

МЕТОД ЕКВІВАЛЕНТУВАННЯ СХЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДОЛОГІЇ РІВНОВАЖНОГО БАЛАНСУВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Розроблено новий метод еквівалентування з використанням запропонованої методології рівноважного балансування з метою спрощення розрахунків еквівалентних взаємних опорів між вузлами електричної схеми із застосуванням матричних перетворень структури мережі. Розроблений метод дозволяє на основі використання першої матриці інцидентності провести розрахунок еквівалентів будь-яких з'єднань двох вузлів схеми. Створено математичні моделі для розрахунку повної матриці опорів наявних та віртуальних віток схеми, яка репрезентує всі існуючі взаємозв'язки між вузлами з урахуванням впливів суміжної схеми мережі.

Розрахунок еквівалентних опорів за цим методом здійснюється на основі аналізу схеми електричної мережі. Таким чином, встановлюється одиничний вхідний задавальний струм початкового вузла та одиничний вихідний задавальний струм кінцевого вузла, решта задавальних струмів прорівнюються до нуля. Отже, еквівалентний струм у такому випадку буде рівний одиниці, а значення еквівалентного опору між вузлами схеми становитиме суму спадів напруг за умови таких задавальних струмів. Струми у вітках визначаються множенням оберненої матриці інцидентності на доповнену матрицю. Знаходження еквівалентних опорів між вітками, що не мають безпосереднього з'єднання, здійснюється шляхом доповнення матриці інцидентності додатковими віртуальними вітками, що дозволяє обчислити значення взаємних еквівалентних опорів і для цих віток.

Операцію порядкового множення струму на опір можна здійснити перед відніманням стовпців оберненої матриці, тобто перед добутком оберненої матриці на доповнену матрицю інцидентності, що дозволить розрахувати додаткові взаємні еквівалентні опори для віртуальних віток. В результаті отримано моделі обчислення повної матриці взаємозалежності еквівалентних опорів від напруг віток.

Значення еквівалентних опорів розташовані на діагоналі повної матриці взаємозв'язку опорів і можуть бути підраховані за спрощеною формулою як сума добутків струмів на опори віток. Такий метод еквівалентування схеми значно спрощує розрахунки всіх еквівалентних опорів схеми завдяки використанню методології рівноважного балансування, що дозволяє провести розрахунки для усіх вузлів схеми, встановивши залежності еквівалентних опорів від спадів напруг.

Метою роботи є підвищення ефективності методу еквівалентування електричних мереж шляхом використання рівноважного балансування розрахунку усталеного режиму електричних систем, що дозволяє оптимізувати розрахункові процеси.

Ключові слова: еквівалентування, спрощення електричної схеми, матричний розрахунок, метод рівноважного балансування.

Вступ

Електричні мережі нині характеризуються складною структурою, великим обсягом елементів, які зі свого боку мають низку інформаційних параметрів, зумовлених виникненням тих чи інших процесів, що часто не піддаються аналізу без певних припущень [1]. Сучасний стан вітчизняних електроенергетичних систем потребує впровадження нових прогресивних інформаційних технологій та автоматизації режимів роботи.

Для підвищення ефективності функціонування електричних мереж, оптимізації з тих чи інших міркувань структури електроенергетичної системи (ЕЕС), побудови математичних моделей, які репрезентують функціональні можливості системи, розробляються новітні методи розрахунку електричних мереж. Серед них метод еквівалентування, який застосовується для проектних

розрахунків, досліджень режимів роботи ЕЕС, аналізу аварійних режимів роботи, прогнозування та керування усталеними режимами електричних систем.

Обмеження в наявній інформації і необхідність підвищення рівня автоматизації управління режимами роботи електричної мережі, зокрема під час розрахунку втрат електроенергії в електричних мережах різних класів напруг [2], [3], розв'язанні задачі компенсації реактивної потужності [4], розрахунку режимів короткого замикання [5], розв'язання задач оперативної оптимізації режимів електричних мереж [6] та розв'язання інших технічних, економічних і комерційних задач [7]—[9] зумовлює використання методів еквівалентування.

Таким чином, побудова математичних моделей електричної мережі, які б повною мірою характеризували реальний її стан і, разом з тим, у процесі її еквівалентування дозволяли б спростити її схему заміщення та створити ефективні алгоритми обробки даних, є актуальним завданням.

Метою роботи є підвищення ефективності методу еквівалентування електричних мереж шляхом використання рівноважного балансування розрахунку усталеного режиму електричних систем, що дозволяє оптимізувати розрахункові процеси.

У роботі використовуються методи розрахунку усталеного режиму електроенергетичної системи та метод рівноважного балансування потужностей.

Об'єктом дослідження є процес розрахунку еквівалентних опорів схеми електричної мережі з використанням рівноважного балансування для визначення повної матриці взаємних опорів.

Предметом дослідження є метод еквівалентування схеми з використанням рівноважного балансування.

Головною задачею роботи є розробка нового методу розрахунку еквівалентних опорів схеми електричної мережі, який базується на використанні методології рівноважного балансування для спрощення розрахунків еквівалентних взаємних опорів між вузлами електричної схеми із застосуванням матричних перетворень структури мережі.

Розробка методу еквівалентування схеми з використанням рівноважного балансування

Розрахунок усталеного режиму роботи електричної мережі за методом рівноважного балансування [10] передбачає використання повної матриці інцидентності, яка доповнюється стовпцем з одиниць для обчислення матриці коефіцієнтів рівнянь стану. Тож рівноважна матриця інцидентності має вигляд

$$M_p = [M \quad 1].$$

Добуток другої матриці інцидентності на діагональну матрицю опорів віток відповідно до методу рівноважного балансування повинен бути доповнений справа стовпцем з нулями [10]. Таким чином, рівноважна матриця опорів матиме вигляд

$$Z_p = [N \cdot Z, 0].$$

Такий підхід дозволяє привести задачу до нульової міри складності. Узагальнене рівняння стану набуває вигляду

$$A_p \cdot I_p = F,$$

де $A_p = \begin{bmatrix} M_p \\ Z_p \end{bmatrix}$ — рівноважна матриця коефіцієнтів; $I_p = \begin{bmatrix} I \\ I_{нб} \end{bmatrix}$ — рівноважний вектор струмів у

вітках; $F = \begin{bmatrix} J \\ N \cdot E \end{bmatrix}$; $I_{нб} = 0$ — струм небалансу, що рівний 0 за умови зрівноваженості навантажень вузлів. За умови небалансу потужностей в електричній системі $I_{нб}$ складає відповідну частку небалансу щодо кожного рівняння першого закону Кірхгофа.

Створивши обернену матрицю коефіцієнтів та помноживши її на вектор вільних членів, отримаємо значення

$$I_p = A_p^{-1} \cdot F.$$

Для визначення еквівалентного опору R_e між двома вузлами схеми необхідно взяти всі задавальні струми у вузлах рівними 0, окрім задавального струму початкового вузла, який вважаємо рів-

ним -1 , та кінцевого вузла, який задаємо рівним 1 з метою зрівнювання еквівалентного струму одиниці: $I_e = 1$. Наприклад, у визначенні еквівалентного опору між першим та другим вузлами схеми з п'ятьма вузлами, вектор задавальних струмів набуде вигляду

$$J^T = [-1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Розрахунок еквівалентних опорів за цим методом здійснюється на основі розрахунку схеми електричної мережі, коли задано одиничний вхідний задавальний струм на початку еквівалентної вітки та одиничний вихідний задавальний струм в її кінці. Так відбувається прирівнювання еквівалентного струму до одиниці, а значення еквівалентного опору між вузлами схеми становитиме суму спадів напруг за умови таких задавальних струмів.

Для визначення вектора вільних членів F рівняння стану вектор задавальних струмів необхідно доповнити кількістю нулів, що відповідає кількості контурів схеми.

Враховуючи те, що одиничний струм протікає в колі еквівалентного опору між першим та другим вузлами схеми, а також те, що напруга між вузлами у схемі залишається сталою, еквівалентний опір можна визначити з виразу

$$I_e \cdot R_e = 1 \cdot R_e = U_e = U_{12} = R_{12} \cdot I_{12},$$

де I_{12} — значення струму, що отримується в результаті розрахунку рівняння стану для вітки з опором R_{12} між вузлами 1 та 2.

Отже, розрахувавши значення струму за вказаних умов, можна отримати значення еквівалентного опору

$$R_{e12} = \frac{R_{12} \cdot I_{12}}{I_e}.$$

Значення еквівалентного опору віртуальної вітки між вузлами, наприклад 1 і 5, може бути розраховане через інші вітки, що з'єднують ці вузли

$$R_{e15} = \frac{R_{12} \cdot I_{12} + R_{25} \cdot I_{25}}{I_e}$$

за умови послідовного з'єднання віток з опорами R_{12} та R_{25} .

Для наявних віток схеми проводиться множення оберненої матриці інцидентності на матрицю інцидентності з метою знаходження струмів у вітках. Знаходження еквівалентних опорів між вітками, що не мають безпосереднього з'єднання, здійснюється шляхом доповнення матриці інцидентності додатковими віртуальними вітками, що дозволяє обчислити значення взаємних еквівалентних опорів і для цих віток.

Кількість віртуальних віток у схемі розраховується за формулою

$$m_v = 0,5 \cdot (n^2 - n) - m,$$

де n та m — відповідно, кількість вузлів та віток у схемі.

Виконаємо матричний розрахунок еквівалентних опорів у схемі, скориставшись розширеною та доповненою першою матрицею інцидентності, оскільки сукупність стовпців J_i , $i = \overline{1, m + m_v}$ для різних віток схеми є матрицею інцидентності

$$M^{\text{доп}} = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ \dots \ J_{m+m_v}].$$

Матриця $M^{\text{доп}}$ є першою матрицею інцидентності, яка розширена додатковим рядком, що відповідає балансуєчому вузлу, та доповнена рядками нулів, що відповідають кількості контурів, а також стовпцями, які відповідають віртуальним віткам між вузлами схеми

$$M^{\text{доп}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для визначення повної матриці взаємозалежності еквівалентних опорів від напруг віток операцію порядкового домноження струму на опір можна здійснити перед відніманням стовпців оберненої матриці (тобто, перед домноженням оберненої матриці на доповнену матрицю інцидентності). Це дозволить провести розрахунок додаткових взаємних еквівалентних опорів для віртуальних віток.

Виконаємо поелементне множення кожного рядка оберненої матриці коефіцієнтів методу рівноважного балансування [10] $B = A_s^{-1}$ на значення опору відповідної вітки Z_i

$$D_{i,j} = B_{i,j} \cdot Z_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Для того, щоби розрахувати еквівалентні опори між вузлами, які нез'єднані між собою однією віткою (тобто з'єднані віртуальною віткою за умови зв'язності вершин графа), необхідно доповнити матрицю D додатковими рядками, які характеризуватимуть віртуальні вітки схеми, шляхом додавання/віднімання наявних рядків матриці D, що відповідають віткам, які з'єднують ці вузли, наприклад,

$$D_{m+1,j} = Q_{m+1,k} \cdot D_{k,j} + Q_{m+1,i} \cdot D_{i,j},$$

де $Q_{m+1,k}, Q_{m+1,i}$ — знакові коефіцієнти, що дорівнюють ± 1 відповідно до напрямку k -ї та i -ї віток, за якими здійснюється розрахунок, ці коефіцієнти будуть додатними, якщо напрямок вітки збігається з напрямком віртуальної $m+1$ вітки, та від'ємними, якщо напрямок цієї віртуальної вітки — протилежний. Аналогічно додаємо рядки інших віртуальних віток матриці D.

Розрахунок матриці еквівалентних опорів проводиться шляхом множення матриць

$$R = D \cdot M^{\text{д}}.$$

Оскільки інформативними в розширеній та доповненій першій матриці інцидентності $M^{\text{д}}$ є лише n рядків та $m_s = (n^2 - n)/2$ стовпців, то для множення в матриці D актуальними є всі m_s рядки та тільки n стовпців. У результаті отримуємо квадратну матрицю еквівалентних опорів розмірністю $m_s \times m_s$.

Отримана матриця еквівалентних опорів репрезентує взаємні опори між вузлами схеми та результуючі еквіваленти на діагоналі матриці R. Характерною особливістю такої матриці є повна інформативність її елементів, які виявляють взаємовпливи між вузлами за рахунок елементів суміжної з ними схеми електричної мережі.

Значення еквівалентних опорів віток знаходяться на діагоналі цієї матриці. Підвищити ефективність методу можна, оптимізувавши алгоритм розрахунку шляхом зменшення обсягу розрахунків до знаходження найінформативніших діагональних елементів цієї матриці

$$R_{i,i} = \sum_{j=1}^n D_{i,j} \cdot M_{j,i}^{\text{д}}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Таким чином, побудовано метод еквівалентування схеми з використанням рівноважного балансування, який дозволяє шляхом аналітичних матричних перетворень виявити проблемні ділянки схеми електричної мережі за спадом напруги в результаті аналізу значень матриці R, що знаходяться не тільки на головній діагоналі.

Розроблений новий метод еквівалентування схеми спрощує розрахунки еквівалентних опорів усієї схеми завдяки використанню методології рівноважного балансування, що дозволяє провести розрахунки для всіх вузлів схеми, розрахувавши еквівалентні опори від спадів напруг.

Приклад розрахунку схеми надійності

Розглянемо схему розрахунку, показану на рис. 1.

Матриця коефіцієнтів рівняння стану за методом рівноважного балансування має вигляд

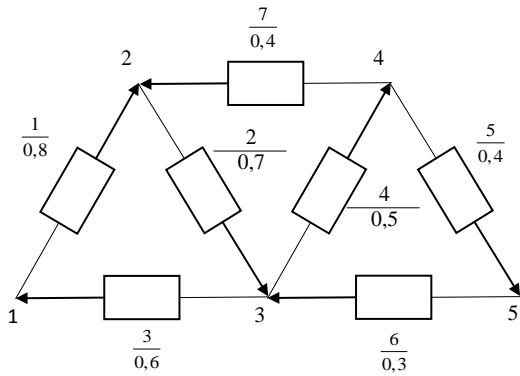


Рис. 1. Заступна схема електричної мережі

$$A_p = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0,4 & 0,3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0,4 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Обернена матриця коефіцієнтів A_p

$$B = \begin{bmatrix} -0,34 & 0,20 & 0,00 & 0,09 & 0,04 & 0,57 & 0,12 & -0,29 \\ -0,01 & -0,24 & 0,16 & -0,01 & 0,09 & 0,28 & -0,24 & 0,58 \\ 0,46 & 0,00 & -0,20 & -0,11 & -0,16 & 0,57 & 0,12 & 0,29 \\ -0,09 & 0,04 & -0,19 & 0,24 & 0,00 & -0,17 & 0,62 & 0,50 \\ -0,02 & -0,12 & 0,05 & -0,26 & 0,35 & 0,12 & 0,98 & -0,36 \\ 0,18 & 0,08 & 0,25 & -0,26 & -0,45 & 0,12 & 0,98 & -0,36 \\ 0,13 & 0,36 & -0,04 & -0,29 & -0,15 & -0,29 & -0,36 & 0,86 \\ 0,20 & 0,20 & 0,20 & 0,20 & 0,20 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix}$$

Скорочена до наявної кількості вузлів у схемі матриця поелементного добутку значень оберненої матриці на значення опорів віток доповнена віртуальними вітками між вузлами і подана в табл. 1.

Таблиця 1

Актуальні коефіцієнти матриці D

Вітка/вузол	1	2	3	4	5
1-2	-0,27	0,163	0,004	0,071	0,033
2-3	-0,01	-0,17	0,113	-0	0,063
3-1	0,277	0,002	-0,12	-0,07	-0,1
3-4	-0,05	0,022	-0,1	0,122	-0
4-5	-0,01	-0,05	0,021	-0,1	0,139
5-3	0,054	0,025	0,075	-0,02	-0,14
4-2	0,052	0,144	-0,02	-0,12	-0,06
1-4	-0,32	0,019	0,021	0,189	0,093
1-5	-0,33	-0,03	0,042	0,085	0,232
2-5	-0,06	-0,19	0,038	0,014	0,199

Результат множення скороченої матриці D на матрицю M^D наведено у табл. 2, що репрезентує значення опорів.

Таблиця 2

Підсумкова матриця еквівалентних опорів

1-2	0,434	-0,16	-0,27	0,067	-0,04	-0,03	0,092	0,342	0,303	-0,131
2-3	-0,16	0,279	-0,12	-0,12	0,067	0,05	-0,16	0,002	0,069	0,228
3-1	-0,27	-0,12	0,394	0,05	-0,03	-0,02	0,069	-0,34	-0,372	-0,098
3-4	0,067	-0,12	0,05	0,218	-0,12	-0,09	-0,1	0,168	0,043	-0,024
4-5	-0,04	0,067	-0,03	-0,12	0,243	-0,12	0,058	-0,1	0,147	0,185
5-3	-0,03	0,05	-0,02	-0,09	-0,12	0,212	0,043	-0,07	-0,190	-0,161
4-2	0,092	-0,16	0,069	-0,1	0,058	0,043	0,262	-0,17	-0,112	-0,204
1-4	0,342	0,002	-0,34	0,168	-0,1	-0,07	-0,17	0,512	0,416	0,074
1-5	0,303	0,069	-0,37	0,043	0,147	-0,19	-0,11	0,416	0,562	0,259
2-5	-0,13	0,228	-0,1	-0,02	0,185	-0,16	-0,2	0,074	0,259	0,390

Значення еквівалентних опорів схеми електричної мережі містяться на головній діагоналі значень у табл. 2. Проведемо альтернативний розрахунок еквівалентних опорів з метою перевірки запропонованого методу еквівалентування схеми.

Перевірка розрахунку

1. Виконаємо розрахунок еквівалентного опору вітки 1–3.

$$R_{e1} = R_{4567} = \frac{(R_5 + R_6) \cdot R_4}{(R_5 + R_6 + R_4)} + R_7 = \frac{0,7 \cdot 0,5}{0,7 + 0,5} + 0,4 = 0,692;$$

$$R_{e2} = R_1 + \frac{(R_2 \cdot R_{e1})}{(R_2 + R_{e1})} = 1,148; \quad R_{e3} = \frac{R_3 \cdot R_{e2}}{(R_3 + R_{e2})} = 0,394.$$

Результат цього розрахунку збігається з відповідним елементом, що знаходиться на діагоналі в 3-му рядку розрахункової таблиці 2.

2. Виконаємо розрахунок еквівалентного опору вітки 1–5.

Виконавши перетворення трикутників у зірки, відповідно для трикутника 1–2–3, отримаємо значення $R_{11} = 0,229$; $R_{12} = 0,267$; $R_{13} = 0,200$; для трикутника 4–5–6 отримаємо $R_{23} = 0,125$; $R_{24} = 0,167$; $R_{25} = 0,100$.

За послідовно-паралельними перетвореннями визначаємо еквівалентні опори

$$R_{1e} = R_{12} + R_7 + R_{24} = 0,833; \quad R_{2e} = R_{13} + R_{23} = 0,325;$$

$$R_{3e} = \frac{R_{1e} \cdot R_{2e}}{(R_{1e} + R_{2e})} = 0,234; \quad R_{4e} = R_{3e} + R_{11} + R_{25} = 0,562.$$

Отриманий результат збігається з відповідним елементом, що знаходиться на діагоналі в 9-му рядку розрахункової таблиці 2.

Висновки

Розроблено новий метод розрахунку еквівалентних опорів схеми електричної мережі, який ґрунтується на використанні методології рівноважного балансування. Запропонований метод дозволяє отримати повну матрицю еквівалентних опорів, елементи якої встановлюють взаємозв'язки між усіма вузлами схеми, та у вигляді взаємних опорів репрезентує суміжні впливи інших віток схеми на еквівалентний опір.

Розроблено математичні моделі, які дозволяють здійснити розрахунок повної матриці еквівалентних опорів з використанням розширеної та доповненої першої матриць інцидентності, що вперше репрезентує повну характеристику електричної мережі з урахуванням віртуальних віток та, ґрунтуючись на методології рівноважного балансування, використовує усі рівняння першого закону Кірхгофа для схеми в розрахунку.

Перспективою подальшого дослідження є використання запропонованого методу для планування розвитку електричної мережі з метою покращення режимів роботи за напругою та введення додаткового резервування для підвищення надійності постачання електричної енергії до споживачів.

Область використання розробленого методу є надзвичайно широкою. Він може використовуватися не лише в проектних розрахунках, для оперативного керування режимами роботи, в режимних розрахунках електричної мережі, а також для розв'язання інших виробничих, техніко-економічних та енергозбутових задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] П. Л. Воронов, и В. А. Щедрин, «Эквивалентирование и упрощение сложных электрических систем по частям при моделировании», *Вестник чувашского университета*, № 1, с. 44-54, 2015.
- [2] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, і А. В. Пашенко, «Розрахунок втрат електричної енергії в електричних мережах 0,38 кВ з використанням АСКОЕ», *Вісник Приазовського державного технічного університету, серія: Технічні науки*, с. 36-40, 2005.
- [3] В. В. Кулик, А. В. Писклярова, і Д. С. Пискляров, *Методи та засоби підвищення точності визначення втрат електроенергії в розподільчих мережах 10(6) кВ з використанням нечітких множин*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2011.
- [4] О. Д. Демов, і Ю. Ю. Півнюк, *Оптимізація впровадження та використання компенсуючих установок у розподільних електричних мережах споживачів*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2018.
- [5] С. Г. Слюсаренко, и П. Ю. Костюк, «Расчёт режимов коротких замыканий и эквивалентирование электрических схем, содержащих ветви с ЭДС», *Известия Томского политехнического университета*, т. 312, № 4, с. 100-103, 2008.

[6] О. В. Данилюк, А. Б. Козовий, М. М. Швець, і І. Р. Мельник, «Нейроматематичне еквівалентування нетелемеханізованих фрагментів для задач оперативної оптимізації режимів електричних мереж,» *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 51-57, 2009.

[7] А. Г. Русина, «Особенности эквивалентирования электрических сетей при различных целях функционирования электрических систем,» *Проблемы энергетики*, № 9-10, с. 41-48, 2010.

[8] Н. В. Савина, и С. В. Тагиров «Декомпозиция электрических сетей как средство упрощения расчета установившихся режимов в условиях рыночной энергетики,» *Вестник Амурского государственного университета*, № 43, с. 60-64, 2017.

[9] М. Ш. Мисриханов, и В. Н. Рябченко, «Метод эквивалентирования электрической сети на основе матричных делителей нуля,» *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*, № 1, с. 15-18, 2010.

[10] С. В. Бевз, С. М. Бурбело, і В. В. Войтко, «Метод рівноважного балансування та автоматизація розрахунків усталеного режиму електричної мережі засобами MathCAD,» *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова*, № 4, 20 с., 2020.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.10.2021

Бевз Світлана Володимирівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: bevez@vntu.edu.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. V. Bevez¹

Method of Equivalent of the Scheme Using the Methodology of Equilibrium Balance

¹Vinnitsya National Technical University

A new method of equivalence has been developed using the proposed methodology of equilibrium balancing in order to simplify the calculation of equivalent mutual resistances between the nodes of the electrical circuit using matrix transformations of the network structure. The developed method allows, based on the use of the first incidence matrix, to calculate the equivalents of any connections of two circuit nodes. Mathematical models have been created for calculating the full resistance matrix of the existing and virtual circuit branches, which represents all existing interconnections between nodes, taking into account the effects of the adjacent network circuit.

The calculation of equivalent resistances by this method is carried out based on the analysis of the electrical network diagram. Thus, a single input driving current of the initial node and a single output driving current of the end node are set, the remaining driving currents are set to zero. So, the equivalent current in this case will be equal to unity, and the value of the equivalent resistance between the nodes of the circuit will be the sum of the voltage drops at such driving currents. The currents in the branches are determined by multiplying the inverse incidence matrix by the augmented matrix. Finding the equivalent resistances between branches that do not have a direct connection is carried out by supplementing the incidence matrix with additional virtual branches, which make it possible to calculate the value of the mutual equivalent resistances for these branches as well.

The operation of ordinal multiplication of the current by the resistance can be performed before subtracting the columns of the inverse matrix, that is, before the product of the inverse matrix by the augmented incidence matrix, which will allow calculating additional mutual equivalent resistances for the virtual branches. As a result, models for calculating the full matrix of the interdependence of equivalent resistances on branch voltages were obtained.

The values of the equivalent resistances are located on the diagonal of the complete resistance interconnection matrix and can be calculated using a simplified formula as the sum of the products of currents and branch resistances. This method of equivalent circuitry greatly simplifies the calculations of all equivalent circuit resistances due to the use of the equilibrium balancing methodology, it allows calculations for all circuit nodes, establishing the dependence of equivalent resistances on voltage drops.

The aim of the work is to increase the efficiency of the method of equivalence of electrical networks through the use of equilibrium balancing for calculating the steady state of electrical systems, which allows to optimize the calculation processes.

Keywords: equivalence, simplification of the electrical circuit, matrix calculation, equilibrium balancing method.

Bevez Svitlana V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Power Stations and Systems, e-mail: bevez@vntu.edu.ua

Метод эквивалентирования схемы с использованием методологии равновесного балансирования

¹Вінницький національний технічний університет

Разработан новый метод эквивалентирования с использованием предложенной методологии равновесной балансировки с целью упрощения расчетов эквивалентных взаимных сопротивлений между узлами электрической схемы с применением матричных преобразований структуры сети. Разработанный метод позволяет на основе использования первой матрицы инцидентности провести расчет эквивалентов любых соединений двух узлов схемы. Созданы математические модели для расчета полной матрицы сопротивлений имеющихся и виртуальных ветвей схемы, которая представляет все существующие взаимосвязи между узлами с учетом воздействий смежной схемы сети.

Расчет эквивалентных сопротивлений по этому методу осуществляется на основании анализа схемы электрической сети. Таким образом, устанавливается единичный входной задающий ток начального узла и единичный выходной задающий ток конечного узла, остальные задающие токи приравниваются к нулю. Итак, эквивалентный ток в таком случае будет равен единице, а значение эквивалентного сопротивления между узлами схемы составит сумму спадов напряжения при таких задающих токах. Токи в ветвях определяются умножением обратной матрицы инцидентности на дополненную матрицу. Нахождение эквивалентных сопротивлений между ветвями, не имеющих непосредственного соединения, осуществляется путем дополнения матрицы инцидентности дополнительными виртуальными ветвями, позволяющими вычислить значение взаимных эквивалентных сопротивлений и для этих ветвей.

Операцию порядкового умножения тока на сопротивление можно осуществить перед вычитанием столбцов обратной матрицы, то есть перед произведением обратной матрицы на дополненную матрицу инцидентности, что позволит рассчитать дополнительные взаимные эквивалентные сопротивления для виртуальных ветвей. В результате получены модели вычисления полной матрицы взаимозависимости эквивалентных сопротивлений от напряжений ветвей.

Значения эквивалентных сопротивлений расположены на диагонали полной матрицы взаимосвязи сопротивлений и могут быть подсчитаны по упрощенной формуле как сумма произведений токов на сопротивления веток. Такой метод эквивалентирования схемы значительно упрощает расчеты всех эквивалентных сопротивлений схемы благодаря использованию методологии равновесной балансировки, позволяет провести расчеты для всех узлов схемы, установив зависимости эквивалентных сопротивлений от спадов напряжений.

Целью работы является повышение эффективности метода эквивалентности электрических сетей за счет использования равновесной балансировки расчета установившегося режима электрических систем, что позволяет оптимизировать расчетные процессы.

Ключевые слова: эквивалентирование, упрощение электрической схемы, матричный расчет, метод равновесного балансирования.

Бевз Светлана Владимировна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: beviz@vntu.edu.ua