

УДК 621.311

**В. М. Сулейманов**, канд. техн. наук

**В. А. Баженов**, канд. техн. наук

**Т. Л. Кацадзе**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

## **ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ СИСТЕМОУТВОРЮВАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАДВИСОКОЇ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ**

*У роботі представлені розроблені математичні моделі та методи вибору оптимальних технічних заходів, направлених на зменшення втрат потужності в неоднорідній мережі вищих класів номінальної напруги та покращення техніко-економічних показників роботи енергооб'єднання України. Такі моделі враховують особливості передавання електричної енергії на дальні лінії електропередачі надвисокої номінальної напруги, до яких відносять системоутворюючі магістральні лінії 750 кВ. Розроблені математичні моделі та методи, орієнтовані на визначення оптимальних законів регулювання режиму напруги у вузлових точках мережі ліній, режиму реактивної потужності в лініях з метою мінімізації втрат активної потужності в мережі. Зокрема, розв'язані задачі роздільного та сумісного регулювання напруги та реактивної потужності в мережі дальніх ліній, які мають загальну вузлову точку, у тому числі і з урахуванням можливих наявних обмежень за реактивною потужністю.*

### **Загальна характеристика задач оптимізації робочих режимів електричних систем**

Енергетика України є базовою галуззю національної економіки, найважливішим фактором її розвитку. Очевидно, що стає функціонування та розвиток паливно-енергетичного комплексу визначає долю реформування енергетики та майбутнього України. На перспективу до 2030 р. в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України зберігається стратегія розвитку живлячих електричних мереж, де системоутворюючі функції видачі потужності крупних електричних станцій та забезпечення паралельної роботи з енергетичними системами інших держав, як і раніше, залишається за електричними мережами 330 та 750 кВ при суттєвому зростанні частки мереж надвисокої номінальної напруги.

Для забезпечення сталої роботи ОЕС України, ефективного та повного використання потужностей генеруючої частини ОЕС України, дотримання нормативних умов видачі потужностей Хмельницької, Рівненської та Запорізької атомних електростанцій та регульованих потужностей гідроакumuлюючих станцій, особливо Дністровської, необхідно в наміченій перспективі завершити формування двох транзитних магістралей 750 кВ – так званих південного (Хмельницька АЕС – Дністровська ГАЕС – ПС Приморська – ПС Каховська – Запорізька АЕС із загальною довжиною 1050 км) та північного (Рівненська АЕС – ПС Київська – ПС Північноукраїнська – ПС Харківська – ПС Донбаська із загальною довжиною 1200 км) поясів. Природно, що спорудження зазначених поясів з урахуванням заміни застарілого силового енергетичного обладнання, буде вимагати залучення значних інвестицій в енергетику України.

Проблема оптимізації робочих режимів електричних мереж надвисокої номінальної напруги, на відміну від електричних мереж більш низьких класів напруг, суттєво ускладнюється через дві обставини. По-перше, це необхідність урахування хвильового характеру електромагнітних процесів у передачах такого роду, а по-друге, – необхідність додаткового врахування особливостей процесів регулювання режимів напруги та реактивної потужності у загальних вузлових точках електропередач, які виникають внаслідок розвитку мережі надвисокої номінальної напруги на шинах підстанції 500-750 кВ.

На сьогодні практика моделювання робочих режимів електричних систем, зокрема розв'язання задач оптимізації таких режимів, базується на моделюванні ліній електропередач схемами заміщення із зосередженими параметрами. Це є допустимим при моделюванні ліній електропередачі невеликої довжини до 200-300 км. Але за наявності в електричній системі більш довгих ліній електропередач вимагає застосування спеціальних математичних моделей, які мають враховувати рівномірний розподіл параметрів вздовж довжини таких ліній та хвильові процеси при передаванні по лініях електричної енергії

внаслідок обмеженості швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж ліній електропередач.

Наявність та подальший розвиток розвинутої мережі ліній електропередач 750 кВ в ОЕС України визначає неможливість застосування прийнятих традиційних методів аналізу та оптимізації робочих режимів електричних систем, оскільки застосування таких методів може призводити до істотної, інколи навіть недопустимої похибки отримуваних результатів. Тому традиційні математичні моделі не можуть бути використані в задачах вибору оптимальних режимів ОЕС України.

Електроенергетичні системи мають у своєму складі безліч різних елементів і підсистем та є дуже складними та великими регульованими системами. При цьому функціонування кожної підсистеми, кожного елемента визначається своїм одним або кількома критеріями при множині критеріїв функціонування самої системи.

У загальному випадку, при вирішенні завдання вибору економічно вигідного режиму роботи електропередачі, слід здійснювати багатофакторну оптимізацію режимних параметрів, яка полягає у визначенні найбільш вигідного розподілу активної потужності як між електричними станціями в поєднаних електропередачею енергосистемах, так і між окремими агрегатами на кожній з електростанцій; оптимального розподілу реактивної потужності між її регульованими джерелами; максимального зниження ступеня електричної неоднорідності замкнутої мережі системи; сприятливого режиму напруги у вузлових точках електропередачі [1]. Комплексне рішення цієї задачі є складним і громіздким. Тому в більшості практичних випадків здійснюють оптимізацію режимів роботи електропередачі, орієнтуючись лише на деякі найбільш істотні параметри [2].

У статті розглянуто розв'язання задачі оптимізації режимів напруг та реактивної потужності в системоутворювальній мережі ОЕС України в експлуатаційній постановці задачі, орієнтованій на мінімізацію сумарних втрат активної потужності в мережі.

### **Особливості оптимізації режимів мереж дальніх ліній електропередач, які мають спільну вузлову точку**

Розвиток електричних систем призвів до формування складнозамкнутої електричної мережі надвисокої напруги, що виконує системоутворюючі функції в об'єднаній енергосистемі. У цих умовах задачу вибору оптимального режиму роботи енергооб'єднання необхідно розв'язувати не для кожної лінії окремо, а для всієї електричної мережі надвисокої напруги в цілому. Важливо також враховувати, що з розвитком високовольтних ліній електропередач все більше число їх виявляється пов'язаним у вузлових точках – на шинах підстанцій 500-750 кВ.

Втрати активної потужності в лініях електропередачі зазвичай поділяють на два класи:

1) втрати енергії на іонізацію повітря навколо проводів повітряної лінії (втрати на корону). Такі втрати визначаються робочою напругою та кліматичними умовами в районі траси лінії і мають місце протягом всього періоду, коли лінія знаходиться під напругою;

2) втрати на розсіювання теплової енергії, яка виділяється внаслідок протікання робочих струмів навантаження по фазних проводах лінії. Такі втрати мають місце протягом часу, коли лінія знаходиться під навантаженням.

Для визначення втрат активної потужності в магістральних лініях електропередачі використано математичну модель лінії з розподіленими параметрами, у вигляді пасивного чотириполюсника [3, 4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \underline{D}U_1 - \underline{B}\frac{\dot{S}_1}{U_1}; \\ \dot{I}_2 = -\underline{C}U_1 + \underline{A}\frac{\dot{S}_1}{U_1}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $U_1, U_2, I_1, I_2, S_1, S_2$  – напруга, струм та повна потужність на початку та наприкінці лінії відповідно; індекси «1» та «2» визначають параметри на початку та наприкінці електропередачі;  $A, B, C, D$  – узагальнені сталі еквівалентного чотириполюсника.

Вираз для визначення сумарних втрат активної потужності у всіх лініях електропередачі, суміжних із заданою вузловою точкою, який враховує хвильові параметри дальніх електропередач, має вигляд:

$$\Delta P_{\Sigma} = U^2 \sum_{i=1}^m a_{iU} + \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2) + \sum_{i=1}^m a_{iP} P_i + \sum_{i=1}^m a_{iQ} Q_i, \quad (2)$$

де  $a_{iU}$  – коефіцієнт втрат активної потужності за неробочого ходу  $i$ -ї лінії;  $a_{iI}$  – коефіцієнт втрат активної потужності в режимі навантаження  $i$ -ї електропередачі;  $a_{iP}, a_{iQ}$  – коефіцієнти втрат активної потужності за передачі по  $i$ -й лінії тільки активної та тільки реактивної потужності відповідно.

Коефіцієнти втрат активної потужності за умовами початку лінії визначають за виразами [3, 4]:

$$\begin{aligned} a_U &= C'D' + C''D''; \\ a_I &= A'B' + A''B''; \\ a_P &= -2[B'C' + A''D'']; \\ a_Q &= 2[B''C' - A'D''], \end{aligned}$$

де штрихом позначена дійсна, а двома штрихами – уявна складова узагальнених сталих еквівалентного чотириполюсника моделі лінії електропередач.

Зазначимо, що при заданій постановці задачі всі електропередачі, які відходять від вузлової точки, розглядають як ті, що розраховують за умовами початку.

Метою оптимізації режиму є визначення напруги на шинах вузлової підстанції і потоку реактивної потужності на початку кожної з ліній, які забезпечують мінімум сумарних втрат активної потужності в усіх суміжних лініях. Тут, залежно від вихідних умов, принципово можна виокремити п'ять різних підходів до оптимального регулювання напруги і реактивних потужностей у вузлових точках електричної мережі:

- 1) оптимальне регулювання напруги у вузловій точці за заданих реактивних потужностей в усіх лініях;
- 2) оптимальне регулювання реактивних потужностей в усіх суміжних лініях за фіксованого значення напруги у вузловій точці;
- 3) оптимальне сумісне регулювання режимів напруги та реактивної потужності;
- 4) оптимальне регулювання режиму реактивної потужності у суміжних лініях за фіксованого значення напруги у вузловій точці та наявних обмежень за реактивною потужністю;
- 5) оптимальне сумісне регулювання режимів напруги та реактивної потужності за наявних обмежень за реактивною потужністю.

Нижче розглянуті методологічні підходи до розв'язання таких оптимізаційних задач.

#### **Оптимальне регулювання напруги за фіксованих реактивних потужностей дальніх ліній електропередач, які мають спільну вузлову точку**

Розглянемо задачу оптимального регулювання рівня напруги у вузловій точці при заданих реактивних потужностях в усіх лініях, що відходять від заданої вузлової точки. Зазвичай таку задачу розв'язують у разі, коли у всіх суміжних лініях реактивну потужність можна визначати заданим бажаним коефіцієнтом потужності у всіх можливих режимах електропередачі. Очевидно, що в такій ситуації оптимізації підлягає лише напруга на шинах вузлової підстанції. Її можна визначити, розв'язавши рівняння вигляду  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U = 0$ , де  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U$  – частинна похідна від сумарних втрат потужності за напругою у вузловій точці:

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial U} = 2U \sum_{i=1}^m a_{iU} - \frac{2}{U^3} \sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2) = 0.$$

Звідки оптимальна напруга на шинах опорної вузлової підстанції визначається виразом:

$$U_o = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2)}{\sum_{i=1}^m a_{iU}}}. \quad (3)$$

Аналіз виразу (3) свідчить про те, що оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції визначається параметрами всіх суміжних ліній та їх навантаженнями активною та реактивною потужностями.

### Оптимальне регулювання режиму реактивних потужностей за фіксованої напруги в опорному вузлі

Розглянемо розв'язання задачі оптимального регулювання реактивних потужностей у всіх лініях, що відходять від вузла, за фіксованого значення напруги на шинах вузлової підстанції. Таку задачу зазвичай розв'язують у ситуації, коли вузлова підстанція не обладнана засобами регулювання напруги або коли за наявності таких засобів у процесі ведення режиму електропередачі була досягнута межа регулювання. Отже, оптимізації підлягає тільки режим реактивної потужності у всіх суміжних лініях електропередачі.

Оптимальне значення реактивної потужності, яка супроводжує транзит активної потужності в кожній з ліній, можна визначити на підставі розв'язання низки рівнянь вигляду  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i = 0$ , де  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i$  – частинна похідна від сумарних втрат активної потужності за реактивною потужністю у  $i$ -й лінії. Сумісне розв'язання рівнянь цього типу визначає значення реактивної потужності в кожній із суміжних ліній, які забезпечують мінімум сумарних втрат активної потужності:

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_i} = \frac{2a_{iI}}{U^2} Q_i + a_{iQ} = 0,$$

звідки оптимальне навантаження реактивною потужністю  $i$ -ї лінії визначається виразом:

$$Q_{io} = -U^2 \frac{a_{iQ}}{2a_{iI}}. \quad (4)$$

Аналіз виразу (4) свідчить, що оптимальне значення реактивної потужності  $i$ -ї гілки не залежить від параметрів суміжних ліній і транзиту активної потужності по лінії, а отже, його можна визначити лише за напругою на шинах вузлової підстанції. Зазначимо, що оптимальний режим реактивної потужності в кожній з ліній завжди має ємнісний характер. Тобто, незалежно від режиму передавання по лінії активної потужності, найбільш оптимальною буде організація приймання з ліній їх ємнісної зарядної потужності.

### Сумісне оптимальне регулювання режиму напруги в опорному вузлі та реактивних потужностей суміжних ліній

Розглянемо задачу сумісного оптимального регулювання режимів напруги на шинах вузлової підстанції та реактивних потужностей у всіх суміжних лініях. Тут необхідно організувати спільне розв'язання рівнянь виду  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U = 0$  та  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i = 0$  для кожної суміжної лінії, де  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial U$  та  $\partial \Delta P_{\Sigma} / \partial Q_i$  – частинні похідні від сумарних втрат потужності за напругою в опорному вузлі та реактивної потужності  $i$ -ї лінії відповідно. Така задача є поєднанням двох попередніх.

Для оптимізаційної задачі з урахуванням хвильових параметрів ліній електропередач тут необхідно організувати спільне розв'язання рівнянь (3) і (4), записаних для всіх ліній. У результаті оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції визначають за виразом:

$$U_o = \sqrt{4 \sum_{i=1}^m a_{iI} P_i^2 / \sum_{i=1}^m \left( 4a_{iU} - \frac{a_{iQ}}{a_{iI}} \right)}.$$

Оптимальне значення реактивної потужності в  $i$ -й лінії знаходять за рівнянням:

$$Q_{i_o} = -\frac{a_{iQ}}{a_{iI}} \sqrt{\sum_{i=1}^m a_{iU} P_i^2 / \sum_{i=1}^m \left( 4a_{iU} - \frac{a_{iQ}}{a_{iI}} \right)}.$$

### Оптимальний розподіл наявної реактивної потужності за фіксованої напруги в опорному вузлі

Таку задачу розв'язують у випадку, коли шуканий оптимальний режим реактивної потужності не може бути реалізований через обмеження реактивної потужності в розглянутому вузлі схеми. Це потребує додаткового дотримання всіх можливих режимів суміжних ліній електропередачі умови балансу реактивної потужності на шини вузлової підстанції електричної системи:

$$\sum_{i=1}^m Q_i = Q_{к.п}, \quad (5)$$

де  $Q_{к.п}$  – наявна реактивна потужність компенсувальних пристроїв вузлової підстанції (у тому числі генераторів електростанцій).

Розв'язання задачі полягає в такому розподілі наявної реактивної потужності вузла між суміжними лініями, щоб сумарні втрати активної потужності у всіх лініях характеризувалися відносними мінімумами.

Для розв'язання цієї задачі доцільно скористатися методом Лагранжа. За умови урахування хвильових параметрів дальніх ліній електропередач функцію Лагранжа можна подати у вигляді:

$$\Phi = U^2 \sum_{i=1}^m a_{iU} + \frac{1}{U^2} \sum_{i=1}^m a_{iI} (P_i^2 + Q_i^2) + \sum_{i=1}^m a_{iP} P_i + \sum_{i=1}^m a_{iQ} Q_i + \lambda \left( \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{к.п} \right),$$

де  $\lambda$  – невизначений множник Лагранжа.

Частинні похідні від функції Лагранжа за реактивною потужністю кожної з ліній мають вигляд:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial Q_i} = \frac{2Q_i a_{iI}}{U^2} + a_{iQ} + \lambda. \quad (6)$$

Нульові значення частинних похідних (6), доповнені рівнянням балансу реактивної потужності (5), утворюють систему рівнянь, кількість яких на одиницю більша від кількості ліній. Невідомими в цих рівняннях є потоки реактивної потужності в лініях  $Q_i$  і невизначений множник Лагранжа  $\lambda$ , що свідчить про можливість розв'язання такої системи алгебричних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial Q_1} = \frac{2Q_1 a_{1I}}{U^2} + a_{1Q} + \lambda = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial Q_2} = \frac{2Q_2 a_{2I}}{U^2} + a_{2Q} + \lambda = 0; \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m Q_i - Q_{к.п} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язання системи рівнянь (7) дозволяє визначити оптимальну реактивну потужність кожної з ліній:

$$Q_i = \frac{Q_{к.п}}{a_{iI} \sum_{j=1}^m 1/a_{jI}} - \frac{U^2 \sum_{j=1}^m (a_{jQ} - a_{jI})/a_{jI}}{2 a_{iI} \sum_{j=1}^m 1/a_{jI}}. \quad (8)$$

Аналіз виразу (8) показує, що оптимальна реактивна потужність кожної з ліній містить дві складові. Перша з них являє собою частину наявної реактивної потужності вузлової підстанції, що спрямована в поточну  $i$ -ту лінію, яка завжди має ємнісний характер, незалежно від режиму активної потужності в лінії. Друга складова не залежить від наявної реактивної потужності та її визначають лише за значенням напруги на шинах підстанції і відмінністю параметрів суміжних ліній. Ця складова може мати як ємнісний, так і індуктивний характер. Природно, алгебрична сума цих складових для всіх суміжних ліній завжди дорівнює нулю.

Отже, для мінімізації втрат активної потужності в лініях навіть без реактивної потужності у вузловій точці схеми доцільно завантажувати лінії різною за знаком реактивною потужністю, а для більш дальніх ліній організовувати приймання частини їх зарядних ємнісних потужностей через завантаження коротших ліній індуктивною потужністю. Це призводить до певного збільшення втрат активної потужності в більш коротких лініях, але й одночасно до істотного зниження втрат активної потужності в довших лініях.

В окремому випадку, коли всі суміжні лінії мають однакові параметри, наявна реактивна потужність розподіляється між лініями порівно, а складова, зумовлена неоднорідністю параметрів лінії, дорівнює нулю.

#### **Оптимальний розподіл наявної реактивної потужності за сумісного регулювання напруги в опорному вузлі**

Для розв'язання такої задачі систему рівнянь (7) слід доповнити рівнянням (3). Сумісним розв'язанням отриманої системи рівнянь можна визначити оптимальний розподіл наявної реактивної потужності пристроїв компенсації загального вузла мережі між суміжними лініями електропередачі й оптимальне значення напруги у вузловій точці, що забезпечує відносний мінімум сумарних втрат активної потужності у всіх лініях.

Розв'язуючи поставлену задачу, слід врахувати той факт, що наявна у вузлі реактивна потужність у загальному випадку має дві складові: реактивні потужності регульованих ( $Q_p$ ) і нерегульованих ( $Q_{н.р}$ ) пристроїв компенсації. Для регульованих компенсувальних пристроїв, наприклад, синхронних компенсаторів, реактивна потужність не залежить від значення напруги на шинах вузлової підстанції і визначається лише законом регулювання реактивної потужності. Навпаки, реактивна потужність нерегульованих компенсувальних пристроїв, наприклад, шунтувальних реакторів, визначається квадратом напруги на їх затискачах. Отже, наявна реактивна потужність загального вузла схеми така:

$$Q_{к.п} = Q_p + b_{н.р} U^2. \quad (9)$$

Вираз (9) потрібно включати до складу системи рівнянь, яка визначає оптимальні параметри режиму ліній електропередачі. У цьому разі останнє рівняння системи (7) набуває вигляду:

$$\sum_{i=1}^m Q_i - Q_p - b_{н.р} U^2 = 0$$

У результаті перетворення системи рівнянь вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi}{\partial Q_1} = \frac{2Q_1 a_{1l}}{U} + a_{1Q} + \lambda = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial Q_2} = \frac{2Q_2 a_{2l}}{U} + a_{2Q} + \lambda = 0; \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m Q_i - Q_p - b_{н.р} U^2 = 0; \\ U^4 \sum_{i=1}^m a_{iU} - \sum_{i=1}^m a_{ii} (P_i^2 + Q_i^2) = 0 \end{array} \right.$$

отримуємо біквдратне рівняння, розв'язання якого визначає оптимальне значення напруги на шинах вузлової підстанції:

$$U_o^4 \left[ \sum_{i=1}^m a_{iU} - \frac{\sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^m (a_{iQ} - a_{jQ}) / a_{jI} \right)^2 / a_{iI}}{4 \left( \sum_{i=1}^m 1/a_{iI} \right)^2} - \frac{b_{н.р}^2}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}} \right] + U_o^2 \left[ \frac{2b_{н.р}^2 Q_p}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}} - \frac{Q_p^2}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}} - \sum_{i=1}^m P_i^2 a_{iI} \right] = 0. \quad (10)$$

У рівнянні (10) фізичний зміст має більший за модулем додатний корінь.

Якщо на підстанції немає нерегульованих компенсувальних пристроїв ( $b_{н.р} = 0$ ), вираз (10) спрощується, а оптимальне значення напруги можна визначити за виразом:

$$U_o = \sqrt[4]{ \frac{\frac{Q_p^2}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}} + \sum_{i=1}^m P_i^2 a_{iI}}{\sum_{i=1}^m a_{iU} - \frac{\sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^m (a_{iQ} - a_{jQ}) / a_{jI} \right)^2 / a_{iI}}{4 \left( \sum_{i=1}^m 1/a_{iI} \right)^2}} }. \quad (11)$$

Якщо підстанцію не обладнано регульованими пристроями компенсації і використовуються тільки нерегульовані, то рівняння для оптимального значення напруги на шинах вузлової підстанції набуває вигляду:

$$U_o = \sqrt[4]{ \frac{\sum_{i=1}^m P_i^2 a_{iI}}{\sum_{i=1}^m a_{iU} - \frac{\sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^m (a_{iQ} - a_{jQ}) / a_{jI} \right)^2 / a_{iк.з}}{4 \left( \sum_{i=1}^m 1/a_{iI} \right)^2} - \frac{b_{н.р}^2}{\sum_{i=1}^m 1/a_{iI}}}} }. \quad (12)$$

Для визначення реактивної потужності на початку кожної з ліній треба скористатися виразом (8) з урахуванням значення оптимального значення напруги на шинах вузлової підстанції, знайденого зі співвідношень (10)-(12), відповідно до складу пристроїв компенсації на підстанції.

### Дослідження законів оптимального регулювання режиму напруги та реактивних потужностей Південноукраїнської АЕС та підстанції Київська-750

Розроблені математичні моделі оптимізації робочих режимів магістральних електричних мереж протяжних ліній електропередач, протестовані під час проведення розрахункового експерименту для фрагментів мережі 750 кВ ОЕС України, зокрема для вузлів підстанції Київська-750 та Південноукраїнської АЕС (ПУАЕС) з урахуванням перспективного розвитку мережі магістральних ліній напругою 750 кВ. Тут для шин розподільчого пристрою 750 кВ розглянуто розв'язання оптимізаційних задач для трьох ліній електропередачі: ПУАЕС – підстанція Вінницька; ПУАЕС – підстанція Дніпровська; ПУАЕС – Ісакача. Для енерговузла підстанції Київська розглянуто перспективну схему, яка містить існуючу лінію ПС Київська – ПС Вінницька, та перспективні лінії ПС Київська – Хмельницька АЕС, ПС Київська – Рівненська АЕС (введення в експлуатацію у 2012 р.) та лінію ПС Київська – ПС Північноукраїнська (введення в експлуатацію у 2020 р.).

Проведені розрахунки показали, що використання хвильових параметрів ліній електропередач у задачах оптимізації режимів напруги та реактивної потужності в електричній мережі дозволяє ввести режим напруги в область оптимального регулювання та знизити сумарні втрати активної потужності в мережі ліній електропередач, поєднаних у вузловій точці.

### Висновки

1. На сьогодні у вітчизняній практиці відсутній математичний апарат, призначений для оптимізації робочих режимів мереж системоутворюючих магістральних ліній електропередач.
2. У роботі проведена розробка математичних моделей оптимізації робочих режимів мереж системоутворюючих ліній електропередач, які мають спільну вузлову точку з урахуванням можливих технологічних обмежень.
3. Розрахунковий експеримент підтвердив ефективність використання запропонованих оптимізаційних моделей порівняно з моделями, які не враховують хвильові процеси в дальніх лініях електропередачі.
4. Запропоновані математичні моделі та методологічні підходи до визначення оптимальних режимів напруги та реактивної потужності вимагають обов'язкового врахування хвильових процесів передавання електричної енергії по лініям надвисокої номінальної напруги та характеризуються високою надійністю та ефективністю.

### Список використаних джерел

1. Вибір оптимальних схем побудови та режимів електроенергетичних систем на основі багатокритеріального аналізу: звіт про НДР 0108U002101 / В. М. Сулейманов, В. А. Баженов, Т. Л. Кацадзе. – Київ, 2008. – 128 с.
2. Экономия энергии в электрических сетях / И. И. Магда, С. Я. Меженный, В. Н. Сулейманов [и др.]; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. – К.: Техніка, 1986. – 167 с.
3. Сулейманов В. М. Электричні мережі та системи: підруч. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 456 с.
4. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы) / В. Г. Холмский. – М.: Высш. шк., 1975. – 280 с.

УДК 621.311

**В.В. Назаров**, д-р техн. наук

ПАТ «Хмельницькобленерго»

**С.Б. Масловський**, заступник технічного директора

ПАТ «Укрелектроапарат»

## ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

*Проаналізовано переваги та недоліки існуючих розподільних трансформаторів та запропоновано нову конструкцію трансформаторів зі схемою  $Y/\Delta/Y-0$ . Підготовлено до випуску серію трансформаторів потужністю 63-1600 кВА напругою 10(6) кВ, яка відповідає стандартам EN 60076, EN 50464-1.*

Сьогодні постійно постає питання, яке пов'язане з розвитком електричних мереж та впровадженням енергоефективного обладнання в енергетиці України.

На цей час закупівля, включно й через тендери, нових силових розподільних трансформаторів проводиться з урахуванням, практично, лише ціни конкретного трансформатора. Спроби застосувати європейську формулу для визначення повної ціни трансформатора з додатком у вигляді капіталізованої вартості втрат енергії в трансформаторі не дають позитивних результатів з причини віртуальності так визначеної економічної ефективності та відсутності наочної оцінки фінансових втрат експлуатуючої організації за час використання трансформатора, який має меншу закупівельну ціну, але вищі втрати енергії у порівнянні з дорожчим трансформатором кращої якості та з меншими втратами.

Тому для порівняння повної ціни ( $C_n$ ) (закупівельна ціна ( $C_m$ ) плюс ціна втрат енергії за певний період часу) трансформаторів, які подані до придбання, доцільно враховувати вартість втрат енергії в трансформаторах ( $A$ ) за нормативний час (6,7 року) та за час його експлуатації (25 років):