

В. В. Кулик, к. т. н., доц.; С. Я. Вишневський

КОМБІНОВАНІ МОДЕЛІ НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДОВГИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

У статті розглянуто метод формування комбінованих моделей нормальних режимів електричних систем (ЕС), які поєднують моделі елементів ЕС із зосередженими параметрами та представлення довгих ліній електропередачі у вигляді пасивних чотириполюсників. Це дозволяє підвищити адекватність відтворення процесів взаємовпливу електричних мереж ЕС.

Ключові слова: електричні системи, взаємовплив електричних мереж, комбіновані моделі нормальних режимів, довгі лінії електропередачі, розподілені параметри, пасивні чотириполюсники.

Вступ

Із розвитком енергетичної галузі сучасні електричні системи (ЕС) набувають усе більш складної технічної та функціональної структури, що, у свою чергу, ускладнює керування такими системами. Транспортування електроенергії в ЕС характеризується сукупністю проблем, які зумовлюють підвищений рівень технічних утрат електроенергії. Серед них слід виділити невідповідність сучасного енергогенерування та споживання ЕС проектним умовам, а також недосконалість наявних систем оперативного-диспетчерського керування [1]. Одним зі шляхів покращення ситуації є оптимізація нормальних режимів ЕС з урахуванням взаємовпливу магістральних та розподільних електромереж [2].

Підготовка та своєчасна реалізація оптимальних рішень щодо коригування параметрів нормальних режимів ЕС можливі лише в разі залучення засобів автоматизації на всіх етапах керування [1]. Визначення оптимальних станів ЕС у цьому випадку може здійснюватися на підставі різних математичних моделей їх нормальних режимів, переважно таких, що базуються на описі фізичних процесів передачі та розподілу електроенергії в ЕС [3].

Для опису математичних моделей нормальних режимів ЕС, які використовують для формування оптимальних керувальних впливів, ураховуючи жорсткі часові обмеження, традиційно використовують підходи, що пов'язані з еквівалентуванням елементів електричних мереж у вигляді заступних схем зі зосередженими параметрами [3, 4]. З метою підвищення адекватності таких схем для довгих ліній електропередачі (ЛЕП) застосовують поправочні коефіцієнти [4, 5], завдяки чому досягається точність комп'ютерного моделювання, цілком достатня для планування режимів ЕС, формування їхніх ремонтних схем тощо.

Проте такий підхід не дозволяє повною мірою враховувати особливості передачі електроенергії лініями напругою 330 кВ і вище, зокрема, вплив їхніх хвильових параметрів на процес перерозподілу потоків потужності у контурах електричних мереж. Тому для виявлення фізичних особливостей транспортування електроенергії та підвищення адекватності оптимального керування нормальними режимами ЕС, а особливо паралельною роботою електричних мереж різних класів напруги, необхідно використовувати більш точні математичні моделі об'єкта керування, комбінуючи їх зі спрощеними, де це можливо.

Технічні можливості обчислювальних засобів автоматизованих систем диспетчерського керування ЕС та постійно зростаючий обсяг доступних параметрів їхнього режиму формують передумови для застосування уточнених математичних моделей [1] з метою аналізу їхніх станів, урахування технологічних обмежень щодо ведення режимів та оптимального керування ними. Тому в цій роботі подано результати досліджень з формування комбінованих моделей нормальних режимів ЕС, що поєднують переваги

моделей з зосередженими параметрами та моделей довгих ЛЕП у вигляді чотириполюсників, для більш адекватного відтворення процесів передачі електроенергії такими лініями.

Особливості моделювання нормальних режимів довгих ЛЕП та основні співвідношення їхніх параметрів

Як відомо, процес передачі енергії лініями електропередач змінного струму пов'язаний з розповсюдженням електромагнітних хвиль уздовж проводів лінії. Аналіз режимів роботи ліній довжиною до 300 км на практиці не потребує врахування хвильового характеру процесів передачі електричної енергії, тому для них доцільно застосовувати заступні схеми зі зосередженими параметрами [5, 6].

У випадку ЛЕП, довжина яких співмірна з довжиною хвилі робочої напруги, необхідно враховувати хвильовий характер процесу передачі електроенергії. Лінії такої довжини мають подаватися як кола з розподіленими параметрами [6], для яких характерна просторова неодноразність змін стану. Така властивість довгих ЛЕП, очевидно, призводить до певних особливостей їхнього взаємовпливу з ЛЕП малої довжини (до 300 км), якщо вони об'єднані на паралельну роботу.

Довгі електропередачі зазвичай подають як лінії з розподіленими параметрами [5, 6], режими яких описують такими співвідношеннями (у гіперболічній формі):

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = ch(\gamma_0 l) \dot{U}_2 + \sqrt{3} \dot{Z}_c sh(\gamma_0 l) \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3} \dot{Z}_c} sh(\gamma_0 l) \dot{U}_2 + ch(\gamma_0 l) \dot{I}_2, \end{cases} \quad (1)$$

де \dot{U}_1 , \dot{U}_2 – лінійні напруги, а \dot{I}_1 , \dot{I}_2 – фазні струми на початку та в кінці ЛЕП;

$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}$ – хвильовий опір, а $\gamma_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}$ – коефіцієнт розповсюдження

хвилі ЛЕП; r_0 , x_0 – питомі поздовжні опори, а g_0 , b_0 – питомі поперечні провідності ЛЕП; l – довжина ЛЕП.

Використовуючи постійні чотириполюсника $A = ch(\gamma_0 l)$, $B = \dot{Z}_c sh(\gamma_0 l)$, $C = \dot{Z}_c^{-1} sh(\gamma_0 l)$, $D = ch(\gamma_0 l)$ співвідношення (1), набуде вигляду:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A \dot{U}_2 + \sqrt{3} B \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} C \dot{U}_2 + D \dot{I}_2. \end{cases} \quad (2)$$

Для лінії довжиною, меншою за 300 км, ураховуючи, що $ch(\gamma_0 l) \approx 1$, а $sh(\gamma_0 l) \approx \gamma_0 l$ (тобто $A \approx 1$, $D \approx 1$, $B \approx \dot{Z}_c \gamma_0 l = (r_0 + jx_0)l = \dot{Z}_e$, $C \approx \dot{Z}_c^{-1} \gamma_0 l = (g_0 + jb_0)l = \dot{Y}_e$), рівняння (2) набуде вигляду

$$\begin{cases} \dot{U}_1 \approx \dot{U}_2 + \sqrt{3} \dot{Z}_e \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{Y}_e \dot{U}_2 + \dot{I}_2. \end{cases} \quad (3)$$

Зіставляючи вирази (2) та (3), бачимо подібність співвідношень параметрів для моделей довгих ЛЕП і заступних схем із зосередженими параметрами, що буде використано далі для формування моделей нормальних режимів ЕС у вигляді систем рівнянь за методом вузлових напруг та контурних струмів [4] у матричній формі та виявлення сутності матриць, що входять до їхнього складу.

Формування математичної моделі нормальних режимів електричної системи з довгими ЛЕП за методом вузлових напруг

Програмні засоби, що використовуються для відтворення параметрів поточних та перспективних режимів ЕС в автоматизованих системах диспетчерського керування, найчастіше використовують алгоритми, побудовані на розв'язанні систем нелінійних рівнянь нормальних режимів ЕС, складених за методом вузлових напруг та контурних струмів. Ці рівняння в матричному вигляді застосовують також для розроблення методів та алгоритмів аналізу взаємовпливу електричних мереж ЕС [2], оцінювання неоптимальності нормальних режимів ЕС та формування керувальних впливів, або законів оптимального керування [7]. Отже, отримавши описи зазначених вище математичних моделей з урахуванням хвильових властивостей довгих ЛЕП (за рахунок ідентифікації матричних параметрів, що входять до їхнього складу), стає можливим розроблення якісно нових, комбінованих моделей нормальних режимів ЕС та умов їхньої оптимальності. Останні, несуттєво відрізняючись за формою від відомих, будуть більш адекватними, оскільки враховують якісно нові параметри та характеристики досліджуваного об'єкта.

Систему рівнянь усталеного режиму ЕМ у матричній формі можна подати так [4]:

$$[\mathbf{M}\mathbf{Z}_e^{-1}\mathbf{M}^T + \mathbf{Y}_e]\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{J}, \quad (4)$$

де \mathbf{M} , \mathbf{M}^T – матриця з'єднань віток заступної схеми ЕМ у її вузлах, відповідно, пряма та транспонована [4]; \mathbf{Z}_e , \mathbf{Y}_e – діагональні матриці, відповідно, комплексних поздовжніх опорів віток заступної схеми ЕМ та поперечних провідностей цих віток, приведені до вузлів; $\dot{\mathbf{U}}$, \mathbf{J} – відповідно, напруги у вузлах та задавальні струми заступної схеми ЕМ.

Для формування математичної моделі усталеного режиму ЕМ з урахуванням довгих ЛЕП як пасивних чотириполісників використовуємо аналогію між виразами (2) та (3). Спад напруги в окремій ЛЕП, відповідно, з зосередженими та розподіленими параметрами

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \sqrt{3}\dot{Z}_e \dot{I}_2; \quad \Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - A\dot{U}_2 = \sqrt{3}B\dot{I}_2. \quad (5)$$

Для запису вектора спадів напруги в сукупності ліній електропередачі заступної схеми ЕМ використовують транспоновану матрицю з'єднань \mathbf{M}^T [8]: $\mathbf{M}^T\dot{\mathbf{U}} = \Delta\dot{\mathbf{U}}$. Для заступної схеми, яка описує ЕМ з довгими ЛЕП необхідно врахувати відставання падаючих хвиль напруги, що досягається введенням постійної A . Виходячи з цього, матрицю зв'язків ЛЕП у вузлах ЕМ запишемо:

$$\dot{\mathbf{M}}_A^T = \mathbf{M}^{T+} + \mathbf{A}_\delta \mathbf{M}^{T-}, \quad (6)$$

де \mathbf{M}^{T+} , \mathbf{M}^{T-} – матриці, які формуються заміною, відповідно, від'ємних та додатних елементів транспонованої матриці з'єднань \mathbf{M}^T нулями; \mathbf{A}_δ – діагональна матриця постійних чотириполісника A для віток схеми ЕМ, а вираз для вектора спадів напруг:

$$\dot{\mathbf{M}}_A^T \dot{\mathbf{U}} = \Delta\dot{\mathbf{U}}. \quad (7)$$

На відміну від \mathbf{M}^T , матриця $\dot{\mathbf{M}}_A^T$ є комплексною.

Для заступної схеми із зосередженими параметрами вектор спадів напруг у вітках може бути виражений через фазні струми $\dot{\mathbf{I}}_e$ в них так [8]: $\Delta\dot{\mathbf{U}} = \sqrt{3}\dot{\mathbf{Z}}_e \dot{\mathbf{I}}_e$. З урахуванням (5), можна провести аналогію між діагональними матрицями опорів віток схеми $\dot{\mathbf{Z}}_e$ та постійних чотириполісника \mathbf{B}_δ . Тоді (5) в матричній формі для сукупності віток заступної схеми ЕМ:

$$\Delta\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{M}}_A^T \dot{\mathbf{U}} = \sqrt{3}\mathbf{B}_\delta \dot{\mathbf{I}}_e^k, \quad (8)$$

де $\dot{\mathbf{I}}_e^k$ – вектор струмів по кінцях віток заступної схеми (згідно із заданим матрицею \mathbf{M}

їхньому напрямку). Вираз (8) має фізичний зміст закону Ома у матричній формі для заступної схеми ЕМ з розподіленими параметрами. У подальших матричних виразах для однозначності будуть фігурувати вектори струмів $\dot{\mathbf{I}}_g^k$ (за необхідності значення струмів на початку кожної вітки можуть бути розраховані за другим рівнянням з системи (2)).

Взявши до уваги, що згідно з (2) $\dot{I}_1 - A\dot{I}_2 = C\dot{U}_2/\sqrt{3}$ (оскільки $A = D$) та ввівши поняття матриці зв'язків $\dot{\mathbf{M}}_A$, що визначається як:

$$\dot{\mathbf{M}}_A = \mathbf{M}^+ \mathbf{A}_\partial + \mathbf{M}^-, \quad (9)$$

де \mathbf{M}^+ , \mathbf{M}^- – матриці, які формуються заміною, відповідно, від'ємних або додатних елементів першої матриці з'єднань \mathbf{M} нулями, перший закон Кірхгофа для заступної схеми з розподіленими параметрами за умови відсутності поперечних параметрів ($C_{ij} = 0$) або врахуванні їх у векторі задавальних струмів, запишемо так:

$$\dot{\mathbf{M}}_A \dot{\mathbf{I}}_g^k = \mathbf{J}. \quad (10)$$

Якщо ($C_{ij} \neq 0$), тобто за умови, що заступна схема містить вітки з поперечними параметрами, перший закон Кірхгофа можна записати так:

$$\dot{\mathbf{M}}_A \dot{\mathbf{I}}_g^k - \mathbf{C}_k \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{J}, \quad (11)$$

де $\mathbf{C}_k = \mathbf{M}^+ \mathbf{C}_\partial \mathbf{M}^{T-}$ – матриця постійних чотиріполюсника C у вітках заступної схеми.

Отже, за відсутності поперечних провідностей, систему рівнянь електричної мережі за методом вузлових напруг [4, 8] можна записати

$$\dot{\mathbf{M}}_A \mathbf{B}_\partial^{-1} \dot{\mathbf{M}}_A^T \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{J}, \quad (12)$$

де $\dot{\mathbf{M}}_A \mathbf{B}_\partial^{-1} \dot{\mathbf{M}}_A^T = \dot{\mathbf{Y}}$ – матриця вузлових провідностей. Якщо у заступній схемі представлено вітки з поперечними провідностями, то у вузлові рівняння вводять складник $\mathbf{C}_k \dot{\mathbf{U}}$:

$$\left[\dot{\mathbf{M}}_A \mathbf{B}_\partial^{-1} \dot{\mathbf{M}}_A^T - \mathbf{C}_k \right] \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{J}, \quad (13)$$

де $\dot{\mathbf{M}}_A \mathbf{B}_\partial^{-1} \dot{\mathbf{M}}_A^T - \mathbf{C}_k = \dot{\mathbf{Y}}_n$ – матриця вузлових провідностей, яка враховує поперечні провідності ліній із зосередженими та розподіленими параметрами. Отримане матричне рівняння за структурою цілком відповідає рівнянню (4), що зумовлює можливість поєднання в одній системі описів елементів із зосередженими (трансформатори, ЛЕП довжиною до 200 км тощо) і розподіленими параметрами.

Математична модель нормальних режимів електричної системи з довгими ЛЕП за методом контурних струмів

З першого рівняння системи (2) запишемо вирази для напруги на початку та в кінці довгої ЛЕП:

$$\dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + \sqrt{3} B \dot{I}_2; \quad \dot{U}_2 = \frac{1}{A} \dot{U}_1 - \sqrt{3} \frac{B}{A} \dot{I}_2. \quad (14)$$

З урахуванням (14), для контуру, утвореного вітками з розподіленими параметрами (рис. 1), вираз, що пов'язує напругу базисного вузла зі струмовими навантаженнями віток запишемо так:

$$\dot{U}_B = \left(\left(\frac{1}{A_{B1}} \dot{U}_B - \sqrt{3} \frac{B_{B1}}{A_{B1}} \dot{I}_{B1}^k \right) \frac{1}{A_{12}} - \sqrt{3} \frac{B_{12}}{A_{12}} \dot{I}_{12}^k \right) A_{B2} + \sqrt{3} B_{B2} \dot{I}_{B2}^k. \quad (15)$$

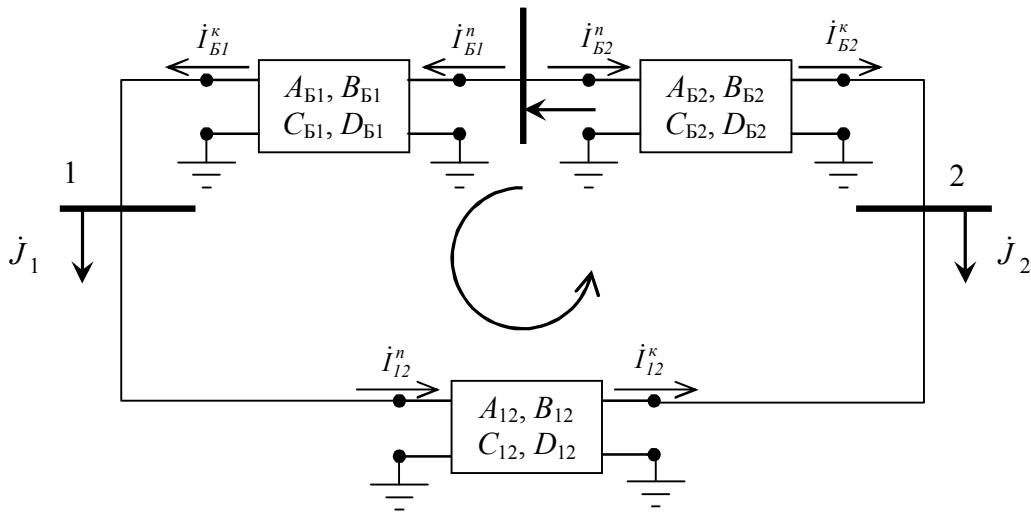


Рис. 1. Приклад заступної схеми замкнутого контуру, утвореного довгими ЛЕП

Виразивши з (15) \dot{U}_B , отримаємо:

$$\dot{U}_B \left(1 - \frac{1}{A_{B1}} \frac{1}{A_{12}} A_{B2} \right) = -\sqrt{3} \dot{I}_{B1}^k B_{B1} \left(\frac{1}{A_{B1}} \frac{1}{A_{12}} A_{B2} \right) - \sqrt{3} \dot{I}_{12}^k B_{12} \left(\frac{1}{A_{12}} A_{B2} \right) + \sqrt{3} \dot{I}_{B2}^k B_{B2}.$$

Після спрощення та узагальнення на довільну кількість віток з розподіленими параметрами у замкнутому контурі враховуючи, що $B_{ij} \dot{I}_{ij}^k$ являє собою спад напруги у вітці $i-j$:

$$\dot{U}_B \left(1 - \prod_{i \in S} A_i^\mu \right) = -\sqrt{3} \sum_{j \in S^+} \left[\dot{I}_{j}^k B_j \prod_{\substack{i \in S \\ i \geq j}} A_i^\mu \right] + \sqrt{3} \sum_{j \in S^-} \left[\dot{I}_{j}^k B_j \prod_{\substack{i \in S \\ i > j}} A_i^\mu \right], \quad (16)$$

де S, S^+, S^- – відповідно, множини віток, що входять до контуру, входять і збігаються за напрямком з напрямком обходу контуру, входять і не збігаються за напрямком з напрямком обходу контуру; μ – знакова функція: $\mu = -1$ для віток, що належать до множини S^+ , $\mu = 1$ для віток, що належать до множини S^- . За фізичним змістом (16) описує контурну е.р.с., що утворюється за рахунок неоднорідності коефіцієнтів розповсюдження хвилі γ_0 для різних ЛЕП ($A_{ij} \neq \text{const}$) у замкнутому контурі.

Для узагальненого опису другого закону Кірхгофа введемо поняття другої матриці зв'язків заступної схеми з довгими ЛЕП – \dot{N}_A . Розташування нульових елементів цієї матриці відповідає другій матриці з'єднань N [8]. Кожен ненульовий елемент матриці \dot{N}_A визначимо за виразом:

$$\dot{N}_{Aij} = \begin{cases} N_{ij} \prod_{\substack{k \in S_i \\ k \geq n_j}} A_k^\mu, & \text{якщо } N_{ij} > 0; \\ N_{ij} \prod_{\substack{k \in S_i \\ k > n_j}} A_k^\mu, & \text{якщо } N_{ij} < 0, \end{cases} \quad (17)$$

де n_j – номер j -ої вітки в напрямку обходу i -го контуру, починаючи з умовного вузла початку контуру (для системи базисних контурів – базисного вузла); S_i – множина віток i -го контуру.

На відміну від N , матриця \dot{N}_A є комплексною для загального випадку представлення ЛЕП з розподіленими параметрами. Для ЛЕП без втрат ($r_0 = 0, g_0 = 0$) γ_0 можна замінити на α_0 ,

унаслідок чого матриця $\dot{\mathbf{N}}_A$ переходить у дійсну площину. Для коротких ЛЕП за рахунок того, що $A_{ij} \approx 1$, матриця зв'язків $\dot{\mathbf{N}}_A$ перетворюється на другу матрицю з'єднань \mathbf{N} .

Використовуючи введені позначення, другий закон Кірхгофа для заступної схеми ЕС з розподіленими параметрами, враховуючи (16):

$$\dot{\mathbf{E}}_K = \dot{\mathbf{U}}_B \dot{\mathbf{E}}_{K*} = -\sqrt{3} \dot{\mathbf{N}}_A \mathbf{B}_0 \dot{\mathbf{I}}_g^K, \quad (18)$$

де $\dot{\mathbf{E}}_{K*}$ – матриця-вектор контурних е. р. с., поданих у відносних одиницях, кожен елемент якої визначається за виразом $\dot{E}_{K*ij} = 1 - \prod_{i \in S} A_i^\mu$.

Вплив розподілених параметрів довгих ЛЕП на адекватність комп'ютерного моделювання нормальних режимів ЕС

Розроблені математичні моделі було покладено в основу алгоритмічної реалізації розрахунку ustalених режимів електричних систем програмного комплексу «ВТРАТИ». Унаслідок такого вдосконалення комплексу стало можливим виконання порівняльного аналізу результатів комп'ютерного моделювання ustalеного режиму ЕС за таких умов:

- 1) усі елементи ЕС подаються в заступній схемі вітками із зосередженими параметрами;
- 2) довгі ЛЕП подаються в заступній схемі ЕС вітками, зосереджені параметри яких уточнено з використанням поправочних коефіцієнтів [5] (використовується програмний комплекс «ГРАФСНАНЕР»);
- 3) довгі ЛЕП подаються в заступній схемі ЕС пасивними чотириполюсниками.

У якості об'єкта моделювання було використано схему електромереж 110 – 750 кВ Південно-західної електроенергетичної системи, яка містить 32 вузли, 38 віток (з яких 5 – ЛЕП 750 кВ, а 14 – ЛЕП 330 кВ), 10 трансформаторів зв'язку. Результати моделювання втрат потужності для характерного режиму ЕС за описаних вище умов подано в табл. 1.

Таблиця 1

Втрати потужності в електричних мережах 750 – 110 кВ Південно-Західної електроенергетичної системи

Умови розрахунку	Надходження P, МВт	Відпуск P, МВт	Сумарні втрати P, МВт	Втрати в ЛЕП 750-330 кВ, ΔP, МВт	Втрати в ЛЕП 220-35 кВ, ΔP, МВт	Втрати в трансформа- торах, МВт
Зосереджені параметри всіх ЛЕП (1)	7063,1	6962,5	100,6	62,1	17,1	21,4
Уточнення параметрів довгих ЛЕП (2)	7064,3	6962,5	101,8 (+1%)	63,1 (+2%)	17,3 (+1%)	21,4
Розподілені параметри довгих ЛЕП (3)	7065,8	6962,4	103,4 (+3%)	63,3 (+2%)	18,7 (+9%)	21,4

Як видно з табл. 1, якщо не враховувати особливості транспортування електроенергії по довгим ЛЕП, то це призводить до похибок визначення втрат потужності в електричних мережах. Оскільки за рахунок хвильових процесів у довгих ЛЕП відбувається перерозподіл потоків потужності в ЕС, що не враховується заступною схемою із зосередженими параметрами, то похибка визначення втрат є більшою для ЕМ нижчих класів напруги. І якщо похибкою визначення сукупних втрат (1 – 3%) у практичних задачах можна знехтувати, то відхилення розрахункових значень для ЕМ нижчих класів напруги (до 9%) необхідно враховувати, особливо в задачах оптимізації взаємовпливу електромереж. Із результатів розрахунків також видно, що використання поправочних коефіцієнтів для коригування параметрів заступних схем довгих ЛЕП дозволяє уточнити розрахункові втрати в електромережах 750 – 330 кВ. Однак такий підхід не дає можливості врахувати явище перерозподілу потоків потужності в ЕС за рахунок різниці коефіцієнтів розповсюдження хвилі ЛЕП. Унаслідок цього значення втрат в ЕМ нижчих класів напруг в такий спосіб

практично не уточнюють.

Висновки

1. Задача підвищення ефективності процесу транспортування електроенергії електромережами пов'язана з необхідністю постійного моніторингу режимів електричних систем, що на сьогодні, через недостатню спостережність ЕС, неможливе без застосування засобів комп'ютерного моделювання. При цьому адекватність математичних моделей, покладених в основу програмних засобів систем диспетчерського керування, є визначальною для забезпечення якості функціонування останніх.

2. Проведені дослідження дали можливість отримати комплексні математичні моделі усталених режимів електричних систем, що дозволяють поєднувати елементи ЕС, які представлені заступними схемами з розподіленими та зосередженими параметрами без додаткових припущень. Отже, отримані моделі є більш ефективними, порівняно з типовими, оскільки, крім іншого, дозволяють урахувувати особливості транспортування електроенергії довгими ЛЕП без істотного збільшення складності.

3. У результаті моделювання взаємозв'язку між е.р.с. у замкнених контурах довгими ЛЕП та спадами напруги в них, встановлено, що за рахунок неоднорідності коефіцієнтів розповсюдження хвилі таких ліній в контурах можуть виникати зрівнювальні е.р.с. Останні призводять до перерозподілу потоків потужності, який необхідно враховувати в процесі формування та адаптації керувальних впливів для оптимізації нормальних режимів ЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кириленко О. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / О. В. Кириленко, А. В. Праховник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. – Київ. – 2010. – С. 10 – 16.
2. Лежнюк П. Д. Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: проблеми сучасної електротехніки. ч. 7. – 2006. – С. 27 – 30.
3. Веников В. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В. А. Веников, В. Г. Журавлев, Т. А. Филиппова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Жуков Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчета / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.
5. Сулейманов В. М. Электричні мережі та системи / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с.
6. Веников В. А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока / В. А. Веников, Ю. П. Рыжов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
7. Лежнюк П. Д. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 123 с.
8. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей / Н. А. Мельников. – М.: Энергия, 1972. – 232 с.

Кулик Володимир Володимирович – к. т. н., доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: kulik_vv@mail.ru.

Вишневський Святослав Янович – асистент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: slava_vish@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.