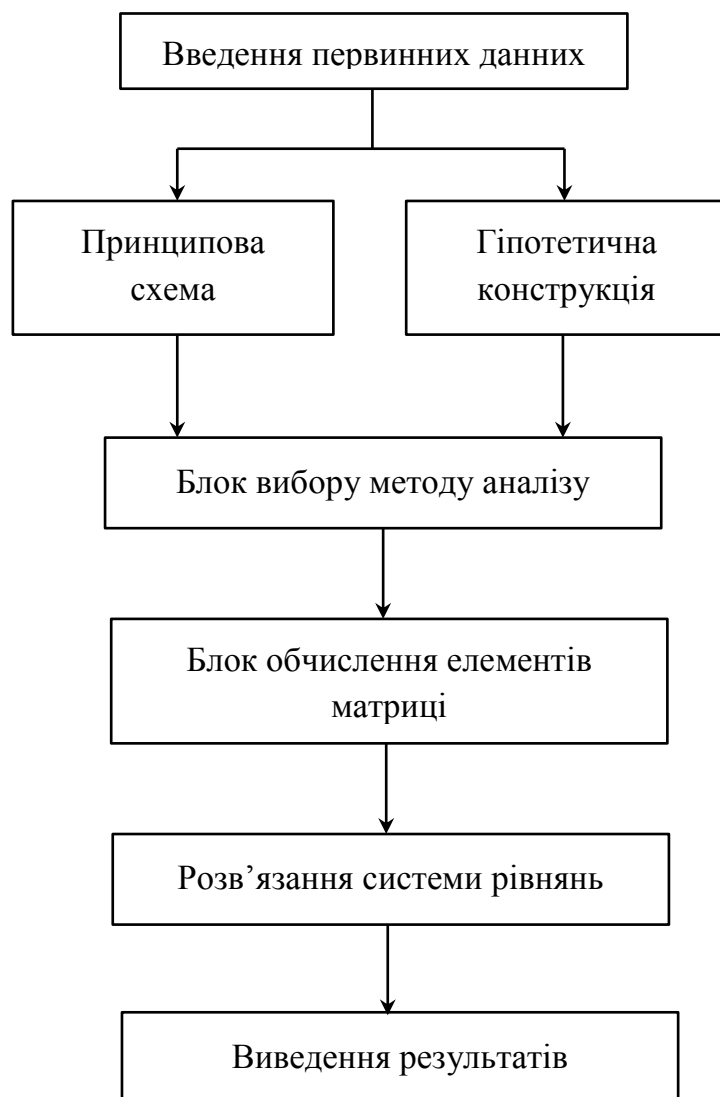


Рисунок 3.2 - Структурна схема адаптивних алгоритмів

Таким чином, структурна схема адаптивної САПР мусить мати блоки налаштування на об'єкт проектування, рис. 3.2, що характеризується не лише топологією, а і конструкцією, яка визначає складність обчислення електродинамічних

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

крайових задач при визначенні електродинамічних параметрів комунікатора. Робота САПР мусить починатися з блока введення первинних даних. Блок принципової схеми однозначно визначає спосіб поєднання компонентів в схемі та їх параметри (характеристики). Блок гіпотетичної конструкції однозначно визначає геометричну інформацію про друковану або об'ємну конструкцію комунікатора. На основі підрахунку кількості компонентів, дерев, полюсів, контурів у блоці вибору метода аналізу, вибирається один з методів, що підходить за ознакою алгоритмічної оптимальності. У блоці обчислення елементів матриці формуються матриці СЛАР. Блок розв'язання системи рівнянь визначається своєю назвою. Блок виведення результатів виводять підсумкові результати розв'язання системи СЛАР.

Таким чином, в підрозділі розглянуті критеріальні оцінки оптимальності при відборі методу аналізу. Аналізуються складність алгоритму в способі його опису та тривалості обчислювальної комп'ютерної процедури. Зокрема представлені структурні схеми початкового аналізу вхідних даних та остаточного вибору методу на основі заданих критеріальних оцінок.

3.8 Висновки та пропозиції по розділу 3

Незважаючи на те, що поза увагою залишились такі методи аналізу високочастотної наноелектроніки, як метод гіллястих дробів, змінних стану, методи діакоптики (еквівалентних джерел електроенергії), на основі морфологічних рівнянь Кірхгофа, комунікаторних рівнянь та компонентних рівнянь, результати дослідження складають майже два десятки нових методів аналізу, що призначені для їх застосуванню в САПР наноелектроніки і не тільки. Приведені алгоритми є цілком придатними для синтезу морфології та топології високочастотної електроніки практично у всьому діапазоні частот від нуля і до рентгенівського діапазону. Обмежувальною ознакою їх застосування є лише співвідношення: довжина хвилі – розмір компонента. При цьому на розмір комунікатора обмежень не існує. Модель допускає його розподіленість у просторі. До конкретних результатів слід віднести:

- проведення обґрунтування необхідності розробки різноманітних методів моделювання з метою створення адаптивних обчислювальних САПР наноелектроніки;

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

- розроблені моделі БС1...БС6 зі скороченою множиною базових дескрипторів, за рахунок їх переозначення через дескриптори компонентів. На межі спряження компонентів та комунікатора вони відіграють роль крайових та початкових умов, які враховуються в матриці електродинамічних параметрів, що доводить правомірність такого моделювання;

- розроблені моделі з орієнтацією на необхідну сукупність однорідних дескрипторів, що відрізняються від попередніх, скороченою множиною змінних за які обирається однорідні змінні у вигляді незалежних струмів полюсів та напруг дуг. У порівнянні з попередніми моделями множина змінних в для таких моделей зменшена, мінімум вдвічі;

- розроблена стратегія побудови моделей: знизу вверху, що дозволило зменшити алгоритмічну складність внаслідок відбору з сукупності усіх рівнянь фізико-математичної моделі, саме тих, що формують заданий тип моделі;

- на засадах індуктивного моделювання отримано алгоритм аналізу напруг усіх дуг компонентів, який має явні переваги в частині його формування (прозорість процедур, інформаційна стислість, тощо) та розробки програм його реалізації;

- запропоновані методи аналізу, що скорочують базисну множину невідомих: частина напруг дуг дерев, компонентів та контурів. Показано, що їх розробка ґрунтується на одних і тих же принципах формування моделі.

- в найдрібніших деталях розроблена алгоритмічна процедура по визначенню частини напруг компонентів (по одній дузі на компонент). З метою недопущення помилок, формування рівнянь від моделей пристроїв до кінцевої алгебраїчної системи рівнянь супроводжується вказівками на усі розміри блочних матриць та векторів після кожної математичної операції, що супроводжують побудову моделі.

На завершення слід відмітити, що запропоновані методи розрізняються один від одного. Розмір задачі кожної моделі залежить від кількості компонентів, дерев та полюсів компонентів. Необхідні процедури попередньої обробки цієї початкової інформації відображені окремими елементами структурної схеми САПР наноелектроніки, де на основі критеріальних оцінок складності виконується адаптивне налагодження на об'єкт проектування.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Економічна доцільність впровадження розроблених моделей в практику виробничих процесів високопродуктивної електроніки може бути обрахована за умови допуску до реальних технологій, що складають конфіденційну інформацію в рамках конкуруючих між собою виробничих компаній. Як один з можливих варіантів приблизної оцінки показників можуть бути результати обчислення за стандартними процедурами, що представлено в табл. 3.1

Таблиця 3.1

Техніко – економічні показники роботи

Найменування показника	Одиниця вимірювання	Значення показника	
		До впровадження роботи	Після впровадження роботи
Трудомісткість	Чол–дні	–	819
Ціна ПП	Грн	–	10928,8
Капітальні витрати	Грн	–	490928,8
Поточні витрати	Грн/рік	731040,0	522720,0
Економічний ефект від реалізації роботи	Грн/рік	–	85587,8
Термін окупності	Років	–	2,4
Економічна ефективність роботи		–	0,42

ВИСНОВКИ

У відповідності з технічним завданням в роботі запропонована низка системних методів аналізу інфокомунікаційних електронних засобів, що можуть бути застосовані практично у всіххвильовому діапазоні частот. Запропоновані моделі спрямовані на побудови САПР наноелектроніки. На початку дослідження сформульовані вимоги по розробці САПР нанотехнологій, звертається увага на недоліки існуючих САПР радіоелектроніки, пояснюються принципові відмінності запропонованої в роботі схеми САПР, вказуються шляхи її реалізації та виконується порівняльна оцінка складності, яка компенсується універсалізмом запропонованої стратегії розбудови САПР. З цією метою виконано дослідження в результаті якого отримані наступні результати.

➤ Запропоновані нові принципові засади побудови САПР наноелектроніки, у відповідності зі своєю специфікою: власними внутрішніми законами та правилами самоорганізації.

➤ Виконана класифікація критеріальних оцінок оптимальності нановиробу: серед яких виділені схемотехнічні та конструктивні критерії.

➤ Визначений домінуючий критерій оптимізації по електромагнітній внутрішній та зовнішній сумісності. Справедливість твердження ґрунтується на принциповій властивості композиційних складових нановиробу, які неможливо сконструювати у вигляді автономних по електромагнітній взаємодії компонентів.

➤ Представлені алгоритми обчислення чутливості по дескрипторам математичної моделі, що надають можливість оцінити рівень небезпечних відхилень від номінальних характеристик та прийняти відповідно конструктивні, або схемотехнічні зміни на етапі проектування, якщо ці відхилення перевищують допустимий рівень.

➤ Представлена структурна схема САПР електронних нанотехнологічних виробів, що включає в себе такі нові елементи, що відтворюють її адаптивний характер з орієнтацією на морфологію об'єкта проектування та гнучкість (мінливість) програмних модулів в залежності від поточних результатів обчислення

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

❖ На основі декомпозиції нанотехнологічного електронного функціонального перетворювача виконана класифікація дескрипторів його композиційних складових (компонентні, комунікаторні та дескриптори процесів) та постульовані шляхи синтезу дескрипторів в єдину математичну модель;

❖ Виконана побудова математичної моделі матричних компонентних рівнянь, що реалізована в блочному вигляді. На відміну від існуючих, форма запису запропонованої моделі дозволяє проводити оцінки взаємовпливів компонентів, тобто моделювати роботу як автономних, так і неавтономних компонентів у випадку їх взаємодії один з одним в межах об'єкту, що аналізується.

❖ Вказані можливі варіанти обчислення або виміру елементів Z- або Y-компонентної матриці. Блочна форма матриці за ненульових недіагональних блоків дозволяє виконати оцінку взаємних електромагнітних впливів компонентів ФП.

❖ Запропонована модель відображення джерел електричної енергії компонентів у вигляді додаткових напруг дуг та струмів полюсів, шляхом заміни діючих напруг та струмів на їх суперпозицію з приведеними величинами. Такий підхід дозволив утворити компакту форму компонентних рівнянь з їх доповненням рівняннями Кірхгофа у вигляді матриці інциденції компонентів та полюсів.

❖ Приведені шляхи побудови матриці узагальнених дескрипторів, що характеризують сукупність усіх компонентів одночасно на основі блочної структури. Кожний блоковий елемент узагальненої матриці відображає матричне рівняння окремо-взятого компонента.

❖ Розвинуті алгоритми формування компонентно-комунікаторних рівнянь. В основу зазначеної процедури покладені морфологічні рівняння Кірхгофа, в яких в неявний спосіб міститься інформація про просторову структуру нановиробу та способи поєднання окремих компонентів в між собою.

❖ Розвинуті ідеї структурного аналізу – представлення комунікатора у вигляді композиційних складових: дерев та контурів, що моделюють електромагнітні взаємовпливи його композиційних елементів. Розроблена математична модель комунікатора, що відбиває характер взаємодій його композиційних складових, не лише на рівні незалежних дерев та контурів, а і взаємодії – у вигляді матричних співвідношення вплив-реакція по усіх дугах та полюсах комунікатора;

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

❖ Деталізується диференціація сигнальних дескрипторів процесів комунікатора на топологічні та просторово часові. Вказана принципова відмінність цих процесів та способи задавання граничних умов;

❖ Вказані методи та способи обчислення елементів матриць електродинамічних параметрів, які відбивають різноманітні процеси: втрати в провідниках, втрати в діелектриках, потоки векторів електричної індукції між деревами та магнітні потоки векторів в контурах комунікатора. Зазначені процеси представляються масштабними співвідношеннями між впливом та реакцією, які репрезентуються опірними, провідними, індуктивними та ємнісними параметрами.

❖ Приведені як узагальнена форма комунікаторних рівнянь, так і її різноманітні видові модифікації, що орієнтовані на визначення наведених напруг в незалежних контурах та струмів зсуву з незалежних дерев комунікатора.

❖ Розвинута математична модель аналізу електричних кіл, що обґрунтована в електродинамічній спосіб з метою її використання в області надзвичайно високочастотних сигналів. Запропонована модель у вигляді симбіозу компонентних, компонентно-комунікаторних та комунікаторних рівнянь на рівні матричних співвідношень.

❖ Визначені комплексні матриці компонентів та електродинамічних параметрів комунікатора і вказані способи формування їх елементів, які базуються на розв'язанні задач електродинаміки по визначенню потоків векторів електричної та магнітної індукції з поверхонь, форма яких задається морфологією композиційних елементів комунікатора.

▪ Незважаючи на те, що поза увагою залишились такі методи аналізу високочастотної наноелектроніки, як метод гіллястих дробів, змінних стану, методи діакоптики (еквівалентних джерел електроенергії), на основі морфологічних рівнянь Кірхгофа, комунікаторних рівнянь та компонентних рівнянь, вперше запропоновані базові методів аналізу нанотехнологічних електричних кіл. Їх окремі випадки породили майже два десятки нових методів аналізу, що призначені для їх застосуванню в САПР наноелектроніки і не тільки. Приведені алгоритми є цілком придатними для синтезу морфології та топології високочастотної електроніки практично у всьому діапазоні частот від нуля і до рентгенівського діапазону.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

- Розроблені моделі БС1...БС6 зі скороченою множиною базових дескрипторів, за рахунок їх переозначення через дескриптори компонентів. На межі спряження компонентів та комунікатора вони відіграють роль крайових та початкових умов, які враховуються матрицями електродинамічних параметрів, що доводить правомірність такого моделювання.

- Розроблені моделі з орієнтацією на необхідну сукупність однорідних дескрипторів, що відрізняються скороченою множиною змінних, за які обирається однорідні змінні у вигляді незалежних струмів полюсів та напруг дуг. У порівнянні з попередніми моделями множина змінних в для таких моделей зменшена, мінімум вдвічі.

- Розроблена стратегія побудови моделей: знизу вверху, що дозволило зменшити алгоритмічну складність внаслідок відбору з сукупності усіх рівнянь фізико-математичної моделі, саме тих, що формують заданий тип моделі.

- На засадах індуктивного моделювання отримано алгоритм аналізу напруг усіх дуг компонентів, який має явні переваги в частині його формування (прозорість процедур, інформаційна стислість, тощо) та розробки програм його реалізації.

- Запропоновані методи аналізу, що скорочують базисну множину невідомих: частина напруг дуг дерев, компонентів та контурів. Показано, що їх розробка ґрунтується на одних і тих же принципах формування моделі.

- Розроблена алгоритмічна процедура по визначенню частини напруг компонентів (по одній дузі на компонент). З метою недопущення помилок, формування рівнянь від моделей пристроїв до кінцевої алгебраїчної системи рівнянь супроводжується вказівками на усі розміри блочних матриць та векторів після кожної математичної операції, що супроводжують побудову моделі.

На завершення слід відмітити, що запропоновані методи розрізняються один від одного. Розмір задачі кожної моделі залежить від кількості компонентів, дерев та полюсів компонентів. Необхідні процедури попередньої обробки цієї початкової інформації відображені окремими елементами структурної схеми САПР наноелектроніки, де на основі критеріальних оцінок складності виконується адаптивне налагодження на об'єкт проектування.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

Отримані результати дослідження надають можливість в системний спосіб виконувати аналіз ФП з метою оптимізації як схемотехнічних, так і конструктивно-морфологічних характеристик наноелектронних виробів на рівні проектування без відповідного виготовлення ескізних зразків та їх експериментального дослідження. Запровадження результатів дослідження веде до скорочення фінансових витрат, за рахунок заміни натурального експерименту комп'ютерним моделюванням, що в нанотехнологіях є надзвичайно актуальною проблемою. Можна лише уявити економічний ефект, якщо на виготовлення одного ескізного зразка витрачаються сотні мільйонів доларів.

Головний висновок – розроблені математичні моделі аналізу швидкодіючих цифрових та аналогових електронних засобів, в тому числі нанотехнологічної електроніки, що відрізняються від існуючих можливістю цілеспрямованого комп'ютерного моделювання морфології з метою мінімізації шкідливого впливу на їх характеристики електромагнітної взаємодії компонентів та комунікатора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

39. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0)
40. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F
41. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D0%BD>
42. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uk.wikipedia.org/wiki/>
43. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D1%8E%D1%82%D0%B5%D1%80

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

44. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://www.rodnik.ru/product/sapr/pp_i_plis/quantic/omega/index.php?WEB_FORM_ID=6&RESULT_ID=931&formresult=addok

45. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://www.victoria.lviv.ua/html/oio/html/theme5_rus.htm

46. Алексеев О.В. 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.

47. Альтман Дж. Л. Устройства сверхвысоких частот: пер. с англ./ Под. ред. И. В. Лебедева. – М.: Мир, 1968.- 487 с.

48. Анисимов В.И. и др. Диалоговые системы схемотехнического проектирования. - М.: Радио и связь, 1988. - 288 с.

49. Антосик П, Микусинский Я., Сикорский Р. Теория обобщённых функций. – Секвенциальный подход. – М.: Мир, 1976. 312 с.

50. Бабак В.П., Хандецький В.С., Шрюфер Е. Обробка сигналів: Підручник. – К.: Либідь, 1999. – 496 с.

51. Балакирев М.В., Вохмяков Ю.С., Журиков А.В. и др. Радиопередающие устройства. М.: Радио и связь, 1982 - 256с.

52. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределёнными параметрами: Учебн. Пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1980. - 152 с.

53. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчёта). М.: Сов. Радио, 1974, 232 с.

54. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. - Функции Бесселя. Функции параболического цилиндра. Ортогональные многочлены. \ Том 2. – М.: Наука, 1974. 296 с.

55. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Гипергеометрические функции. Функции Лежандра.\Том 1.–М.: Наука, 1973. 296 с.

56. Белецкий А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей. – М.: Связь, 1967. – 391 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

57. Белкин М.К. и др. Справочник по учебному проектированию приёмно-усилительных устройств / М.К. Белкин, В.Т. Белинский, Ю.Л. Мазор и др. – 2-е изд. – К.: Высшая школа Головное изд-во, 1988.– 472 с.

58. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование микросхем: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. И.П. Степаненко. - М.: Радио и связь, 1983. – 232 с.

59. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973, 752 с.

60. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчёт электрических и магнитных полей. – Пер. с англ., М.: Энергия, 1970. 376 с.

61. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля - ионосфера. К.: Наукова думка, 1977. 200 с.

62. Бова Н.Т., Стукало Г.А., Храмов В.А. Управляющие устройства СВЧ. – Киев: Техника, 1973. – 163 с.

63. Бондаренко М.Ф. та ін. Комп'ютерна дискретна математика. – Харків: «Компанія СМІТ», 2004. 408 с.

64. Бородулин А.А. О достижимых параметрах выключателя и отражательного фазовращателя с общим переключательным элементом. – Радиотехника и электроника, т. 11, №10, с. 2105 – 2108

65. Бош Г.Б. Гигабитная электроника: Обзор. - ТИИЭР, 1979, т. 67, №3, с. 5 – 51.

66. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределёнными параметрами (справочное пособие). – М.: Наука, 1979, 224 с.

67. Бухгольц Г. Расчёт электрических и магнитных полей. - М.: ИЛ, 1961. 712 с.

68. Валитив Р.А., Попов И.А. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах/ Под ред. Р.А. Валитива и И.А. Попова. М.: Сов. радио, 1973. – 464 с.

69. Варламов Р.Г. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Сов. радио, 1980. – 480 с.

70. Верещагин Е.М., Никитенко Ю.Г. Частотная и фазовая модуляция в технике связи. – М.: Связь, 1974.- 224с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

71. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Справочное пособие. К.: Наукова думка, 1986. 544 с.
72. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ. К.: Наукова думка, 1978. 292 с.
73. Верхопятницкий П. Д., Латинский В.С. Справочник по модульному конструированию радиоэлектронной аппаратуры. – Л.: Судостроение, 1983, -232 с.
74. Волин М.Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. – 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.
75. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971. 487 с.
76. Ганстон М. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ: Пер. с англ./ Под ред. А.З. Фрадина.- М.: Связь, 1976.- 150 с.
77. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – 4-е изд. М.: Наука, 1988. – 552 с.
78. Гахов Ф.Д. Краевые задачи. \ Изд. 3-е., - М.: Наука, 1977. 640 с.
79. Гахов Ф.Д., Черский Ю.И. Уравнения типа свёртки. - М.: Наука, 1978. 296 с.
80. Герасимов В.Г. и др. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
81. Глазунов Л.П., Смирнов А.Н. Проектирование технических систем диагностирования. – Л.: Энергоатомиздат., 1982. – 168 с.
82. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. - – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.
83. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986 - 511с.
84. Гордиенко В.И., Калашников Н.И., Надточий К.Д. Измерение низкочастотных вихревых электрических полей. - Киев: Наукова думка, 1975 – 88 с.
85. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – Л: АН СССР, 1948. – 733 с.
86. Гроднев И.И., Шварцман В.О. Теория направляющих систем связи. – М.: Связь, – 1978. – 296 с.
87. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

88. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С. Р-і-п диоды в широкополосных устройствах СВЧ. – М.: Сов. радио, 1970. – 200с.
89. Доброхотов Б.А. Измерения в электротехнике / Справочник. Том II – Л.: -М.: Энергия, 1965. – 240 с.
90. Дорфман В.Ф. Эволюция технологий или новая история времени. – М.: Знание, 1990. – 64 с. (Новое в жизни науке, технике. Сер. “Радиоэлектроника и связь”; №11).
91. Емеличев В.А. и др. Лекции по теории графов – М.: Наука, 1990. 386 с.
92. Ермолаев Ю.П., Пономарёв М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкции и технология микросхем (ГИС и БГИС); Под ред. Ю.П. Ермолаева: Учебник для вузов. - М.: Сов. радио, 1980. – 256 с.
93. Жарков Ф.П., Соколов В.А. Цепи с переменными параметрами. – М.: Энергия, 1976.- 233 с.
94. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. М.: Наука, 1977. 432 с.
95. Жигалов А.Т. и др. Конструирование и технология печатных плат. М.: Высшая школа, 1973, 216 с.
96. Жоакім К., Плевєр Л. Нанонауки. Невидимая революция. - М.: Колибри, 2009. - 235 с.
97. Иллюстрированная хроника открытий и изобретений. - М.: Астрель, 2002
98. Иосель Ю.Я. Расчёт потенциальных полей в энергетике. Справочная книга / . - Л.: Энергия, 1978. - 351 с.
99. Иоссель Ю.А., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчёт электрической ёмкости – 2-е изд. перераб и доп. Л.: Энергоиздат. 1981 – 288 с.
100. Йордан Э. Структурное проектирование и конструирование программ. – М.: Мир, 1979 – 416 с.
101. Каганов В. И. Транзисторные радиопередатчики. – М.: Энергия, 1976.- 448 с.
102. Каганов В.И. Проектирование транзисторных радиопередатчиков с применением ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
103. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд. перераб и доп. Л.: Энергоатомиздат. 1986. – 488 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

104. Клюкин В.И. Николаенков Ю.К. Нейросетевые структуры и технологии Часть 1. Электрические и математические модели нейронов. НС прямого распространения. Учебное пособие для вузов. / Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008

105. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной вычислительной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1989. – 224 с.

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

107. Князь А.И. О классе пространственных полей, аналогичных плоскопараллельным. - “Кибернетика и вычислительная техника”, Киев: Наукова думка, 1971, вып. 11, с. 36 – 75.

108. Князь А.И. Комплексные потенциалы трёхмерных электрических и магнитных полей: Монография. – Киев - Одесса: Вища школа, 1981. – 120 с.

109. Князь А.И. Электродинамика информационных систем. - М.: Радио и связь, 1994. – 392 с.

110. Князь А.И. Электродинамическое обоснование схемотехнического проектирования РЭА. – Одесса: ОЭИС им. А.С. Попова, 1980. 55с.

111. Князь А.И., Кудря В.Г. Квазистационарное электромагнитное поле коммуникатора электронной цепи/— В кн.: Прикладная электротехника. Сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1981, с. 3-7.

112. Князь А.И., Кудря В.Г. Расчёт вихревых токов в ферромагнитном цилиндре с прорезями./ В кн. Теоретическая электротехника и устройства электроники. — Киев: Наукова думка, 1977, с. 64 – 70

113. Князь А.И., Кудря В.Г. Электродинамически обоснованные схемотехнические модели параметрического видеоусилителя. “Радиотехника”, 1985, №6, — М.: Радио и связь с. 87-88

114. Кога К., Муратані Т., Огава А. Применение бортовых ретрансляторов с регенерацией сигнала в цифровых системах связи. – ТИИЭР, 1977, т. 65, №3, с. 140 – 152.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

115. Козырев В. Б. Проектирование диапазонных транзисторных генераторов. Полупроводниковые приборы в технике электросвязи. Под ред. И. Ф. Николаевского. – М.: Связь, 1970. – Вып. 5, с. 36-51
116. Колмогоров А.И., Фомин С.В. Элементы теории функций и функциональный анализ. – М.: Наука, 1972. 496 с.
117. Коробов О. Н. Широкополосный автогенератор на диоде Ганна с ферритовым резонатором и линией связи. – В сб.: Стабилизация частоты/ Под ред. Г. М. Уткина. – М.: ВИМИ, 1978, с. 69-72
118. 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
119. 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.
120. Кудря В.Г. Выбор информационных параметров магнитного поля токоведущих проводов. — Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. ВАСХНИЛ — М.: Колос, 1977, №10, с.53 – 54
121. Кудря В.Г. Збірник методичних вказівок до лабораторних робіт по курсу "Теоретичні основи електротехніки" – Одеса: ОГМІ, 1999, 66 с.
122. Кудря В.Г. Инженерный расчёт электромагнитного поля линейных токов в двухслойной среде. — Сб. трудов учебн. институтов связи, Л.: Связь, 1977, №82, с. 40 – 44
123. Кудря В.Г. Моделирование электромагнитных 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
124. Кудря В.Г. Основи електротехніки та електроніки – Одеса: ОДЕКУ, 2008, 123 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

125. Кудря В.Г. Расчёт наводимых напряжений в контурах коммутатора/— В кн.: Прикладная электротехника. Сб. науч. трудов. Киев: Наукова думка, 1981, с. 34-39
126. Кудря В.Г. Стационарное поле токоведущих проводов./ В кн.: Электронное моделирование, АН УССР, — Киев: Наукова думка, 1977, с.45 – 52
127. Кудря В.Г., Миронченко Б.Т. Аналітичний потенціал дискретних поверхонь – Тези доповіді на міжнародній конференції м. Дніпропетровськ “ДНІ НАУКИ – 2005”. 2 с.
128. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженера. – М.: Энергия, 1980.-344с.
129. Лавров А.Г. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. М.: Связь, 1975. 128 с.
130. Ланнэ А.А. Оптимальный синтез электронных схем. – М.: Связь, 1978. – 336 с.
131. Лихтциндер Б.Я. Внутрисхемное диагностирование узлов радиоэлектронной аппаратуры. – Киев: Техніка, 1988. – 168 с.
132. Малви Дж. Механіка – наука про сили та рух. - М.: Мир, 1984.
133. Малорецкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. – М.: Сов. радио, 1976.- 216 с.
134. Малорецкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчёт СВЧ элементов на полосковых линиях. – М.: Сов. радио, 1972. – 232 с.
135. Мальский И.В., Сестрорецкий Б.В..СВЧ устройства на полупроводниковых диодах / Под ред. И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого. – М.: Сов. радио, 1969. – 580с.
136. Марков Г.Т., Чаплин. А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – М.-Л.: Энергия, 1967. - 367 с.
137. Марцин В.С., Міценко Н.Г., Даниленко О.А. тощо Основи наукових досліджень Навчальний посібник / Л.: Ромус-Поліграф, 2002.- 128 с."
138. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи в 2-х т.: Пер. с англ./ Под ред. Л. В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. – М.: Связь, 1971, 1972.15

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

139. Маттей Д. Таблицы для расчета трансформаторов сопротивлений в виде фильтра нижних частот Чебышева.- ТИИЭР, 1964, т. 52, № 8, с. 1003-1028
140. Мигулин В.В., Медведев В. И., Мустель Е.Г., Парыгин В.П. Основы теории колебаний/ Под. ред. В.В. Мигулина. - М.: Наука, 1978. – 392с.
141. Митра Р. Вычислительные методы в электродинамике. М.:Мир, 1977, 487 с.
142. Митра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. - М.: Мир, 1974. 328 с.
143. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. – М.: Наука, 1969. – 380с.
144. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники./ В 2-х томах. – Л.: Энергоиздат, 1981. 534 с.
145. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. – Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.
146. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. - М.: Наука, 1967. 460 с.
147. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. - Учебное пособие. М.: Наука, 1973. 608 с.
148. Обэн Ж.П. Приближенное решение эллиптических краевых задач. – М.: Мир, 1977. 384 с.
149. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. – Издание 2-е, М.:ТЕХНОСФЕРА, 2007. – 416 с.
150. Остин О. Нобелевские лауреаты 2010 // Гипотезы и открытия. - К.: Интелект Медіа, 2010. - №11 ноябрь. - С. 2-6.
151. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. – М.: Мир, 1979. 320 с.
152. Панфілов І.П., Дирда В.Ю., Капацін А.В. Теорія електричного зв'язку: Підруч. для студентів вищ. навч. закл. – Київ: Техніка, 1998.- 328 с.
153. Панчишин Ю.М., Усатенко С.Т. Измерение переменных магнитных полей. - Киев: Техніка, 1973. – 140 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

154. Петров Б. Е., Резнев А. А. Проектирование микрополосковых широкополосных усилителей мощности на транзисторах. – Электросвязь, 1974, № 11, с.17-21.
155. Пиотровский Л.Б., Кац Е.А. «Нанотехнология», «нанонаука» и «нанообъекты»: что значит «нано»? // Экология и жизнь, 2010. - №8, №9.
156. Пистолькорс А.А. и др. Антенны. Сборник, Выпуск 22, М.: Связь, 1975. 137 с.
157. Пономарёв М.Ф. Конструкции и расчёт микросхем и микроэлементов ЭВА: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982. – 288 с.
158. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Ильченко В.І. та ін. Мікроелектроніка та наноелектроніка. Вступ до спеціальності навчальний посібник / - К.: НТУУ «КП», 2010-160с.
159. Прохоров А.М. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – 4-изд. - М.: Сов. энциклопедия. 1989. – 1632 с.
160. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD 9.2. – М.: СОЛОН-Р, 2003. – 528 с.: ил. – (Серия «Системы проектирования»)
161. Разевиг В.Д. Система проектирования OrCAD-9.2. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 519 с.
162. Растрягин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
163. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А.. Устройства СВЧ: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1981. – 295 с.
164. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
165. СВЧ полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Уотсона; Пер. с англ. под В.С. Эткина. – М.: Мир, 1972. - 325 с.
166. Селютин В.А. Автоматизированное проектирование топологии БИС. - М.: Радио и связь, 1983. – 112 с.
167. Семёнов Н.А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов. М.: Связь, 1973. 480 с.
168. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Учебник для вузов. – С-Пб.: Питер, 2002. – 608 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

169. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Сов. Радио, 1976. 608 с.
170. Скляр Бернад. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
171. Смирнов А.И. ИС, БИС, СБИС... (Взаимообогащающее развитие технологий). – М.: Знание, 1989. – 64 с. (Новое в жизни науке, технике. Сер. “Радиоэлектроника и связь”; №1).
172. Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике (Линии передачи и устройства СВЧ) /Пер. с англ. М. Н. Берегера, Б. Ю. Капилевича. – М.: Связь, 1976, 142 с.
173. Солонина А.И. и др. Основы цифровой обработки сигналов. Учебное пособие. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 768 с. URL: <http://lord-n.narod.ru/download/books/walla/dsp/Solonin.Osnovu.DSP.rar>
174. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. – М. – Л.: ОГИЗ, 1949. – 540 с.
175. Тимченко А.А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: Основи системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки: Навч. посібник / За ред. Ю.Г. Леги. - К.: Либідь, 2004. - 288 с.
176. Тозони О.В. Математические модели для расчёта электрических и магнитных полей. Киев: Наукова думка, 1964. 304 с.
177. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. М.: Энергия, 1975, 296 с.
178. Тозони О.В. Расчёт электромагнитных полей на вычислительных машинах. Киев: Техніка, 1967. 252 с.
179. Тозони О.В., Князь А.И. Электродинамические итерации при проектировании ЭВМ. - “Электронное моделирование”, Киев: Наукова думка”, 1979, №2, с. 57 – 63.
180. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности. / Под ред. Я.В. Цыпкина. - М.: Сов. радио, 1972. - 240 с.
181. Уёмов А.И. Системные аспекты философского знания. – Одесса: Студия «Негоциант», 2000. – 160 с.
182. Уильямс Л., Адамс У. Нанотехнологии путеводитель. - М.: Эскмо, 2009. - 364 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

183. Уткин Г. М. Проектирование радиопередающих устройств СВЧ: Учеб. пособие для вузов/ под ред. Г. М. Уткина.- М.: Сов. радио, 1979.- 320 с.
184. Утямышева Р.И., Враяны М., Электронная аппаратура для стимуляции органов и тканей., М.: Энергоатомиздат, 1983. - 384 с.
185. Федорюк М.В. Метод перевала. М.: Наука, 1977. 368 с.
186. Фейнберг Е. Л., Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: АН СССР, 1961. 547 с.
187. Фельдштейн А.А., Явич Л.Р. Синтез четырёхполюсников и восьмиполусников на СВЧ.- М.: Связь, 1971.- 388 с.
188. Фельдштейн А.Л. Справочник по элементам полосковой техники / Под ред. А.Л. Фельдштейна.- М.: Связь, 1979.- 336 с.
189. Феоктистов Ю.А. и др. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. - М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
190. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ: Пер. с англ./ Под ред. А.С. Галина. – М.: Радио и связь, 1981. – 200 с.
191. Хотунцев Ю. Л. Полупроводниковые СВЧ устройства. – М.: Связь, 1978.- 256 с.
192. Хьюлсман Л. П. Активные фильтры: Пер. с англ./ Под ред. И.Н. Теплока – М.: Мир, 1972. - 516 с.
193. Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
194. Чистяков Н.И. К вопросу о модели амплитудно-фазовой конверсии. – Радиотехника, 1979, т. 34, № 10, с. 18-19.
195. Чуа Л.О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы. Пер. с англ. - М.: Энергия, 1980. - 680 с.
196. Шахгильдян В. В. Радиопередающие устройства / Под ред. В. В. Шахгильдяна. – М.: Связь, 1980.- 328 с.
197. Шебес М.Р. Теория линейных электрических цепей в упражнениях и задачах. – М.: Высшая школа, 1973. 656 с.

Слюсаренко В.Ю. «Об'єктно орієнтовані моделі швидкодіючих електронних пристроїв»

198. Шилейко А.В. Справочник по системотехнике. / Под ред. А.В. Шилейко - М.: Сов. радио, 1970.- 686 с.
199. Шимони К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1964. 775 с.
200. Эткин. В.С. СВЧ полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Уотсона; Пер. с англ. под В.С. Эткина. – М.: Мир, 1972. - 325 с.
201. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике: 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1985. – 512 с