

Лежнюк П.Д., д.т.н., проф., Кулик В.В., к.т.н., Бурикін О.Б. асп.

## ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ ВІД ТРАНЗИТНИХ ПЕРЕТОКІВ

### Вступ

Через організаційні зміни в структурі електроенергетики та введення ринкових стосунків між суб'єктами, що займаються виробництвом, передачею та розподілом електроенергії, стало актуальним визначення втрат потужності та електроенергії від транзитних перетоків. Особливо якщо електричні мережі є взаємопов'язаними та об'єднаними в електричну систему. Така постановка задачі передбачає фінансові (комерційні) взаєморозрахунки між власниками електричних мереж за транзити електроенергії та взаємні перетоки потужності лініями електропередачі. Отже необхідно мати методику визначення втрат потужності від транзитних перетоків.

Складність цієї задачі полягає в тому, що втрати потужності залежать від потужностей у вузлах і вітках схеми мережі нелінійно і скористатися методом накладання неможливо. На даний момент в інженерній практиці використовується ряд методів, що дозволяють виконувати розрахунок втрат, як з однозначно заданою інформацією, так і з імовірно-статистичним оцінюванням втрат (регресійний аналіз) [1-4]. Використання даних методів в розподільних радіальних мережах, як правило, призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування втрат електроенергії [5]. Однак, у замкнених та складно-замкнених електричних мережах збільшується вплив режимних факторів, інформація про які практично відсутня на етапі планування. Це може викликати суттєві помилки обліку додаткових технічних втрат електроенергії при відхиленні режиму електричної мережі від планового.

Похибка регресійного аналізу, в окремих випадках [6], з використанням в якості факторів сумарного навантаження системи за наявності значних транзитних перетоків перевищує 30%. Використання регресійних залежностей або нормативних характеристик передбачає виділення факторів, що впливають на втрати електроенергії [5, 7, 8]. Кількість факторів у свою чергу збільшує нелінійність регресійних виразів та підвищує обсяг обчислень з апроксимації коефіцієнтів поліному, що у геометричній прогресії збільшує кількість розрахунків. Зважаючи на постановку задачі кількість факторів регресійної залежності зростає з кількістю транзитних перетоків потужності, що в кінцевому випадку зумовлює неможливість використання імовірно-статистичного оцінювання втрат з прийнятною похибкою.

Дана робота присвячена аналізу задач, які пов'язані з втратами від транзитних перетоків, а також розробленню методу їх розрахунку, оснований на використанні алгоритмів і програм розрахунку усталених режимів ЕЕС. Метод оснований на використанні алгоритмів і програм розрахунку усталених режимів електричних мереж і призначений для використання його для визначення втрат від транзитних перетоків потужності.

### Задачі визначення та керування втратами потужності від транзитних перетоків

Розглянемо випадок, коли потужність з системи А (передавальна система) передається в систему С (приймаюча система) через електричні мережі системи В (транзитна система або транзитер) (рис. 1). Протікаючи мережами системи транзитера ця потужність накладається на внутрішні потоки потужності і викликає додаткові втрати потужності в системі В. Через неоднорідність електричних мереж системи транзитера транзитна потужність спотворює природний поточкорозподіл не тільки в мережах вищої напруги (ВН), але і в мережах нижчої напруги (НН). При чому зміни поточкорозподілу відбуваються таким чином, що зростають сумарні втрати в системі, а також окремо втрати в мережах ВН і НН. В якій з мереж, ВН чи НН, в більшій мірі зростають втрати залежить від значень коефіцієнтів трансформаторів і автотрансформаторів зв'язку.

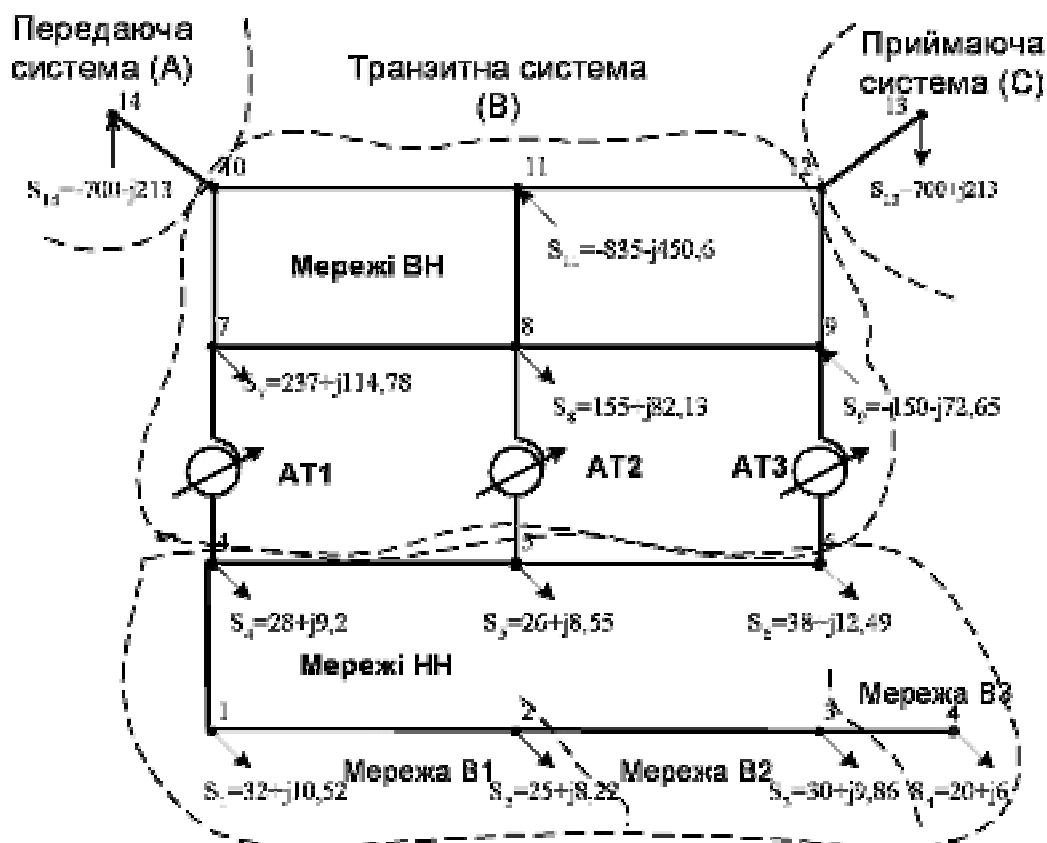


Рис. 1.

В зв'язку з транзитом потужності через систему в ній виникають і можуть розв'язуватися такі задачі.

1. Визначення втрат в системі, викликаних передачею потужності від системи А до С, для того, щоб покрити їх вартість за рахунок указаних систем;

2. Аналіз та оцінка впливу транзитних перетоків на режими, зокрема на втрати, в мережах ВН і НН.

3. Розроблення заходів по оптимізації втрат в мережах ВН і НН. Тут в залежності від умов експлуатації та взаємовідносин між суб'єктами господарювання можливі декілька постановок задачі:

– мінімізація сумарних втрат мережах ВН і НН і визначення оптимальних значень коефіцієнтів трансформаторів і автотрансформаторів зв'язку

$$\min \{ \Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{ВН}} + \Delta P_{\text{НН}} \}.$$

Так, наприклад, при варіюванні коефіцієнту трансформації автотрансформатора зв'язку АТ2 (рис. 2) розв'язанню даної задачі відповідає 11 відпайка даного регульовального пристрою.

– “витіснення” транзитних перетоків з мережі НН у мережу ВН

$$\min \{ \Delta P_{\text{НН}} \}.$$

Така задача може бути актуальною у разі наявності зовнішніх транзитних перетоків потужності. Економічно доцільно здійснювати їх транспорт по електричних мережах вищих напруг, але за рахунок неоднорідності ЕЕС та інших факторів частково завантажуються ними і мережі НН (рис. 3). “Витіснення” транзитних перетоків з електричних мереж нижчих напруг підвищує їх пропускну здатність, що особливо критично у режимах максимальних навантажень (рис. 2).

– “розвантаження” мережі ВН на мережу НН (рис. 2). Ця задача за нормальних стосунків між суб'єктами, що експлуатують електричні мережі енергооб'єднань, не повинна

виникати, але для контролю за ситуацією додаткові втрати від транзитних потоків повинні визначатися.

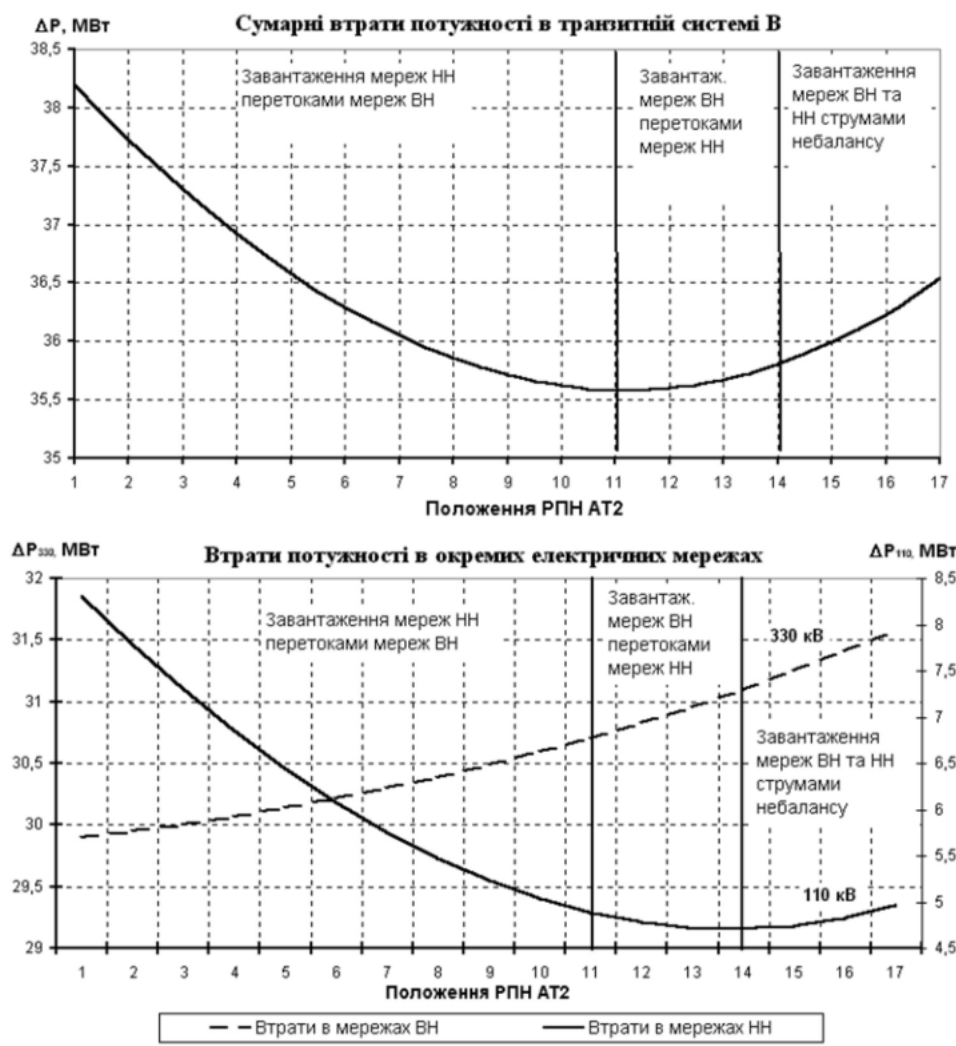


Рис. 2. Перерозподіл втрат потужності між окремими суб'єктами енергооб'єднання

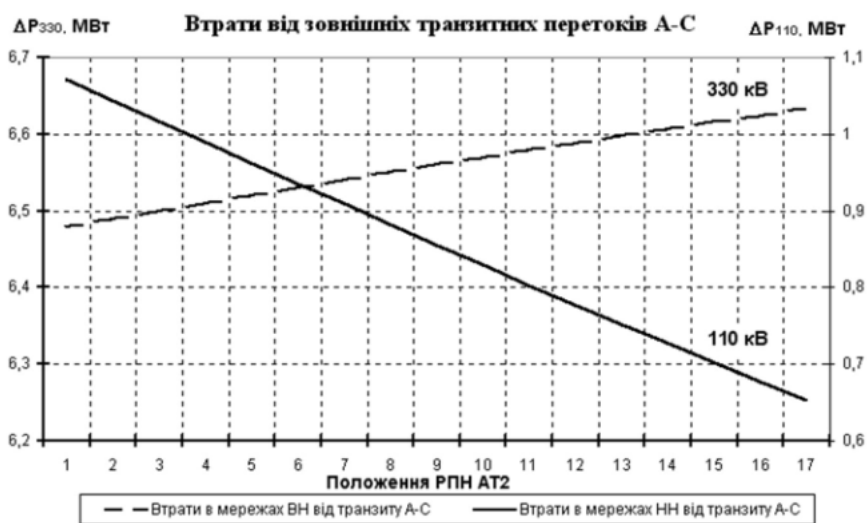


Рис. 3. “Витіснення” зовнішніх транзитних перетоків з електричних мереж нижчої напруги

4. Визначення втрат від наскрізних потоків потужності в радіальній частині мережі НН. Тут можливі два випадки:

- всі втрати відносяться і покриваються енергопостачальною компанією і не діляться між окремими районними мережами;
- втрати визначаються і розподіляються між окремими районними мережами для того, щоб вони пропорційно їх відшкодували.

Розв'язування всіх перерахованих задач вимагає розрахунку значень втрат потужності від протікання транзитної потужності.

#### Втрати потужності у вітках схеми

Значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми визначається за формулою [9]:

$$\dot{S}_B = \sqrt{3} \dot{U}_d M_\Sigma \hat{I}_d, \quad (1)$$

де  $\dot{U}_d$  - діагональна матриця напруг у вузлах включаючи і базисний;  $M_\Sigma$  - матриця з'єднань віток у вузлах включаючи і балансуєчий;  $\hat{I}_d$  - діагональна матриця струмів у вітках схеми (тут і далі знак  $\hat{\phantom{x}}$  означає, що матриця або вектор є спряжений).

Якщо вираз (1) помножити зліва на одиничний транспонований вектор  $n_t$ , то в результаті отримаємо транспонований вектор втрат потужності у вітках схеми:

$$\Delta \dot{S}_{вт} = \sqrt{3} n_t \dot{U}_d M_\Sigma \hat{I}_d$$

або з врахуванням того, що  $n_t \dot{U}_d = \dot{U}_t$ ,

$$\Delta \dot{S}_{вт} = \sqrt{3} \dot{U}_t M_\Sigma \hat{I}_d, \quad (2)$$

де  $\dot{U}_t$  - транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і базисний.

З (2) видно, що втрати в  $i$ -й вітці схеми визначаються:

$$\Delta \dot{S}_{vi} = \sqrt{3} (\dot{U}_t M_{\Sigma i}) \hat{I}_i, \quad (3)$$

де  $M_{\Sigma i}$  - вектор-стовпець матриці інцидентій;  $\hat{I}_i$  - струм в  $i$ -й вітці, який може бути визначений через струми у вузлах

$$\hat{I}_i = \hat{C}_i \hat{J},$$

де  $\hat{C}_i$  -  $i$ -й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах  $\hat{J}$  по вітках схеми.

Підставивши останній вираз у (3), отримаємо:

$$\Delta \dot{S}_{vi} = \sqrt{3} (\dot{U}_t M_{\Sigma i}) \hat{C}_i \hat{J}. \quad (4)$$

З врахуванням того, що

$$\hat{J} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{U}_d^{-1} \dot{S},$$

(4) можна переписати:

$$\Delta \dot{S}_{vi} = (\dot{U}_t M_{\Sigma i}) \hat{C}_i \dot{U}_d^{-1} \dot{S}. \quad (5)$$

Позначимо в (5)

$$\dot{T}_i = (\dot{U}_t M_{\Sigma i}) \hat{C}_i \dot{U}_d^{-1}. \quad (6)$$

Вектор-рядок  $\dot{T}_i$  складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах в  $i$ -й вітці складає протікання потужності по ній до кожного вузла.

На підставі (5) і (6) можна записати:

$$\Delta \dot{S}_B = \dot{T} \dot{S}, \quad (7)$$

де  $\Delta \dot{S}_B$  - вектор сумарних втрат у вітках схеми;  $\dot{T}$  - матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми в залежності від потужності у вузлах схеми, кожний рядок якої складається з (6).

Зауважимо, що коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів схеми, які за певних допущень можна вважати постійними, а також від значень напруги у вузлах, які визначаються навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Таким чином нелінійність залежності втрат від параметрів режиму зберігається. Визначення коефіцієнтів матриці  $\dot{T}$  через поточні значення вузлових напруг по суті означає лінеаризацію режиму електричної мережі при зафіксованих потужностях у вузлах.

За допомогою розрахованої матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності можна для заданої частини електричної мережі визначити втрати потужності від навантаження одного вузла або групи вузлів, які належать іншій частині мережі. На цій підставі може бути побудований алгоритм визначення втрат потужності в електричній мережі від транзитних перетоків.

### Визначення транзитних втрат потужності методом накладання

Розрахунок транзитних втрат може також виконуватись методом прямих розрахунків [8, 10], що передбачає аналіз електричних режимів ЕЕС-транзитера, що виконує через свої мережі транзит електричної енергії. Аналіз виконується на основі розрахункової схеми електричних мереж та даних про режимні параметри вузлів генерування та споживання. Даний метод є найбільш точним серед відомих [10, 11], однак передбачає проведення  $n+1$  розрахунків усталених режимів, по кількості суб'єктів енергоринку  $n$ . Використання даного підходу передбачає застосування методу накладання для розрахунку втрат потужності від кожної ЕЕС. Втрати від транзитних перетоків потужності визначаються шляхом співставлення втрат потужності від часткових потокорозподілів, зумовлених навантаженнями окремих суб'єктів енергоринку. Це вносить значну похибку в результати розрахунків, оскільки для виконання законів електротехніки використовується припущення про відсутність спаду напруги в лініях електропередач (ЛЕП) [10, 11].

Відмовитись від використання даного припущення можна, якщо скористатися можливістю переходу до лінеаризованої моделі нормального режиму ЕЕС. Розглянувши режим роботи ЕЕС в довільний момент часу, за відомих потужностей вузлів ЕЕС  $\dot{S}_i$  та напруг у вузлах  $\dot{U}_i$  можна визначити задаючі струми вузлів:

$$\dot{J}_i = \frac{\hat{S}_{Pi}}{\sqrt{3}\dot{U}_i}.$$

де  $\hat{S}_{Pi}$  – розрахункова потужність навантаження (генерації), що враховує власну потужність навантаження (генерації)  $\dot{S}_i$ , а також зарядну потужність та втрати на корону в суміжних лініях. Лінеаризована модель нормального режиму, що отримана за рахунок представлення навантаження та генерації вузлів ЕЕС у вигляді розрахованих задаючих струмів, буде цілком еквівалентна початковій нелінійній моделі для даного моменту часу [12].

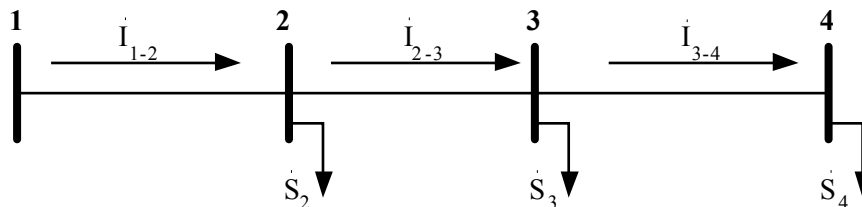
Розглянемо найпростішу схему електричної мережі, що виконує транзит електроенергії (рис. 4). Навантаження вузлів електричної мережі задається постійним за модулем та фазою струмом. Поперечна складова заступної схеми ЛЕП еквівалентується у розрахункових навантаженнях вузлів.

Згідно з методом накладання через лінію 1-2 (рис. 4,б) будуть протікати узгоджено спрямовані струми  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$ , та  $\dot{I}_3$  часткових струморозподілів, що зумовлені навантаженням окремих суб'єктів енергоринку (споживачів):  $\dot{I}_1 = \dot{J}_2$ ,  $\dot{I}_2 = \dot{J}_3$ ,  $\dot{I}_3 = \dot{J}_4$ . Отже втрати потужності у даній ЛЕП:

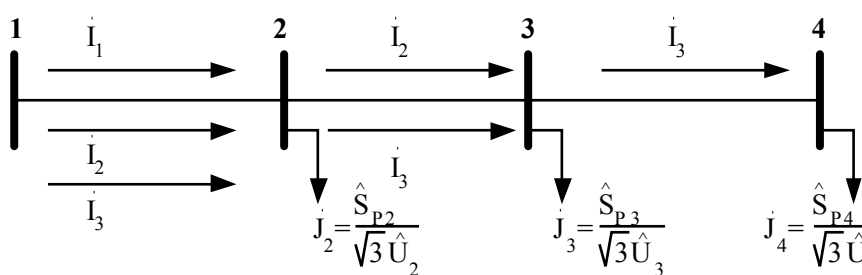
$$\Delta \dot{S}_{1-2} = 3 \cdot |\dot{I}_{1-2}|^2 \cdot \dot{Z}_{1-2} = 3 \cdot |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|^2 \cdot \dot{Z}_{1-2},$$

або використовуючи дійсні  $I'$  та уявні  $I''$  складові струмів:

$$\Delta \dot{S}_{1-2} = 3 \cdot \left[ (I'_1 + I'_2 + I'_3)^2 + (I''_1 + I''_2 + I''_3)^2 \right] \cdot \dot{Z}_{1-2}.$$



а)



б)

Рис. 4. Схема найпростішого випадку наскрізного транзиту потужності

Виконавши ряд алгебраїчних перетворень, даний вираз можна звести до такого вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_{1-2} = 3 \cdot & \left[ I_1'^2 \left( 1 + \frac{I_2' + I_3'}{I_1'} \right) + I_2'^2 \left( 1 + \frac{I_1' + I_3'}{I_2'} \right) + I_3'^2 \left( 1 + \frac{I_2' + I_1'}{I_3'} \right) + \right. \\ & \left. + I_1''^2 \left( 1 + \frac{I_2'' + I_3''}{I_1''} \right) + I_2''^2 \left( 1 + \frac{I_1'' + I_3''}{I_2''} \right) + I_3''^2 \left( 1 + \frac{I_2'' + I_1''}{I_3''} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{1-2}, \end{aligned} \quad (8)$$

або для кожного часткового струморозподілу:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_{1-2(i_1)} &= 3 \cdot \left[ I_1'^2 \cdot \left( 1 + \frac{I_2' + I_3'}{I_1'} \right) + I_1''^2 \cdot \left( 1 + \frac{I_2'' + I_3''}{I_1''} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{1-2}; \\ \Delta \dot{S}_{1-2(i_2)} &= 3 \cdot \left[ I_2'^2 \cdot \left( 1 + \frac{I_1' + I_3'}{I_2'} \right) + I_2''^2 \cdot \left( 1 + \frac{I_1'' + I_3''}{I_2''} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{1-2}; \\ \Delta \dot{S}_{1-2(i_3)} &= 3 \cdot \left[ I_3'^2 \cdot \left( 1 + \frac{I_2' + I_1'}{I_3'} \right) + I_3''^2 \cdot \left( 1 + \frac{I_2'' + I_1''}{I_3''} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{1-2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Вирази (9) можна узагальнити на довільну кількість часткових струмів, що відповідають передачі електроенергії до окремих суб'єктів енергоринку. Вираз втрат потужності в  $i$ -й вітці електричної мережі від струмів  $k$ -го часткового струморозподілу (зумовленого навантаженнями  $k$ -го суб'єкту енергоринку) матиме наступний вигляд:

$$\Delta \dot{S}_{i(I_k)} = 3 \cdot \left[ I_k'^2 \left( 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{I_j'}{I_k'} \right) + I_i''^2 \left( 1 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{I_j''}{I_k''} \right) \right] \cdot \dot{Z}_i \quad (10)$$

де  $n$  – кількість часткових струморозподілів, що протікають по лінії;  $i, j$  – номер часткового струму.

З (10) видно, що втрати потужності в поздовжній частині  $i$ -ї лінії електропередач від  $k$ -го часткового струму  $\dot{I}_k$  визначаються не тільки його складовими, але і складовими часткових струмів, що зумовлені навантаженнями інших суб'єктів. Величину даного впливу можна охарактеризувати коефіцієнтами взаємовпливу:

$$\mu_i'(I_k) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{I_j'}{I_k'}; \quad \mu_i''(I_k) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \frac{I_j''}{I_k''}. \quad (11)$$

Вказані коефіцієнти можуть приймати довільні значення в залежності від величини та напрямку часткових струмів, що протікають у  $i$ -ій ЛЕП. Нульові значення відповідають відсутності у даній вітці часткових струмів крім  $\dot{I}_k$ .

З урахуванням (11) вираз для визначення втрат потужності у  $i$ -ій вітці ЕМ від  $k$ -го струморозподілу може бути переписаний у такому вигляді:

$$\Delta \dot{S}_i(I_k) = 3 \cdot \left[ I_k'^2 (1 + \mu_i'(I_k)) + I_k''^2 (1 + \mu_i''(I_k)) \right] \cdot \dot{Z}_i. \quad (12)$$

Використовуючи (12) втрати в  $j$ -й електроенергетичній системі від навантажень  $k$ -ї визначаються, як сума втрат по кожній вітці  $j$ -ї ЕЕС від струмів  $k$ -го часткового струморозподілу (струмових навантажень  $k$ -ї ЕЕС)

$$\Delta \dot{S}_j(\dot{I}_k)_\Sigma = \sum_{i \in M_j} \Delta \dot{S}_i(\dot{I}_k) \quad (13)$$

де  $M_j$  – множина віток  $j$ -ї електроенергетичної системи.

Вираз (13) використовується для визначення частки втрат окремої ЕЕС від власних навантажень, навантажень інших ЕЕС, і як окремий випадок, транзитних перетоків потужності, у абсолютних одиницях.

Розподіл втрат потужності, згідно з останнім виразом, може застосовуватись для розрахунку транзитних втрат, як у фрагментованих електричних мережах обласних енергостачальних компаній, так і регіональних суб'єктів оптового ринку електроенергії.

Сумарні втрати в об'єднаній електроенергетичній системі визначаються по формулі:

$$\Delta \dot{S} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \Delta \dot{S}_j(\dot{I}_k)_\Sigma \quad (14)$$

Запропонований метод може бути використано для інформаційного забезпечення взаєморозрахунків між власниками ЕЕС за транзити електроенергії та взаємні перетоки потужності між різними ЕЕС. Беручи до уваги формулу (13) можна визначити необхідну компенсацію  $j$ -ї енергосистемі від навантажень  $k$ -ї ЕЕС:

$$\Delta \dot{S}_j^k = \Delta \dot{S}_j(\dot{I}_k)_\Sigma - \Delta \dot{S}_k(\dot{I}_j)_\Sigma \quad (15)$$

Отже, на базі даної методики може бути представлена кількісна оцінка того, в якій мірі постачання певного споживача здійснюється за рахунок перетоків від суміжних ЕЕС, трансформацією з інших класів напруги, власною генерацією в мережах даного класу напруги та ін.

Для прикладу розглянемо магістральну мережу (рис.4). Слід зазначити, що тут наведено найбільш простий приклад для ілюстрації розробленого методу та його аналітичної перевірки.

Припустимо, що мережа, яка аналізується включає в себе мережі трьох районних підприємств – “В1”, “В2”, “В3”. Мережа “В1” включає в себе вузли 1, 2 та лінію 1-2. Мережі “В2” та “В3” включають у себе по одному вузлу 3 та 4, і по одній лінії 2-3 та 3-4 відповідно. Позначимо навантаження споживачів кожного підприємства, як вказано на рис.5, та задамося їх розрахунковими струмовими навантаженнями (які визначаються з результатів розрахунку базового усталеного режиму ЕЕС):  $\dot{J}_2 = 0,105 - j0,158$  кА;  $\dot{J}_3 = 0,16 - j0,213$  кА;  $\dot{J}_4 = 0,215 - j0,269$  кА. Задамо також параметри ЛЕП:  $\dot{Z}_{1-2} = 0,27 + j0,391$  Ом;  $\dot{Z}_{2-3} = 0,54 + j0,782$  Ом;  $\dot{Z}_{3-4} = 0,81 + j1,173$  Ом.

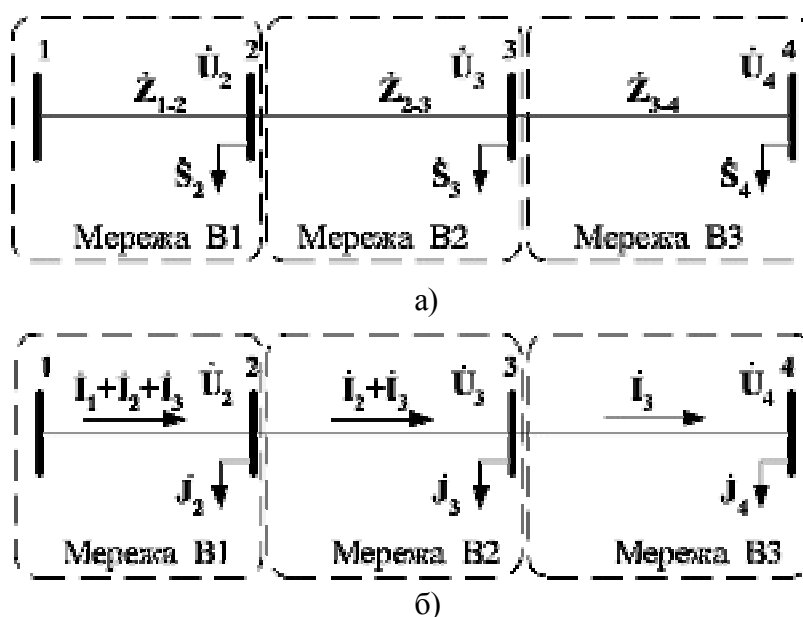


Рис.5. Районні електричні мережі В1, В2, В3

Виконаємо розрахунок часткових струмів та втрат потужності в електричних мережах (табл. 1).

Таблиця 1

	Мережа В1	Мережа В2	Мережа В3
<b>Втрати при фактичних значеннях навантажень для кожної електричної мережі</b>	<b>0,518+0,748j</b>	<b>0,602+0,870j</b>	<b>0,287+0,415j</b>
Часткові струми у режимі транзиту для "В1" ( $J_3=J_4=0$ )	0,105-0,158j	0	0
Часткові струми у режимі транзиту для "В2" ( $J_2=J_4=0$ )	0,16-0,213j	0,16-0,213j	0
Часткові струми у режимі транзиту для "В3" ( $J_2=J_3=0$ )	0,215-0,269j	0,215-0,269j	0,215-0,269j
<b>Сума струмів мережі від власних навантажень та навантажень інших мереж</b>	<b>0,48-0,64j</b>	<b>0,375-0,482j</b>	<b>0,215-0,269j</b>
Втрати в мережах від навантажень мережі В1	0,123+0,178j	0	0
Втрати в мережах від навантажень мережі В2	0,172+0,25j	0,263+0,381j	0
Втрати в мережах від навантажень мережі В3	0,223+0,322j	0,34+0,492j	0,287+0,416j
<b>Сумарні втрати по електричних мережах</b>	<b>0,518+0,75j</b>	<b>0,603+0,873j</b>	<b>0,287+0,416j</b>

Втрати при фактичних значеннях навантажень електричних мереж отримано за допомогою системи “ГрафАКМЭС”, що розроблена Головним Інформаційно-



обчислювальним Центром (ГІВЦ) Національної енергетичної компанії Укренерго (НЕК “Укренерго”). Використані значення розрахункових струмових навантажень відповідають потужностям навантаження:  $\dot{P}_2=25+j8.22$  (МВА);  $\dot{P}_3=30+j9.86$  (МВА);  $\dot{P}_4=20+j6$  (МВА).

### Розрахунок транзитних втрат потужності для електричних мереж різних класів напруги

В електричних мережах різних класів напруги джерелами струмів та перетоків потужностей виступають не тільки споживачі та джерела електроенергії, пристрої поперечної компенсації та ємнісна генерація ліній але й е.р.с.  $\dot{E}_{нб}$  (рис. 6), що виникають в замкнених контурах за рахунок незбалансованих коефіцієнтів трансформації. Струми небалансу  $\dot{I}_{нб}$  від вказаних е.р.с. впливають на струморозподіл у всіх часткових режимах і можуть бути виділені шляхом розрахунку струморозподілу в електричних мережах без урахування інших джерел струмів, тобто розрахункових навантажень (рис. 6).

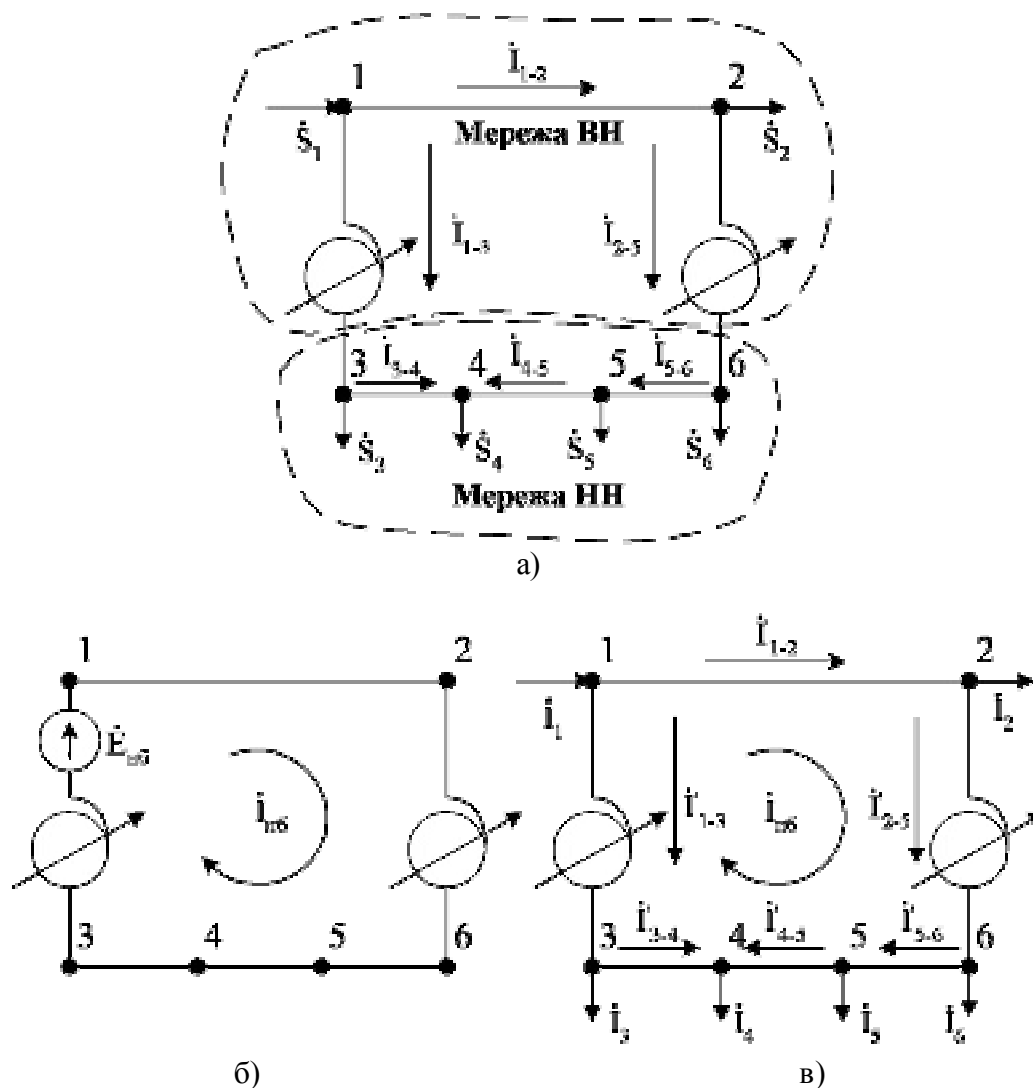


Рис.6. Перетворення під час розрахунків електричних мереж різних класів напруги

Припустимо, що мережа, яка аналізується включає в себе мережі двох суб'єктів – мережі ВН та мережі НН. Мережа ВН включає в себе вузли 1, 2, лінію 1-2 та два автотрансформатори типу АТДЦТН-125000/330/110. Мережа НН включає у себе вузли 3, 4, 5 та 6, а також лінії 3-4, 4-5 та 5-6. Розрахункові струмові навантаження, що отримані з розрахунку базового усталеного режиму становлять:

$\dot{J}_2 = 0,176 - j0,074$  кА;  $\dot{J}_3 = 0,125 - j0,048$  кА;  $\dot{J}_4 = 0,255 - j0,145$  кА ;  
 $\dot{J}_5 = 0,155 - j0,060$  кА;  $\dot{J}_6 = 0,102 - j0,035$  кА ,  
 параметри ЛЕП:  $\dot{Z}_{1-2} = 2,7 + j3,91$  Ом;  $\dot{Z}_{3-4} = 5,4 + j7,82$  Ом;  
 $\dot{Z}_{4-5} = 5,4 + j7,82$  Ом;  $\dot{Z}_{5-6} = 5,4 + j7,82$  Ом.

В результаті розрахунку втрат потужності для окремих суб'єктів маємо (табл. 2).

Таблиця 2

	Мережа ВН	Мережа НН
Втрати при фактичних значеннях навантажень електричних мереж	<b>0,9+10,4j</b>	<b>1,8+2,6j</b>
Втрати в мережах від навантажень мережі ВН	0,086+0,544j	0,002+0,002j
Втрати в мережах від навантажень мережі НН	0,115+8,541j	1,729+2,503j
Втрати в мережах від зрівнювальних струмів	-0,003+0,161j	0,065+0,094j
Втрати холостого ходу	0,690+1,125j	0
Сумарні втрати по електричних мережах	<b>0,9+10,4j</b>	<b>1,8+2,6j</b>

Використані значення струмових навантажень відповідають навантаженням, що задано у потужностях:  $\dot{P}_2=100+j42.6$  (МВА);  $\dot{P}_3=25+j8.22$  (МВА);  $\dot{P}_4=50+j24.21$  (МВА);  $\dot{P}_5=30+j9.86$  (МВА);  $\dot{P}_6=20+j6$  (МВА).

### Алгоритм визначення втрат потужності від взаємовпливу електричних мереж енергосистем

В сучасній практиці оперативних розрахунків розрахунок усталених режимів ЕЕС виконується із заданням навантаження вузлів ЕЕС еквівалентною потужністю споживання [6]. Враховуючи даний факт та спираючись на викладене вище пропонується наступний алгоритм розрахунку транзитних втрат за наявності кількох (n) суб'єктів енергоринку:

1. Виконується базовий розрахунок усталеного режиму об'єднаної ЕЕС та втрат потужності в ній за фактичних значень потужностей навантажень всіх n енергетичних компаній;
2. Визначаються розрахункові струмові навантаження всіх вузлів електричної мережі  $\mathbf{J}_i$  (лінеаризація);
3. Видаляються поперечні вітки заступної схеми елементів електричної мережі, оскільки вони враховуються у струмових навантаженнях вузлів;
4. Розраховується режим за відсутності струмових навантажень з метою визначення струмів небалансу у контурах ЕЕС, що зумовлені незбалансованими коефіцієнтами трансформації;
5. Розраховується n часткових режимів (по кількості енергетичних компаній); для k-го режиму задаються розрахункові струмові навантаження лише k-ї компанії;
6. Визначаються часткові струми у вітках об'єднаної ЕЕС та втрати від них за виразом (12);
7. Визначаються фактичні втрати потужності для кожної енергетичної компанії за виразами (13, 14) від власних навантажень та навантажень інших учасників енергообміну;
8. Визначаються величини втрат потужності, що мають бути скомпенсовані енергосистемам транзитерам від інших енергосистем за виразом (15).

Наведений алгоритм дозволяє, на основі розробленого методу, визначати втрати потужності від взаємовпливу електричних мереж різних класів напруг, виконувати аналіз та оцінку впливу транзитних перетоків на режими роботи електричних мереж суб'єктів енергоринку. Розроблена методика визначення втрат потужності для різних суб'єктів енергоо-

бміну була покладена в основу програми оцінки взаємовпливу ЕЕС, результати роботи якої для прикладу ЕЕС 330-110 кВ (рис. 1) подано на рис. 7.

Результати розрахунків всієї мережі				
Загальна інформація   Інформація про вузли   Інформація про вітки   Інформація про мережі				
Втрати, МВА	в ЕЕС "Передаюча (А)"	в ЕЕС "Приймаюча (С)"	в ЕЕС "(В) Мережі ВН"	в ЕЕС "(В) Мережі НН"
від ЕЕС "Передаюча (А)"	5.773+39.447j	0	6.560+36.725j	0.855+1.239j
від ЕЕС "Приймаюча (С)"	0	8.016+54.774j	15.822+89.631j	0.927+1.343j
від ЕЕС "(В) Мережі ВН"	0	0	5.449+34.282j	1.257+1.820j
від ЕЕС "(В) Мережі НН"	0	0	1.620+15.034j	2.190+3.437j
від зр. струмів:	0	0	0	0
Повздовжні:	5.773+39.447j	8.016+54.774j	29.451+175.671j	5.230+7.838j
Холостого ходу:	0	0	1.035+1.688j	0
Сумарні:	5.773+39.447j	8.016+54.774j	30.486+177.358j	5.230+7.838j

Енергосистема "Передаюча (А)" повинна компенсувати:  
 Енергосистемі "(В) Мережі ВН" 6.560 + 36.725j МВА  
 Енергосистемі "(В) Мережі НН" 0.855 + 1.239j МВА

Енергосистема "Приймаюча (С)" повинна компенсувати:  
 Енергосистемі "(В) Мережі ВН" 15.822 + 89.631j МВА  
 Енергосистемі "(В) Мережі НН" 0.927 + 1.343j МВА

Енергосистема "(В) Мережі НН" повинна компенсувати:  
 Енергосистемі "(В) Мережі ВН" 0.363 + 13.213j МВА

Рис. 7. Вікно результатів оцінки взаємовпливу ЕЕС

### Висновки

Визначення втрат потужностей від транзитів електроенергії на основі методу накладання є можливим і дозволяє отримати ряд вагомих переваг:

1. Застосування методу в наведеному варіанті узагальнено на довільну кількість енергетичних компаній та потужностей. Отже є можливість його використання на будь-якому рівні енергетичного виробництва, включаючи обласні та районні електричні мережі;

2. Метод базується на основних поняттях електротехніки та загальноприйнятих методах розрахунку усталеного режиму, що дозволяє з певною мірою стверджувати про його адекватність, зважаючи також на виконане порівняння результатів розрахунку з програмами розрахунку нормальних режимів ЕЕС розробленими та затвердженими НЕК "Укренерго".

### Література

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. Арзамасцев Д.А., Липес А.В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях. Практическое пособие / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1989.
3. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Поспелов Г.Е., Сыч Н.М. Потери мощности и энергии в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1981.

5. Герих В.П., Зотов С.Н., Железко Ю.С., Буравцов В.Н. Методика расчёта транзитных потерь мощности и электроэнергии в сетях субъектов оптового рынка электроэнергии. 2001
6. Идельчик В.И. Расчёты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
7. Манусов В.З., Могиленко А.В. Методы оценивания потерь электроэнергии в условиях неопределённости // Электричество. – 2003. – №3. – С. 2–8.
8. Железко Ю.С., Артемев А.В., Савченко О.В. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. – М: ЭНАС, 2003. - 280 с.
9. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей. – М.: Энергия, 1972. – 232 с.
10. Стогний Б., Павловский В. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний. // Энергетическая политика Украины. – 2004. – №5. – С.26-31
11. Потребич А.А., Катренко Г.Н. Расчёт потерь электроэнергии, возникающих вследствие её транзита между энергокомпаниями // Энергетика и Электрификация. – 2004. – №4. – С. 29–34.
12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. –М.: Высшая школа: 1961. – 792 с.