



Мешанінов Олександр Павлович – к.т.н., доцент.

Сфера наукових інтересів – це математичне моделювання систем з динамічною структурою.

Закінчив у 1973 році Миколаївський кораблебудівний інститут, факультет електрообладнання суден. У 1977 році у м.Києві в інституті електродинаміки захистив дисертацію кандидата

технічних наук за темою “Розробка методу та ефективних алгоритмів для аналізу процесів в системах збудження з вентильними перетворювачами”. З 1977 р. по 1991р. очолював низку наукових проектів по розробці та використанню спеціалізованого математичного забезпечення досліджень режимів роботи складних електромеханічних систем з перетворювачами енергії за замовленнями провідних наукових центрів.

Основи теорії формування багаторівневого матрично- топологічного опису динамічних систем

Вступ

Проектування та реалізація сучасних систем ґрунтуються на всебічних дослідженнях як можливих схемних рішень по складу та структурі об'єкту, так і режимів функціонування шляхом математичного моделювання.

Причому неухильний розвиток технічних систем обумовлює виникнення специфічних режимів їх функціонування як в нормальних, так і в аварійних режимах роботи.

Для забезпечення ефективності досліджень потрібні відповідні засоби по формуванню моделей.

Сучасні системи будуються із залученням різнохарактерних елементів. Наприклад, судові електроенергетичні системи містять електричні машини різних типів, апарати, статичні перетворювачі, лінійні та суттєво нелінійні елементи, підсистеми електроавтоматики, контролю та діагностики.

Ці елементи та підсистеми досліджувалися науковцями [1-14], були побудовані сучасні математичні моделі [1, 2, 4, 6, 11, 12], виконано всебічний аналіз, що і забезпечило їх розвиток. Ефективність досліджень окремих елементів та підсистем обумовлена ефективністю власне їх математичних моделей. Але актуальною проблемою є впровадження комплексних досліджень, коли режими роботи деяких окремих елементів суттєво впливають на режими роботи інших

елементів та на працездатність всієї системи в цілому. Тобто за аналогією з реальними системами, проблема комплексних досліджень пов'язана з об'єднанням різноманітних ефективних математичних моделей окремих елементів і підсистем в єдину, не менш ефективну цілісну математичну модель, здатну задовольнити суперечливі вимоги та забезпечити відпрацювання алгоритмів керування системою в цілому.

Слід зазначити, що розробка окремих елементів є винятком, а не правилом щодо комплектування цілісної системи з окремих елементів. Так само технологія комплектування цілісної математичної моделі системи залуцає відомі відпрацьовані моделі окремих елементів. Тобто проблема побудови цілісної математичної моделі системи, що досліджується, полягає в тому, щоб природно забезпечити об'єднання різноманітних форм математичних моделей окремих елементів та підсистем.

1. Організація спеціалізованого математичного забезпечення автоматизації наукових досліджень режимів роботи систем з динамічною структурою

1.1. Універсальні та спеціалізовані пакети прикладних програм

Ефективність рішення наведених задач досягається шляхом використання сучасних принципів організації систем автоматизації проектування (САПР). Так, принцип мінімізації обсягу вхідної та вихідної інформації системи, при максимальному інформаційному зв'язку з автоматизованими підсистемами вищого та нижчого рівнів, обумовлює перш за все автоматизацію першого етапу проектування – науково-дослідної роботи (НДР). Саме автоматизація НДР суттєво впливає на якість об'єкту проектування, тобто на основну мету діяльності проєктувальника.

Поширеною формою організації спеціального математичного забезпечення є пакети прикладних програм (ППП), які об'єднують алгоритмічні та програмні засоби з проблемною орієнтацією на конкретний клас задач. Організація ППП для автоматизованого дослідження при проектуванні нормальних та аварійних режимів роботи різних схемних варіантів судових електроенергетичних установок (СЕУ) забезпечує ефективність як постановки, так і рішення задачі. При цьому на різних стадіях НДР відокремлюють дві мети дослідження.

Перша мета полягає в моделюванні різних за складом та структурою схем. При цьому головною вимогою до ППП є простота переходу від одного до другого варіанту, що досягається вживанням спеціальних алгоритмів по формуванню математичної моделі установки на підставі математичних моделей

елементів, які залучаються вхідними даними у заданий варіант схеми. Звільнивши проектувальника від потреби у формуванні математичної моделі всієї установки, цю роботу виконує спеціалізована підпрограма, причому багаторазова, оскільки структура установки – динамічна. Зазначена універсальність ППП, з одного боку, полегшує роботу дослідника, а з другого боку – обумовлює суттєве зростання витрат часу роботи обчислювальної машини на розрахунки заданого варіанту.

Друга мета дослідження полягає у моделюванні великої кількості режимів роботи попередньо обраного варіанту схеми. При цьому головною вимогою до ППП є зменшення часу розрахунків заданого режиму. У цих умовах ефективність універсального ППП зменшується, що обумовлює потребу у спеціалізованому ППП для дослідження конкретної схеми з заданим складом елементів. Спеціалізований ППП також організують на підставі математичних моделей елементів, але додатково проектувальник мусить сформувати математичну модель усієї установки. При цьому суттєво зростають витрати часу дослідника фактично на постановку проблеми, при одночасному зменшенні часу роботи з обчислювальною машиною саме на розрахунки цікавих режимів роботи установки.

Дослідник один раз формує математичну модель обраного варіанту установки, використовуючи стандартні моделі елементів та фактичну структуру, з урахуванням динаміки комутаційних елементів. Утворення спеціалізованого ППП забезпечує ефективність роботи як обчислювальної машини (ОМ), так і дослідника, хоча і висуває додаткові вимоги до його кваліфікації у сфері математичного моделювання. Тобто, мета дослідження визначає спрямованість створюваного варіанту ППП. Оскільки обидві наведені мети існують та доповнюють одна одну, нижче розглядатимуться особливості утворення ППП обох видів.

1.2. Складові багаторівневого математичного забезпечення

Перспективні СЕУ вміщують керуючі мікро-ОМ, що забезпечують необхідні режими роботи обладнання. Такі установки вміщують програмну частину і її зміна обумовлює ефективність та функціональне призначення обладнання. Питання автоматизації розробки та налагодження цієї програмної частини є новими у проектуванні СЕУ. Саме тому зусилля докладаються до розробки спеціалізованого математичного забезпечення, для автоматизації відпрацювання програмної частини забезпечення роботи СЕУ у високоефективних експлуатаційних режимах, при аналізі, прогнозуванні та впливі на характер як аварійних, так і післяаварійних процесів. Цим визначається **рівень керуючих рівнянь** та підпрограм у математичному описі функціонування заданого класу об'єктів.

Здобутий досвід використання ОМ для моделювання як нормальних, так і аварійних режимів роботи обладнання свідчить, що на розрахунки потрібно в середньому 2-3 години часу ОМ, а перехід до використання значно потужніших ОМ автоматично забезпечує зростання складності розрахованих задач.

Сучасні ППП зорієнтовані на дослідження різноманітних схемних варіантів СЕУ, які

компонуються з окремих елементів, тому і математичний опис заданої системи мусить мати математичні моделі типових елементів та математичну модель структури системи, яка віддзеркалює схему з'єднання елементів в установку. Оскільки досліджуються складні види перехідних процесів, тому і математичні моделі типових елементів визначають **рівень диференціальних рівнянь** у математичному описі функціонування заданого класу об'єктів.

Ефективність та якість роботи функціональних алгоритмів ППП забезпечується обраними алгоритмами розрахунків режимів роботи систем разом з математичною моделлю всієї аналізованої установки, та математичними моделями типових елементів, враховуючи внутрішню структуру, наприклад, схему з'єднання обмоток багатополосного елемента у формі матриці полюсних провідностей. Матриці полюсних провідностей відповідають матрицям вузлових провідностей, які формуються за умов, що елементи у схемі не пов'язані між собою. Ці складові математичних моделей типових елементів визначають **рівень алгебраїчних рівнянь**.

Математична модель структури установки відображає схему з'єднання елементів в установку без відображення фізичного характеру утворюючих її елементів, також входить до **рівня алгебраїчних рівнянь**. Ефективність моделі структури СЕУ з різного роду комутаційними елементами, в тому числі напівпровідниковими приладами, визначається розглядом двох підграфів (електричного та комутаційного), використанням до кожного з них відповідної форми математичного опису, зорієнтованого на відображення суттєвих якостей елементів, та об'єднанням цих форм в єдину математичну модель, яка відображає зміни структури.

В сучасних СЕУ використовуються статичні перетворювачі електроенергії такі, як керуємі та некеруємі напівпровідникові перетворювачі.

Математичні моделі комутаційних елементів, приладів, електроавтоматики, систем керування напівпровідниковими перетворювачами утворюють **рівень логічних рівнянь**.

Багаторівневий характер математичного опису СЕУ дозволяє виділити типові задачі, які вирішують на кожному рівні, та розробити зорієнтовані алгоритми розрахунків, ефективні на відповідному рівні.

Математичні моделі типових елементів подають у вигляді багатополосних компонентів. Організація математичної моделі СЕУ дозволяє розробляти математичні моделі елементів окремими розроблювачами у різний час, незалежно один від одного, що суттєво скорочує строки дослідження складних установок при проектуванні і зменшує витрати при одночасному підвищенні ефективності дослідження.

Щоб отримати математичну модель СЕУ, «незалежну» від виду досліджуваної установки, необхідно мати повний набір математичних моделей типових елементів, оформлених у вигляді підпрограм. Цей набір потрібно поповнювати при використанні нових елементів. Набір математичних моделей елементів СЕУ можна оформити у вигляді бібліотеки в тій або іншій формі залежно від виду конкретної ОМ і її операційної системи. Крім того, однотипні елементи

СЕУ, маючи однаковий математичний опис, характеризуються різними параметрами. Тому необхідно сформувати бібліотеку каталожних даних, у якій зберігалася б інформація про параметри елементів СЕУ.

Врешті, в процесі дослідження виникають задачі різних рівнів. Типовими задачами є: визначення можливості нормального функціонування запропонованого варіанту СЕУ, визначення рівня структурної надійності дослідного варіанту, дослідження динаміки, оптимізації за різними критеріями: якістю вироблюваної електроенергії, максимальним ККД та ін. Щоб ефективно розв'язувати ці задачі, необхідно використовувати алгоритми, що реалізують різні чисельні методи, для чого потрібна бібліотека алгоритмів.

Так, розроблений ППП включає ряд програм з розрахунку показників якості електричної енергії в ustalених і перехідних режимах. Ці програми використовують як вхідну інформацію миттєві значення струмів і напруг у СЕУ і формують показники ефективності. При оцінці несинусоїдальності напруг проводиться гармонійний аналіз вказаних змінних.

Розглянуті особливості організації досліджень були покладені в основу розробленого спеціального математичного забезпечення аналогового і цифрового моделювання. Математичне забезпечення для аналогового моделювання реалізоване комплексом приладів моделювання електричних ланцюгів та елементів СЕУ. Математичне забезпечення для цифрового моделювання реалізоване двома, спеціалізованим та універсальним комплексами програм для автоматизованого дослідження при проектуванні нормальних і аварійних режимів роботи СЕУ.

2. Топологічний рівень опису структури СЕУ

Завданням докладного дослідження перехідних процесів в СЕУ є визначення динамічних властивостей системи і виявлення шляхів їх удосконалення з метою забезпечення необхідних показників якості вироблюваної електроенергії.

Для всебічного аналізу властивостей і розвитку засобів синтезу СЕУ необхідно володіти рівняннями цих систем в достатньо загальній формі, які є математичними моделями досліджуваного об'єкту.

Особливість СЕУ полягає в тому, що вони містять комутаційні елементи, наприклад, автомати і вентиляції, що в процесі роботи перебувають в одному з двох сталих станів – проводять струм або не проводять. Подання цих елементів ідеальними контактами, що змінюють структуру електричного ланцюга, зумовлює опис досліджуваної схеми, як електричним, так і комутаційним підграфами. Застосування теорії графів для опису комбінаторних контактних схем і електронних логічних ланцюгів, що відображаються булевими функціями, дає змогу сформулювати ефективний математичний опис комутаційного підграфа. Встановленню зв'язку між електричними і контактними частинами схеми шляхом використання загальних

методів, матричного і топологічного, кількісного опису складних систем, присвячені роботи [4, 5, 6, 7, 8, 12]. Нижче узагальнені відомі розробки в цій галузі і включені деякі нові результати.

Однією з основних вимог, що ставляться до математичного опису, є можливість дослідження функціонування системи в нормальних і аварійних режимах з урахуванням переключень, які приводять до зміни структури електричної системи. Цій вимозі задовольняє математична модель електричної системи, побудована за принципом топологічного ізоморфізму [5], який визначає взаємно однозначну відповідність між структурними перетвореннями в об'єкті і моделі. Згідно з цим принципом елементи електричної системи подані у вигляді багатополіусних компонент, багатополіусників. Динамічне об'єднання багатополіусників у систему здійснюється шляхом комутаційної схеми.

Сполучення багатополіусників між собою описується законами Кірхгофа. Ці закони пов'язані тільки з топологією ланцюга і не враховують характеру елементів, що її складають. Узагальнений метод аналізу ланцюгів з багатополіусниками і підсхемами дозволяє розкласти загальну задачу аналізу складних ланцюгів на кілька локальних, більш простих задач.

Для узагальненого дослідження схем елементи електричного ланцюга зображуються у вигляді ліній-гілок. Кожній гілці надамо напрям, обраний довільно і позначений стрілкою. Позитивні напрямки струмів у гілках і напруг на них приймаємо як такі, що співпадають з орієнтацією гілок. В місцях сполучення гілок утворюються вузли. Системи гілок, що з'єднані в вузлах, являють собою лінійні графи електричних схем. У графі досліджуваної системи можна виділити три підграфи, що описуються основними матрицями інцидентів і відповідають електричній, комутаційній схемі та схемі, яка включає малі параметри.

У підграфі, який включає малі параметри мережі (\mathbf{P}_m), містяться гілки, що віддзеркалюють ємності вузлів в системі відносно спільної бази. Підграф комутаційної мережі (\mathbf{P}_v) становлять комутаційні елементи системи. Решта гілок графа утворюють підграф електричної мережі (\mathbf{P}_e). Для кожного з підграфів можна сформулювати вектор струмів гілок підсхем ($\mathbf{I}_m, \mathbf{I}_v, \mathbf{I}_e$). Крім того, у типі систем, що розглядається, звичайно відсутні незалежні джерела струму, тому рівняння 1-го закону Кірхгофа приймає вигляд

$$[\mathbf{P}_e, \mathbf{P}_v, \mathbf{P}_m] \cdot [\mathbf{I}_e^t, \mathbf{I}_v^t, \mathbf{I}_m^t]^t = 0. \quad (1)$$

Якщо досліджують лише електромагнітні процеси в електричному ланцюзі без врахування струморозподілу в комутаційних елементах і струмів витоку через ємності вузлів схеми, то число стовпчиків матриць інцидентів \mathbf{P}_v і \mathbf{P}_m дорівнює 0.

Тому рівняння (1) можна записати

$$\mathbf{P}_v \cdot \mathbf{P}_m = 0 \quad (2)$$

Для запису комутаційної схеми використаємо матрицю суміжностей $\mathbf{A}_0 = \mathbf{P}_{vL} \wedge \mathbf{P}_{vL}^t$, де \mathbf{P}_{vL} – основна матриця інцидентів вхідних гілок комутаційного підграфа (логічна); \mathbf{P}_{vL}^t – транспонована основна

матриця інцидентності вихідних гілок комутаційного підграфу (логічна).

Прийняті позначки базуються на так званому поданні повної провідності контактної схеми: T – відповідає замкнутому, а F – розімкнутому ланцюгу.

Стан i -го комутаційного елемента (i -ї гілки комутаційного підграфу) визначається логічною змінною x_i . Тоді $A_1 = P_{vL} \wedge X_L \wedge P_{vL}^t$, де X_L – діагональна матриця стану комутаційних елементів (логічна).

Елемент матриці суміжностей $a_{ij} = T$, якщо у схемі існує гілка (комутаційного підграфу), спрямована від вузла i до вузла j , $a_{ij} = F$, якщо такої гілки немає. Діагональний елемент $a_{ii} = T$, якщо в вузлі i існує гілка – петля, і $a_{ii} = F$, якщо така петля відсутня. Дослідника цікавлять і аварійні режими роботи комутаційних елементів, такі як пробій вентиля, тобто спроможність проводити струм у зворотному напрямі, тому необхідно перейти до розгляду нової матриці суміжностей

$$A_2 = (P_{vL} \wedge X_L \wedge P_{vL}^t) \wedge (P_{vL}^t \wedge X_L \wedge P_{vL})$$

або матриці спряжень

$$A_3 = P_{vL} \wedge X_L \wedge P_{vL}^t,$$

де $P_{vL} = P^+ \wedge B \wedge P_{vL}^-$ – основна матриця інцидентності (логічна).

Матриці A_2 або A_3 своїми значущими (відмінними від FALSE) позадіагональними елементами вказують на існуючі у схемі спряження між вузлами. Оскільки кожний вузол електричного ланцюга тотожно зв'язаний сам із собою, основна матриця сполучень визначається, як

$$A = P_{vL} \wedge X_L \wedge P_{vL}^t \wedge E_L, \quad (3)$$

де E_L – одинична логічна матриця порядку m (m – число вузлів), яка визначає тотожність зв'язку вузла з самим собою.

Елементи основної матриці з'єднань визначають всі шляхи одиничної довжини (шлях, що включає одну гілку), що зв'язують вузли графа. Щоб визначити всі можливі шляхи довжиною не більш $m_k - 1$ гілок в комутаційному підграфі, слід використати матрицю повних досяжностей вузлів

$$A_L = A_L^{m_k - 1} = (P_{vL} \wedge X_L \wedge P_{vL}^t \wedge E_L)^{m_k - 1}, \quad (4)$$

де m_k – число вузлів, спільних для гілок комутаційного й електричного підграфів.

В процесі функціонування комутаційні елементи змінюють інцидентність вузлів графа, що приводить до зміни інцидентності гілок електричного підграфу, що на топологічному рівні описується матрицею P_e . Для відповідної перебудови матриці P_e можна безпосередньо використати алгебраїчну матрицю повних досяжностей вузлів A при переході від її логічної форми A_L

$$AP = A \cdot P_e. \quad (5)$$

При цьому, рядки перетвореної матриці інцидентності AP , відповідні вузлам, об'єднаним в складний комутаційний вузол, будуть рівні. Перетворена матриця інцидентності AP буде мати стільки залежних рядків, скільки вузлів об'єдналися в складний. Об'єднання вузлів комутаційним елементом, що замкнувся, зумовлює наявність двох однакових вузлів в схемі, що

аналізується, а в матриці інцидентності P_e – двох однакових рядків.

Розглянемо лише один вузол, відповідний складному вузлу, для цього необхідно складному вузлу надати номер якогось з комутуємих вузлів, а

$P_e \cdot I_e = 0$, інші вузли, що об'єдналися в складний, з розгляду виключити. З цією метою в роботі [5] було запропоновано використати логічну матрицю перебудовання V_L .

Якщо складному вузлу надаємо найменший індекс з комутуємих вузлів, то елементи матриці перебудовання V_L можна визначити через елементи матриці повних досяжностей A_L за виразом

$$b_{ij} = a_{ij} \bigwedge_{k=1}^{i-1} a_{ik}, \quad (6)$$

де a_{ij} , a_{ik} – ij -й елемент матриці A_L і логічне заперечення ik -го елемента матриці A_L ;

– знак логічного множення.

Матриця перебудовання V_L трикутна верхня визначає логічні умови зв'язності й існування вузлів. Елемент матриці перебудовання $b_{ij} = T$ тільки тоді, коли внаслідок замикання будь-якого числа комутаційних елементів утворився складний вузол з індексом i , а j -й вузол з розгляду виключено, як другорядний, причому завжди $j > i$. Діагональний елемент $b_{ii} = T$, якщо i -й вузол існує, а $b_{ij} = F$ – оскільки j -й вузол – другорядний в складному i -му вузлі.

Змінна структура аналізованої схеми описується динамічною матрицею інцидентності [5]

$$BP = V \cdot P_e. \quad (7)$$

Необхідно уточнити, що елементи матриці BP – цілі. При описі складних схем елементами логічної матриці V_L можуть бути вирази, що містять операції логічного додавання. Необхідно ввести проміжні логічні змінні так, щоб кожному елементу матриці V_L відповідала логічна перемінна, що замінила логічний вираз. Це необхідно, щоб перейти від логічної матриці V_L до її алгебраїчної форми запису у вигляді матриці V . Після цього можна сформувати алгебраїчну матрицю BP за рівнянням (7).

При виникненні другорядних вузлів, внаслідок замикання комутаційних елементів, в матриці BP виявляються нульові рядки, що приводить до виродження матриці вузлових провідностей. Якщо розглядати кожний другорядний вузол як виникнення ізольованого вузла, тобто підграфу що містить один єдиний вузол (базисний), потенціал якого дорівнює нулю, то можна відвернути виродження матриці вузлових провідностей. Процедура формування рівностей потенціалів другорядних вузлів нулю може бути формалізована наступним чином.

Діагональні елементи матриці V_L містять інформацію про вузли. Якщо $V_L(i, i) = T$, то i -й вузол розглядається, а якщо $V_L(i, i) = F$, то i -й вузол не розглядається як другорядний в складному вузлі, який виник в результаті

об'єднання вузлів комутаційними елементами, що замкнулися.

$$\text{Матриця } \mathbf{B}_L \vee \overline{\mathbf{E}}_L,$$

де \mathbf{E}_L – одинична логічна матриця, характеризує лише вузли, а не взаємозв'язки між вузлами.

$$\text{А матриця } \overline{\mathbf{B}_L \vee \mathbf{E}_L}$$

містить на головній діагоналі вирази, що забезпечують появу Т для будь-якого другорядного вузла. Тоді формалізована умова рівності нулю потенціалів будь-яких можливих другорядних вузлів при переході до алгебраїчного подання від матриці

$$\mathbf{BE}_L = \overline{\mathbf{B}_L \vee \mathbf{E}_L}$$

до матриці \mathbf{BE} , може бути записана як $\mathbf{BE} \cdot \mathbf{V} = 0$, де \mathbf{V} – вектор потенціалів вузлів.

Крім цього при розмиканні комутаційних елементів можливий розподіл електричного зв'язного підграфа на сукупність підграфів. В кожному підграфі необхідно виділити базисний вузол і прийняти, що його потенціал дорівнює нулю, попереду виключивши його з розгляду, аналогічно як другорядний. Утворення нових базисних вузлів в схемі, що аналізується, відбувається в результаті виникнення перерізів із комутаційних елементів.

Матриця перерізів \mathbf{Q}_L комутаційного підграфа містить стільки стовпчиків, скільки гілок в комутаційному підграфі, й стільки рядків – скільки перерізів. Матриця \mathbf{Q}_L формується з урахуванням лише тих перерізів, що виділяють лише один підграф, причому раніш не виділений.

Перерізи комутаційного підграфу при будь-яких станах комутаційних елементів описують матрицею

$$\bigwedge_{k=1}^{k=i-1} \mathbf{QE}_L = \overline{\mathbf{Q}_L \wedge \mathbf{X}_L \wedge \mathbf{Q}_L^t \vee \mathbf{ES}_L}, \quad (8)$$

де \mathbf{ES}_L – одинична логічна матриця, розмірність якої дорівнює кількості перерізів.

Матриця \mathbf{QE}_L – діагональна і позбавлена інформації про комутаційні елементи, спільні для декількох перерізів, бо необхідно враховувати самі перерізи, а не їх взаємозв'язки.

Вибір базисного вузла в кожному електричному підграфі може бути довільним. По результатах аналізу графа на зв'язність при розімкнутому стані комутаційних елементів формується матриця \mathbf{S}_L . Якщо $\mathbf{S}_L(i, j) = T$, то i -й вузол базисний внаслідок існування j -го перерізу. Тоді формалізована умова рівності нулю потенціалів будь-яких можливих базисних вузлів на основі матриці

$$\mathbf{GE}_L = \overline{\mathbf{S}_L \wedge \mathbf{Q}_L \wedge \mathbf{X}_L \wedge \mathbf{Q}_L^t \vee \mathbf{ES}_L \wedge \mathbf{S}_L^t}$$

при переході до її алгебраїчного подання матрицею \mathbf{GE} , може надаватися в формі

$$\mathbf{GE} \cdot \mathbf{V} = 0. \quad (9)$$

Щоб виключити з розгляду всі базисні вузли, що

утворюються, тобто як і для другорядних в складному вузлі, способом рівняння до нуля відповідних рядків матриці \mathbf{P}_e за допомогою матриці \mathbf{B}_L необхідно сформувати матрицю

$$\mathbf{C}_L = \overline{\mathbf{GE}_L \vee \mathbf{E}_L}. \quad (10)$$

Повна інформація про другорядні і базисні вузли може бути описана виразами:

- умова існування вузлів, пряма

$$\mathbf{CB}_L = \mathbf{C}_L \wedge \mathbf{B}_L; \quad (11)$$

- умова виродження вузлів, зворотна

$$(\mathbf{BE} + \mathbf{GE}) \cdot \mathbf{V} = 0. \quad (12)$$

Розглядаючи процес формування складних вузлів і комутаційних перерізів при замиканні одних і розмиканні інших комутаційних елементів як єдиний процес формування базисних вузлів внаслідок виникнення підграфів, можна сформувати таку матрицю

$$\mathbf{CBE}_L = \overline{\mathbf{CB}_L \vee \mathbf{E}_L}. \quad (13)$$

Тоді умова рівності нулю потенціалів будь-яких базисних вузлів, що утворюються, при переході від логічної матриці \mathbf{CBE}_L до її алгебраїчної форми запису як матриці \mathbf{CBE} , описується рівнянням

$$\mathbf{CBE} \cdot \mathbf{V} = 0. \quad (14)$$

При переході від логічної матриці \mathbf{CB}_L до її алгебраїчної форми \mathbf{CB} , динамічну структуру систем, що містять комутаційні елементи, можна описати матрицею

$$\mathbf{CBP} = \mathbf{CB} \cdot \mathbf{P}_e. \quad (15)$$

Висновки. Матриця (15) описує динамічну структуру системи при будь-яких станах комутаційних елементів, відсторонює дублювання інформації про другорядні вузли в складних вузлах і про базисні вузли, що утворюються внаслідок виникнення перерізів із комутаційних елементів, які приводять до розподілу первинного графа на сукупність підграфів.

Перспективи:

Наступним кроком у розвитку математичного опису систем зі структурою, що змінюється, – буде розробка алгоритму формування динамічної матриці \mathbf{CBM} , яка мінімізує кількість вузлів, які залишилися до розгляду при комутаціях елементів.

Література

1. Бондаренко В.М. Вопросы анализа линейных электрических и электронных цепей. – К.: Наукова думка, 1967. – 276 с.
2. Веретенников Л.П. Исследования процессов в судовых энергетических системах: Теория и методы. – Л.: Судостроение, 1975. – 376 с.
3. Кенинг В., Блекуэлл В. Теория электромеханических систем: пер. с англ. – М.: Энергия, 1965. – 314 с.
4. Козарук А.Е., Плахтина Е.Т. Вентильные преобразователи в

- судовых электромеханических системах. – Л.: Судостроение, 1987. – 192 с.
5. Краснов В.В. Методы математического моделирования судовых электроэнергетических систем: Уч. пособие. – Николаев: НКИ, 1972. – 88 с.
 6. Краснов В.В., Мещанинов П.А., Мещанинов А.П. Основы теории и расчёта судовых электроэнергетических систем: Моделирование для исследования специальных режимов: Уч. пособие, – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с. :ил.
 7. Максимович Н.Б. Методы топологического анализа электрических цепей. – Львов: Изд-во Львовского университета, 1970, – 258 с.: ил.
 8. Мещанинов А.П. Разработка метода и эффективных алгоритмов для анализа процессов в системах возбуждения, содержащих вентильные преобразователи: Диссерт. канд. техн. наук. – К.: Институт электродинамики АН УССР, 1979. – 239 с.
 9. Милых А.Н. Некоторые топологические свойства электрических цепей: Сборник научно-технических статей Харьковского электротехнического института, 1941. – Вып. № 6, с. 15-20.
 10. Сенди К. Современные методы анализа электрических систем: пер. с венгерского, – М.: Энергия, 1971. – 360 с.
 11. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем: 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Сов. радио, 1976. – 608 с.: ил.
 12. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.
 13. Sechu S., Reed M.B. Linear graphs and electrical networks. – New York, Addison-Wiley Publishing Co., 1961.
 14. Ford L.R. Jr. C-E-I-R, INC, Fulkerson D.R. the Rand Corporation, Princeton University Press Princeton, New Jersey, 1962. – 267 с. С русский перевод : Форд Л.Р. Поток в сетях. – М.: Мир, 1966. – 276 с.