

## **№ 14. ВІДДІЛ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

УДК 621.311.13

### **ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ НА УЛЬТРАГАРМОНІКАХ ПАРНОЇ КРАТНОСТІ НА ЛЕП 750 КВ**

**В.Г. Кузнецов<sup>1</sup>**, чл.-кор. НАН України, **Ю.І. Тугай<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **О.Г. Шполянський<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський<sup>4</sup>**, аспірант

1–4 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Розроблено модель магістральної електропередачі надвисокої напруги та виконано дослідження з метою запобігання системним аваріям, причиною яких є внутрішні перенапруги. Виявлено фактори, які обумовлюють появу необхідних і достатніх умов виникнення резонансних процесів на ультрагармоніках парної кратності. Виконано перевірку адекватності моделі шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. Досліджена ймовірність виникнення резонансу на лініях електропередачі, що приєднані до підстанції «Київська-750». Бібл. 5, рис. 7, таблиця.*

**Ключові слова:** резонанс, парні гармоніки, внутрішні перенапруги, ЛЕП 750 кВ.

В енергосистемі України магістральні лінії електропередачі (ЛЕП) напругою 750 кВ забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій (АЕС) і зв'язок між окремими частинами енергосистеми. Крім того, їх розвиток та ефективна експлуатація є важливою передумовою забезпечення інтеграції енергосистеми України в європейську енергосистему. Тому підвищення надійності їх роботи є актуальною теоретичною і практичною задачею, вирішення якої мають на меті дослідження, що виконуються у відділі оптимізації систем електропостачання Інституту електродинаміки НАН України.

Якщо комутаційні перенапруги очікувано виникають під час нормальних операцій, тривають недовго і обмежуються типовим обладнанням, то резонансні з'являються несподівано у результаті випадкової несприятливої комбінації параметрів електричної мережі та її режиму, тривають відносно довго і вимагають вжиття спеціальних заходів [1]. Резонансні перенапруги можуть виникати як на основній частоті, так і на частотах ультрагармонік. Потенційна можливість появи ультрагармонійного резонансу вимагає розробки алгоритмів логічних блокувань комутаційних апаратів для забезпечення правильної послідовності операцій під час оперативних перемикачів на підстанціях 750 кВ. Це призводить до ускладнення системи керування, підвищення її вартості й істотних обмежень при виконанні комутацій.

Очевидно, що необхідною умовою виникнення резонансних перенапруг на ультрагармоніках є збіг частоти власних коливань еквівалентного електричного кола з частотою ультрагармоніки. У випадку ЛЕП 750 кВ це означає, що вхідний опір лінії на частоті ультрагармоніки повинен мати ємнісний характер, а активні втрати в контурі, зокрема на коронний розряд, мають бути меншими критичної величини, яка визначається потужністю джерела ультрагармонік. До коливального контура входять розподілені ємності ЛЕП та індуктивності шунтувальних реакторів (ШР), які встановлюють на підстанціях з метою запобігання перенапругам через надлишок зарядної потужності. Слід відзначити, що на відміну від ферорезонансу, нелінійна індуктивність не входить безпосередньо до коливального кола, яке залишається лінійним, а є джерелом зовнішньої сили [3].

Фізична природа виникнення цієї зовнішньої сили обумовлена періодичною зміною індуктивності магнітного шунта автотрансформатора при протіканні через нього змінного струму [5]. В результаті ємнісного ефекту напруга на автотрансформаторі підвищується, викликаючи насичення його магнітопроводу. Це в свою чергу спричиняє глибоке модулювання індуктивності автотрансформатора; вона буде змінюватись з подвійною частотою стосовно

прикладеної напруги, оскільки ступінь намагнічування не залежить від напрямку струму. Поява в спектрі другої гармонічної складової і є достатньою умовою виникнення резонансних перенапруг на ультрагармоніках парної кратності.

Необхідно зазначити, що на практиці поява другої гармонічної спостерігається у двох випадках: при плавному піднятті напруги або в результаті перехідного процесу. У першому випадку йдеться про самозбудження другої гармонічної складової. У другому – друга гармоніка виникає як наслідок перехідного процесу, що супроводжується проходженням надструмів і насиченням сталюого осердя, у результаті якого й відбувається згадане вище автоматичне настроювання на подвійну частоту. На практиці частіше зустрічається другий випадок, коли лінія з одностороннім живленням вмикається на незбуджений автотрансформатор при відновленні електропостачання. Протягом перших періодів кидки струмів намагнічування відбуваються через насичення магнітопроводу. Під час комутації в магнітному колі трансформатора виникає вільна загасаюча аперіодична складова потокозчеплення, що призводить до появи в струмі намагнічування гармонічних складових. Останні, у свою чергу, викликають на елементах електричного кола падіння напруги, що еквівалентно введенню в коло поздовжньої електро-

рушійної сили (ЕРС) відповідної частоти. Схема заміщення ЛЕП 750 кВ з одностороннім живленням та ненавантаженим автотрансформатором показана на рис. 1 [4], де позначено:  $E$  – ЕРС системи;

$L_c$  – індуктивність системи;  $L_{л}$  – поздовжня індуктивність лінії;  $C_{л}$  – поперечна ємність лінії;  $L_{p1}$  – індуктивність шунтувального реактора на початку лінії;  $L_{p2}$  – індуктивність шунтувального реактора в кінці лінії;  $L_T$  – індуктивність розсіювання трансформатора;  $L_{\mu}$  – індуктивність магнітного шунта трансформатора;  $Z_{BX}$  – вхідний опір ЛЕП.

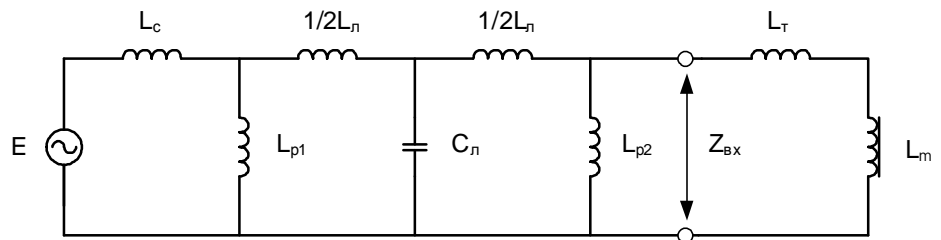


Рис. 1

Як зазначалось, при комутації лінії на ненавантажений трансформатор у його магнітопроводі може виникнути струм другої гармоніки. Якщо зобразити падіння напруги цього струму на опорі трансформатора у вигляді ЕРС ультрагармоніки  $E(V)$ , можна одержати схему для визначення резонансних частот (рис. 2).

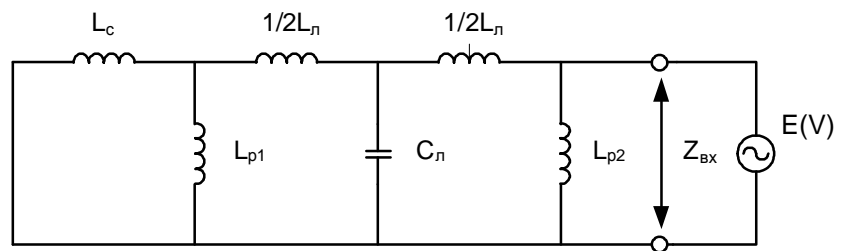


Рис. 2

Величину вхідного опору кола щодо затискачів автотрансформатора, при яких може виникнути резонанс, визначають після виконання ряду перетворень:

$$Z_{BX} = \frac{A\omega^4 + B\omega^2}{D\omega^3 + F\omega},$$

де

$$\left\{ \begin{array}{l} A = 0,5(L_C + L_{P1})L_{Л}L_T L_{P2} + L_C L_{P1} L_T L_{P2} + 0,25(L_C + L_{P1})L_{Л}^2 L_T L_{P2} \\ + 0,5L_C L_{P1} L_{Л} (L_T + L_{P2}); \\ B = -\frac{1}{C_{Л}} [(L_C + L_{P1})L_T L_{P2} + L_{Л} (L_C + L_{P1})(L_T + L_{P2}) + L_C L_{P1} (L_T + L_{P2})]; \\ D = 0,5(L_C + L_{P1})L_{Л}L_T + L_C L_{P1} L_{P2} + 0,25(L_C + L_{P1})L_{Л}^2 + 0,5L_C L_{P1} L_{Л}; \\ F = -\frac{1}{C_{Л}} [(L_C + L_{P1})L_{P2} + L_{Л} (L_C + L_{P1}) + L_C L_{P1}]. \end{array} \right.$$

Нулі функції  $Z_{BX}$  мають місце за умови  $A\omega^4 + B\omega^2 = 0$ , а полюси – за умови  $D\omega^3 + F\omega = 0$ . Резонансна частота  $Z_{BX}$  при підключенні ненавантаженого трансформатора до лінії визначається зі співвідношення

$$\omega_0 = \pm \sqrt{-\frac{B}{A}}, \quad (1)$$

у якому значення  $L_T \rightarrow \infty$ . Фізичний зміст має тільки позитивне значення  $\omega_0$ . Взагалі дослідження вхідного опору дає безліч резонансних частот. Вираз (1) дає змогу визначити найменшу за значенням серед них.

Очевидно, що експериментальні дослідження резонансних перенапруг у діючих мережах викликають певні труднощі, тому особливого значення набуває вивчення необхідних і достатніх умов виникнення аномальних режимів цього типу за допомогою методів математичного моделювання. З метою дослідження процесу розвитку резонансного процесу та визначення факторів, які впливають на цей процес, математична модель ЛЕП 750 кВ була реалізована за допомогою системи Matlab (рис. 3) [2].

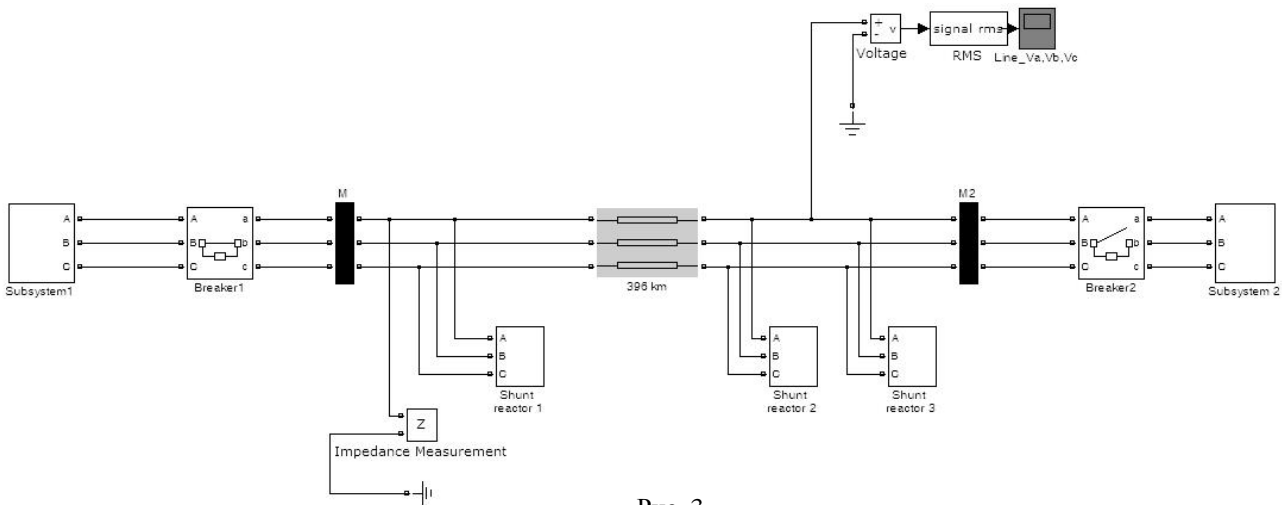


Рис. 3

Лінія електропередачі з розподіленими параметрами моделюється ланцюговою схемою з П-подібних схем заміщення, які складаються з послідовної активно-індуктивної гілки і двох паралельних активно-ємнісних гілок. Оскільки в роботі виконувався аналіз поведінки моделі на вищих гармонічних складових, то один елемент схеми заміщення використовувався для моделювання 25 км реальної ЛЕП.

Для джерела живлення використана узагальнена модель Парка-Горєва: синусоїдальне джерело напруги з активним опором та індуктивністю, значення яких отримані з надперехідної індуктивності та постійної часу. Така спрощена модель генератора є адекватною для діапазону частот 50...500 Гц, що цілком достатньо для поставленої задачі (перехідні характеристики генератора не впливають на тривалі перенапруги).

Модель вимикача допускає пофазне керування, причому кожний полюс представлено ідеальним вимикачем. Це дає можливість змінювати моменти замикання кожного з полюсів під час процесу моделювання, що відповідає випадковій чи запрограмованій асинхронності комутації фаз. При випадковій асинхронності момент замикання полюса фази А відбувається точно в заданий момент, а полюси фаз В і С вимикача замикаються згідно з нормальним законом розподілу. Дисперсія в загальному випадку становить 10 мкс, математичному сподіванню відповідає момент замикання полюса фази А.

У моделі автотрансформатора враховані активні опори обмоток, індуктивності розсіювання, а також характеристики магнітопроводу у вигляді комплексної провідності. Дійсна частина відображає активні втрати потужності на вихрові струми та гістерезис, а уявна – змінну нелінійну індуктивність, величину якої визначаємо за кривою намагнічування. Крива намагнічування відтворює залежність напруги від струму і при моделюванні апроксимується кусочно-лінійною характеристикою, одна ділянка якої характеризує стан магнітопроводу до точки насичення, а інша – після цієї точки. Явище гістерезису враховується тільки при визначенні залишкового магнітного потоку в магнітопроводі та в активній провідності схеми заміщення.

Для верифікації моделі були використані результати пускових випробувань ЛЕП 750 кВ Хмельницька АЕС (ХАЕС) – Жешув і Південноукраїнська АЕС (ПУАЕС) – Ісакча, оскільки саме під час них була зареєстрована поява перенапруг на другій гармоніці. Характерними особливостями цих ЛЕП є їх відносно велика довжина, а також повна компенсація зарядної потужності. Так, лінія ПУАЕС – Ісакча на час випробувань мала довжину 403 км і три групи ШР потужністю по 330 Мвар кожна. Погонні параметри цієї лінії такі: індуктивність прямої послідовності 0,9836 мГн/км, індуктивність нульової послідовності 2,0882 мГн/км, ємність прямої послідовності 12,4 нФ, ємність нульової послідовності 8,89 нФ. Еквівалентний опір системи з боку підстанції Ісакча становив 155 Ом, з боку ПУАЕС – 38,78 Ом.

При підключенні лінії 750 кВ ПУАЕС – Ісакча, що живиться з боку підстанції Ісакча, на ненавантажений автотрансформатор ПУАЕС визначена за формулою (1) резонансна частота складає 92,27 Гц. Також на

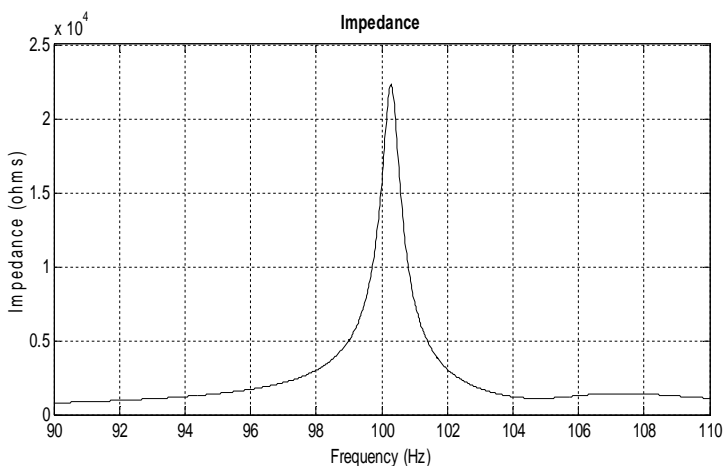


Рис. 4

рис. 4 наведена частотна характеристика вхідного опору, отримана моделюванням за допомогою Matlab. Обидва критерії свідчать про наявність у випадку, який розглядається, необхідних умов для виникнення резонансного процесу на другій гармонічній складовій.

Джерелом цієї складової буде автотрансформатор на ПУАЕС, який при включенні без навантаження в результаті насичення має в спектрі напруги холостого ходу другу гармонічну складову, що мало відрізняється за амплітудою від основної частоти (рис. 5).

При резонансі на другій гармонічній складовій амплітуда напруги може перевищити робочу в 1,5 разу. Такі перенапруги є небезпечними для обладнання і тому вимагають вжиття попереджувальних заходів. Результати моделювання ЛЕП 750 кВ ХАЕС – Жешув і ПУАЕС – Ісакча збігаються з даними, які наведені у звітах про пускові випробування цих ліній.

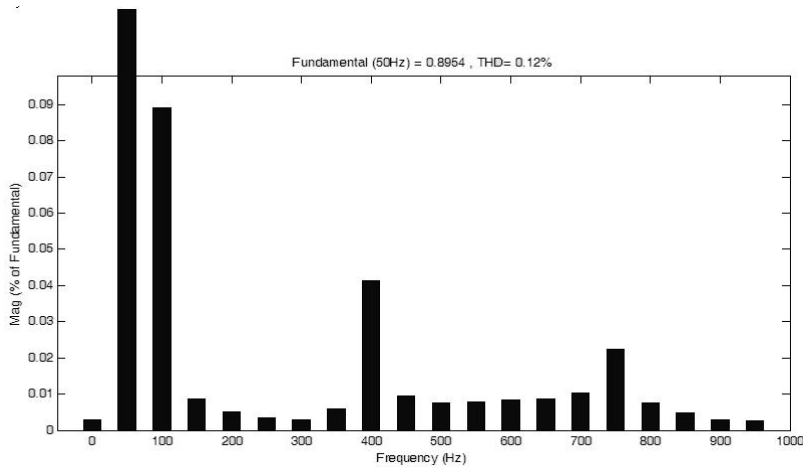


Рис. 5

За замовленням НЕК «Укренерго» були виконані дослідження процесів у ЛЕП 750 кВ, які відходять від нової підстанції Київська, зокрема, Київська – ЧАЕС. Ця лінія має довжину 131 км і дві групи ШР потужністю по 330 Мвар кожна (по одній на кінцях). Погонні параметри лінії Київська – ЧАЕС: індуктивність прямої послідовності 0,91999 мГн/км, індуктивність нульової послідовності 3,1735 мГн/км, ємність прямої послідовності 12,567 нФ, ємність нульової

послідовності 7,4453 нФ. Дослідження виконувались для різних режимів об'єднаної енергосистеми України, тому еквівалентний опір змінювався. Результати розрахунків резонансної частоти лінії 750 кВ Київська-ЧАЕС (Гц), проведені за виразом (1), представлені в таблиці.

| Опір системи, Ом |         | Шунтувальні реактори                        |          |         |         |
|------------------|---------|---|----------|---------|---------|
| Київська         | ЧАЕС    | Дві групи                                   | Київська | ЧАЕС    | Без ШР  |
| 68,983           | 141,053 | Двостороннє живлення                        |          |         |         |
|                  |         | 325,166                                     | 321,344  | 321,329 | 317,461 |
|                  |         | Живлення з боку Київської (ЧАЕС відключена) |          |         |         |
|                  |         | 269,442                                     | 264,817  | 264,782 | 260,074 |
|                  |         | Живлення з боку ЧАЕС (Київська відключена)  |          |         |         |
|                  |         | 195,226                                     | 188,742  | 188,766 | 182,052 |
| 35,6             | 84,253  | Двостороннє живлення                        |          |         |         |
|                  |         | 436,975                                     | 434,135  | 434,159 | 431,3   |
|                  |         | Живлення з боку Київської (ЧАЕС відключена) |          |         |         |
|                  |         | 368,165                                     | 364,768  | 364,817 | 361,389 |
|                  |         | Живлення з боку ЧАЕС (Київська відключена)  |          |         |         |
|                  |         | 245,726                                     | 240,639  | 240,607 | 235,409 |
| 30,663           | 55,46   | Двостороннє живлення                        |          |         |         |
|                  |         | 490,341                                     | 487,820  | 487,839 | 485,305 |
|                  |         | Живлення з боку Київської (ЧАЕС відключена) |          |         |         |
|                  |         | 395,480                                     | 392,32   | 392,373 | 389,188 |
|                  |         | Живлення з боку ЧАЕС (Київська відключена)  |          |         |         |
|                  |         | 298,344                                     | 294,182  | 294,142 | 289,92  |

Найменше значення резонансної частоти (близько 182 Гц) спостерігається при живленні лінії з боку п/ст ЧАЕС при опорі системи 141,053 Ом та відключенні обох ШР. Моделювання в Matlab, що виконане згідно з моделлю рис. 3, дало близькі результати. Так, для варіанта живлення лінії від ЧАЕС, опору системи 141,053 Ом і однієї групи шунтувальних реакторів резонансна частота  $Z_{BX}$  склала 188,742 Гц. Результати моделювання в Matlab представлені на рис. 6, з якого видно, що частотна характеристика має дві резонансні частоти: 187,8 і 205,64 Гц. Розбіжність результатів викликана спрощенням моделі системи, яка склала основу виразу (1). Насамперед це стосується лінії 750 кВ, що була представлена Т-подібною схемою заміщення із зосередженими параметрами.

Як можна бачити, при заданих значеннях опорі системи, кількості та потужності ШР резонансна частота досить далека від 100 Гц. Були також проведені дослідження з метою визначення опорі системи, при якому спостерігається небезпечне наближення резонансної частоти до частоти другої гармоніки. На рис. 7 наведено залежність резонансної частоти лінії

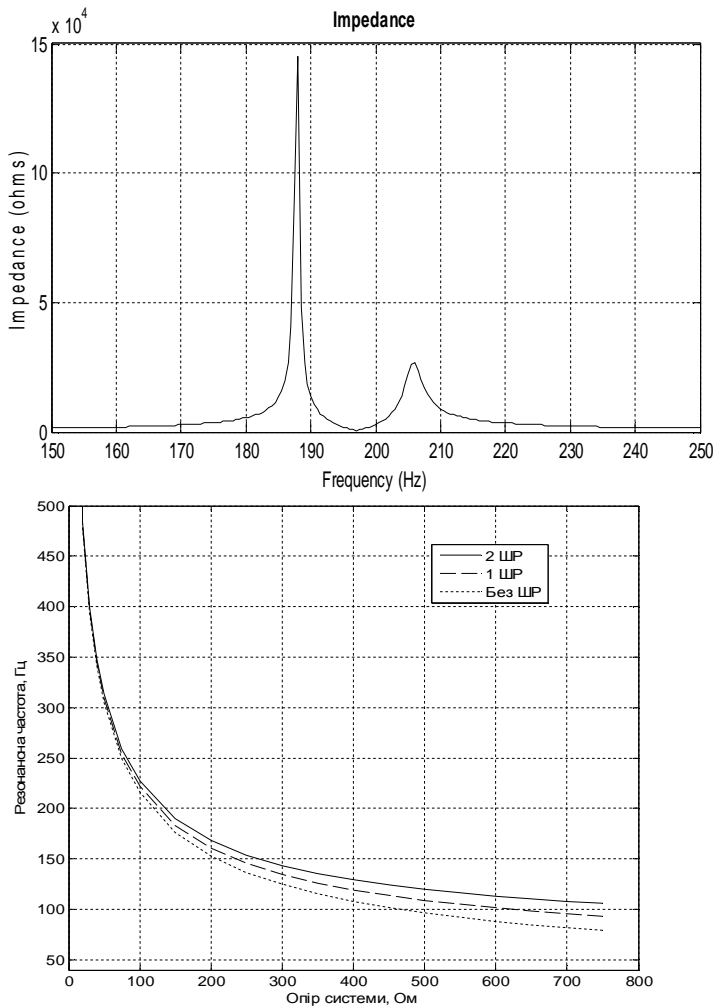


Рис. 7

хідно заборонити комутації небезпечної ЛЕП у блоці з ненавантаженим автотрансформатором. При необхідності подібних комутацій автотрансформатор має бути попередньо збуджений з боку обмоток низької або середньої напруги, якщо у відповідних мережах є джерела генерації або довантажений шляхом підключення потужного місцевого споживача. На підстанціях та лініях, що проектуються, при виявленні загрози резонансних процесів на ультрагармоніках доцільно передбачити встановлення реактора з боку нижчої напруги автотрансформатора. Команда на короточасне підключення цього реактора повинна подаватись одночасно (або з невеликим випередженням) з командою на включення або відключення лінійних вимикачів. Сигнал на відключення реактора подається з витримкою часу в залежності від появи струму в обмотці реактора. Результати досліджень та розроблені рекомендації були передані в НЕК «Укренерго» для впровадження.

## ВИСНОВКИ

Ультрагармоніки парної кратності напруги і струму були зафіксовані під час експлуатації ЛЕП 750 кВ. Вони порушують дії релейного захисту, вносять похибки у роботу ємнісних трансформаторів напруги. В особливо несприятливих випадках у мережі можуть виникнути резонансні співвідношення для цих ультрагармонік і тоді з'являються небезпечні для обладнання перенапруги. На відміну від ферорезонансних вони виникають у лінійних колах, утворених розподіленою ємністю ЛЕП та індуктивністю ШР.

Виконані у відділі дослідження показали, що джерелами ультрагармонік парної кратності є нелінійні елементи мережі, перш за все автотрансформатори в режимі малих навантажень, коли робоча точка знаходиться за межами лінійної частини характеристики намагні-

750 кВ Київська – ЧаЕС від опору системи. Розрахунки свідчать, що збільшення кількості ШР призводить до зростання резонансної частоти. Але кількість ШР в області реальних значень еквівалентного опору системи суттєвого впливу на резонансну частоту не має. Резонансна частота значно більшою мірою залежить від еквівалентного опору системи. З результатів розрахунку можна зробити висновок, що цілком безпечним вважаються існуючі системи до 400 Ом.

Аналогічні результати були отримані й для ЛЕП 750 кВ «Київська – Вінницька». Таким чином, незважаючи на відсутність на даний час необхідних умов виникнення резонансних перенапруг за рахунок появи напруги парної ультрагармоніки на підстанції, вони можуть з'явитись у майбутньому при значних змінах в енергосистемі, наприклад, побудові підстанцій і ліній, які зараз проектуються. Тому були розроблені та перевірені на математичній моделі рекомендації по запобіганню виникненню аварійних ситуацій. Зокрема, на діючих підстанціях при виявленні загрози резонансу на ультрагармоніках необ-

чування. Внаслідок аналізу умов виникнення резонансних перенапруг за рахунок появи напруги парної ультрагармоніки в магістральних мережах 750 кВ отримано розрахункові вирази і розроблено математичну модель для оцінки резонансної частоти в діючих та перспективних електропередачах. Проведено розрахунки резонансної частоти вхідного опору ЛЕП 750 кВ залежно від параметрів режиму та складу підключеного основного обладнання. Визначено, що найбільший вплив на резонансну частоту має значення еквівалентного опору системи.

Розроблена математична модель була використана для аналізу процесів на магістральних лініях енергосистеми України. Було показано, що резонансні перенапруги на другій гармоніці можуть виникати на ЛЕП 750 кВ Хмельницька АЕС – Жешув і Південноукраїнська АЕС – Ісакча. Розроблені рекомендації по запобіганню цим перенапругам при відновленні експлуатації ЛЕП. На лініях Київська – Вінницька та Київська – ЧАЕС необхідні умови для таких перенапруг нині відсутні. Результати роботи передані в НЕК «Укренерго». У подальшому передбачається виконати дослідження інших ЛЕП 750 кВ, які знаходяться в експлуатації або проектується в енергосистемі України.

1. Долгинов А.И. Резонанс в электрических цепях и системах. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 328 с.
2. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Кучанский В.В. Использование искусственной нейронной сети для анализа резонансных перенапряжений // VI Międzynarodowe Seminarium Polsko-Ukraińskie «Problemy Elektroenergetyki», Лодзь, 16–17 сентября 2010 г. – С. 81–88.
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – № 2(23). – С. 110–118.
4. Кузнецов В.Г., Шполянський О.Г. Исследование возможности возникновения перенапряжений в ЛЭП 750 кВ на 2-й гармонике // VI Międzynarodowe Seminarium Polsko-Ukraińskie «Problemy Elektroenergetyki», Лодзь, 16–17 сентября 2010 г. – С. 51–58.
5. Либкинд М.С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. – М.: АН СССР, 1962. – 112 с.

УДК 621.311.13

**В.Г. Кузнецов<sup>1</sup>**, чл.-корр. НАН України, **Ю.И. Тугай<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **О.Г. Шполянський<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський<sup>4</sup>**, аспірант

1–4 – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, 03680, Київ-57, Україна

#### **Исследование резонансных перенапряжений на ультрагармониках четной кратности на ЛЭП 750 кВ**

*Разработана модель магистральной электропередачи сверхвысокого напряжения и выполнены исследования с целью предупреждения системных аварий, причиной которых являются внутренние перенапряжения. Определены факторы, которые обуславливают появление необходимых и достаточных условий возникновения резонансных процессов на ультрагармониках четной кратности. Выполнена проверка адекватности модели путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Исследована вероятность возникновения резонанса на линиях электропередачи, присоединенных к подстанции «Киевская-750». Библ. 5, рис. 7, таблица.*

**Ключевые слова:** резонанс, четные гармоники, внутренние перенапряжения, ЛЭП 750 кВ.

**V.G. Kuznetsov<sup>1</sup>, Yu.I. Tugai<sup>2</sup>, O.G. Shpolianskyi<sup>3</sup>, V.V. Kuchanskyi<sup>4</sup>**

1–4 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **The study of even harmonic resonance overvoltage at the transmission line 750 kV**

*The model of extra high voltage transmission line has been developed and the study has performed for prevention of failure caused by internal overvoltage. The reasons of even harmonic appearance are described. The model has been tested by comparison with results of experiment at real line. The probability of resonance overvoltage at substation "Kyivska 750" has been studied. References 5, figures 7, table.*

**Key words:** resonance, even harmonics, internal overvoltage, line 750 kV.

Надійшла 06.05.2011  
Received 06.05.2011