

УДК 621.311.004.942

### АНАЛІЗ КОЛИВНОЇ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ОЕС УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАРМОНІЧНИХ ФУНКЦІЙ ЗМІННОЇ АМПЛІТУДИ

**В.М. Авраменко**, докт.техн.наук, **О.В. Мартинюк**, канд.техн.наук, **Т.М. Гурєєва**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [avr@ied.org.ua](mailto:avr@ied.org.ua)

*Проведено дослідження можливості апроксимації модельних (розрахованих) процесів за допомогою гармонічних функцій із загасаючою або зростаючою амплітудою з метою оцінювання рівня коливної статичної стійкості ЕЕС. Моделювання коливань потужності лінії за допомогою однієї або двох гармонічних функцій з експоненційно змінною амплітудою проводилося на прикладі реального режиму ОЕС України, одержаного розрахунком поточного режиму за даними телеметрії з подальшим його обважненням. Досліджувався перетин у складі двох ліній 750 кВ та трьох транзитів 330 кВ, джерелом живлення якого є три потужні АЕС, з передачею потужності у гостродефіцитний регіон з концентрованим навантаженням. У перехідному процесі, розрахованому після збурення режиму, близького до граничного, виявлено дві домінуючі гармоніки: перша – швидко загасаюча, друга – дуже повільно загасаюча на інтервалі перевірки статичної стійкості ЕЕС. Динаміку параметрів функцій апроксимації (початкової амплітуди та постійної часу загасання) на різних етапах обважнення доцільно використати для визначення граничного режиму перетину. Бібл. 7, табл. 1, рис. 7.*

**Ключові слова:** енергосистема, перетин, потужність по лінії, статична стійкість, імітаційне моделювання, вільні коливання, гармонічні функції.

Коливна стійкість електроенергетичних об'єднань є предметом досліджень як в Україні, так і за кордоном [3-7]. Наші попередні дослідження показали, що в реальних коливаннях потужності в ЕЕС, які є результатом великої кількості випадкових малих збурень, відсутні домінуючі гармоніки [1-2]. Нами було запропоновано метод аналізу вільних коливань в ЕЕС за допомогою застосування класичного перетворення Фур'є до перехідного процесу, розрахованого для малого скінченного тестового збурення. Відомо, що вільний рух динамічної системи після малого збурення – це сукупність процесів, які в лінійній системі мають експоненційний характер – аперіодичний або коливний. Метою даної роботи є дослідження можливості апроксимації модельних (розрахованих) процесів за допомогою гармонічних функцій із загасаючою або зростаючою амплітудою як апарата оцінювання рівня коливної статичної стійкості ЕЕС.

**Умови дослідження.** Дослідження виконано для реального режиму ОЕС України 19:30 02.03.2012 р., одержаного розрахунком поточного режиму за даними телеметрії програмним комплексом (ПК) КОСМОС. Розрахункова схема має 719 вузлів і 60 генераторів. Режим додатково обважнений вимиканням (виведенням у ремонт) лінії 330 кВ Шепетівка–Житомир. Проаналізовано лінію 750 кВ Хмельницька АЕС – Чорнобильська АЕС у перетині ОЕС Захід–Вінниця, у складі якого також лінія 750 кВ Західноукраїнська – Вінниця – 750 кВ та три транзити 330 кВ: ХАЕС – ЧАЕС, Хмельницький – Вінниця, Івано-Франківськ – Ладижинська ТЕС, які живляться від Хмельницької, Рівненської та Південно–Української АЕС. Як мале збурення використано вимикання навантаження 20 МВт (5,2% навантаження підстанції) на підстанції Октябрська Центральної ЕЕС – однієї з п'яти підстанцій 330 кВ, які здійснюють електропостачання м. Києва. Враховано автоматичне регулювання збудження (АРЗ) синхронних генераторів атомних електростанцій та Ладижинської і Трипільської ТЕС. З метою наближення до границі стійкості виконувалося обважнення вихідного усталеного режиму, яке здійснювалося ступенями по 200 МВт шляхом збільшення потужності ХАЕС з одночасним зменшенням потужності Трипільської ТЕС. Розрахунки коливань виконувалися програмним комплексом АВР 74, розробленим у ІЕД НАН України.

**Методика дослідження.** Дослідження побудовано на обробці результатів чисельного розрахунку перехідних процесів після малого збурення для режимів ОЕС, які відрізняються рівнем стійкості. Мо-

делювання даних перетоку потужності здійснювалося за допомогою гармонічних функцій (двохкомпонентних або, в окремих випадках, спрощених однокомпонентних) з експоненційно змінною амплітудою. Якщо при моделюванні відразу всього інтервалу виникали суттєві похибки апроксимації, то проводилося окреме моделювання попередньо виділених характерних фрагментів даних.

Загальний вигляд функції апроксимації, що складається з двох гармонік

$$P = P_1 + P_2,$$

де  $P_1 = A_0 + A_1 e^{(t_0-t)/T_1} \cos(2\pi f_1(t-t_0))$ ;  $P_2 = A_2 e^{(t_0-t)/T_2} \cos(2\pi f_2(t-t'_0))$ ;  $A_0$  – середнє значення перетоку потужності на інтервалі даних, що досліджується;  $A_1, A_2$  – початкові значення амплітуд гармонічних функцій;  $T_1, T_2$  – постійна експоненціального загасання/зростання амплітуд;  $f_1, f_2$  – частоти гармонічних функцій апроксимації;  $t_0, t$  – початковий і поточний час процесу;  $t'_0$  – зсув фази другої гармоніки.

У випадку апроксимації лише однією періодичною функцією з експоненційно змінною амплітудою використовувалась наступна формула:

$$P = P_1 = A_0 + A_1 e^{(t_0-t)/T_1} \cos(2\pi f_1(t-t_0)).$$

Відповідно до наведених функцій апроксимації початковий час відліку  $t_0$  має відповідати максимуму основної гармоніки  $P_1$  ( $t = t_0 \Rightarrow P_1 = A_0 + A_1$ ). Такий підхід дозволяє зменшити на одиницю кількість невідомих параметрів апроксимаційної моделі. Параметри  $A_0, A_1, A_2, T_1, T_2, f_1, f_2, t'_0$  кривих апроксимації визначаються в результаті розв'язання задачі мінімізації цільової функції. Як цільову функцію використано або середню абсолютну помилку апроксимації (МАРЕ)

$$N^{-1} \sum_t |P_t^f - P_t(A_0, A_1, A_2, f_1, f_2, T_1, T_2, t'_0)| \rightarrow \min,$$

або середньоквадратичне відхилення (СКВ)

$$N^{-1} \sqrt{\sum_t (P_t^f - P_t(A_0, A_1, A_2, f_1, f_2, T_1, T_2, t'_0))^2} \rightarrow \min.$$

### Моделювання вільних коливань.

#### 1. Режим з великим запасом стійкості (не обважнений).

Для обраного для досліджень перетину ОЕС у ремонтному режимі (вимкнено ПЛ-330 кВ Шепетівка – Житомир) попередніми розрахунками визначено, що критичною щодо порушення стійкості є ПЛ-750кВ ХАЕС – ЧАЕС, для якої потужність у вихідному режимі становить 770 МВт, а гранична потужність – 1098 МВт. Відповідно запас стійкості ( $K_p$ ) у перетині:  $K_p = (P_{zp} - P_0)/P_0 = (1098 - 770)/770 = 0,43$ . На рис. 1 показано коливання потужності по зазначеній лінії після збурення. Від'ємне значення потужності означає, що потужність подається з шин ХАЕС. Зменшення вихідного перетоку з 769,8 МВт до потужності післяаварійного усталеного режиму 769,2 МВт є наслідком збурення (вимикання навантаження) і перерозподілу потужності по лініях перетину в умовах, коли потужність турбін електростанцій залишається незмінною.

Тут і для подальших обважнених режимів аналізуються фрагменти даних, що відповідають

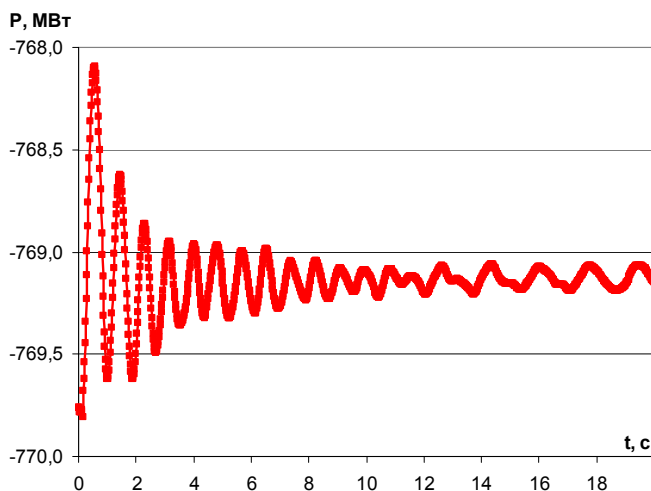


Рис. 1

першим двадцяти секундам після збурення. Дискретність отримання інформації – 0,02 с, тому загальний обсяг даних становить 1000 значень.

Відповідно до візуального аналізу перетоку потужності (рис. 1) виявлено три інтервали, що відповідають швидкому загасанню гармоніки з великою амплітудою, змішаному процесу та незагасаючій гармоніці малої амплітуди. Результати розрахунків показали, що використання двохкомпонентної функції для моделювання майже всього відрізка (окрім перших 0,54 с) забезпечує прийнятну точність апроксимації. Вихідні дані розрахунку функції апроксимації:  $t_0 = 0,54$  с,  $t_{кин} = 19,98$  с; критерій пошуку параметрів – мінімум цільової функції

МАРЕ. Розраховані параметри функції апроксимації на зазначеному інтервалі:  $A_0 = -769,14$  МВт;  $T_1 = 4,2$  с;  $A_1 = 0,52$  МВт;  $f_1 = 1,17$  с<sup>-1</sup>;  $T_2 = -8,96$  с;  $A_2 = -0,008$  МВт;  $f_2 = 0,61$  с<sup>-1</sup>; МАРЕ = 0,03 МВт, СКВ = 0,08 МВт.

У графічному вигляді результати апроксимації показано на рис. 2.

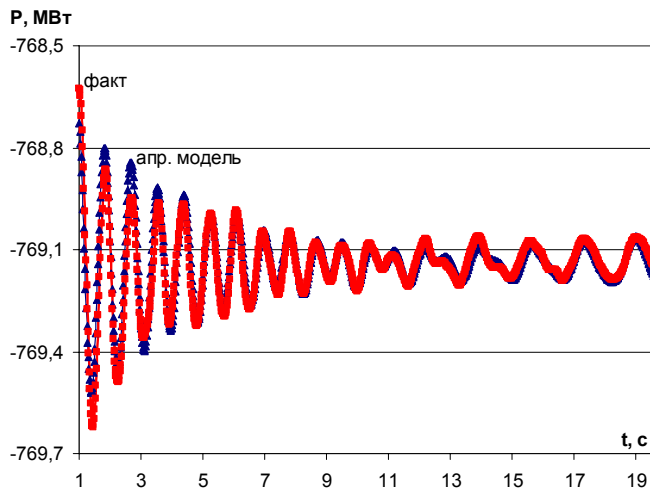


Рис. 2

Відповідно до результатів дослідження, мале збурення у режимі з великим запасом стійкості призводить до появи коливань потужності, які найбільш ефективно апроксимуються саме двохкомпонентною моделлю з такими параметрами: швидко загасаючою гармонікою із більшою амплітудою і частотою (що проявляється на початковому інтервалі) та зростаючою гармонікою із суттєво меншою амплітудою і меншою частотою. Друга гармоніка не впливає на висновок щодо стійкості системи на інтервалі перевірки статичної стійкості (20 с). Усереднена точність апроксимації при цьому становить  $4,2 \cdot 10^{-3} \%$  по відношенню до середнього перетоку  $A_0$ , тобто модельний процес є адекватним реальному на заданому відрізку даних.

## 2. Режим з нормативним запасом стійкості, одержаний обважненням 2x200 МВт.

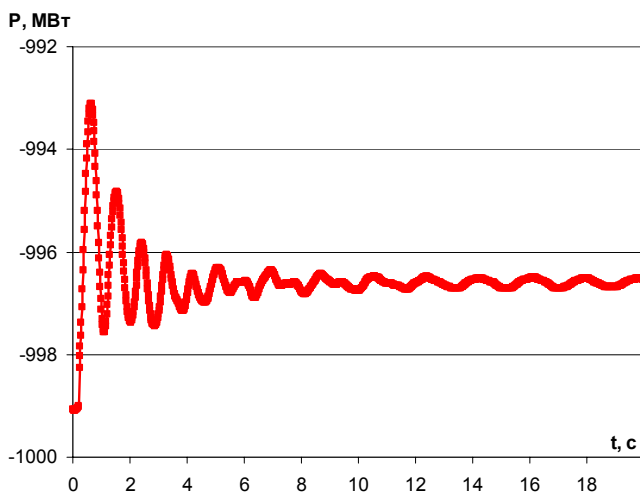


Рис. 3

Після обважнення потужність по лінії зросла до 996,6 МВт. Таким чином, запас стійкості у перетині становить  $K_p = (1098 - 997) / 997 = 0,10$ . На рис. 3 відображено коливання потужності по зазначеній лінії.

Розрахунки показали, що моделювання одночасно усього наведеного на рис. 3 інтервалу даних перетоку потужності однією або двома гармонічними кривими призводить на окремих ділянках інтервалу до суттєвих похибок апроксимації. Зокрема, розраховані на інтервалі  $t_0 = 0,62$  с (перший максимум) –  $t_{кін} = 19,98$  с параметри функції апроксимації  $P_i$  при використанні у цільовій функції середньоквадратичного відхилення становлять:  $A_0 = -996,57$  МВт;  $T_1 = 0,91$  с;  $A_1 = 2,63$  МВт;  $f_1 = 1,1$  с<sup>-1</sup>;  $T_2 = -25,9$  с;  $A_2 = -0,056$  МВт;  $f_2 = 0,548$  с<sup>-1</sup>; МАРЕ = 0,12 МВт; СКВ = 0,25 МВт.

Чисельні значення середньої та середньоквадратичної похибок свідчать, що: використання двохкомпонентної функції апроксимації є надлишковим ( $A_2 < \text{МАРЕ}$ ); апроксимація даних задовільна на початку інтервалу із суттєвою амплітудою коливання, проте є незадовільною, починаючи з п'ятої секунди, оскільки похибка апроксимації  $\text{МАРЕ} = 0,12$  МВт перевищує розраховану амплітуду коливань, яка становить 0,1 МВт.

У процесі, що апроксимується, можна вирізнити характерні часові відрізки. З метою підвищення якості моделі виконано апроксимацію на окремих відрізках даних. На загальному інтервалі 0 ... 19,98 с виділено три інтервали: 1). 0,62 с ... 4,16 с – швидкозагасаючий гармонічний процес; 2). 4,18 с ... 10,52 с – змішаний процес; 3). 10,54 с ... 19,98 с – умовно гармонічний незагасаючий процес.

Оскільки статична стійкість визначається або повним загасанням коливань, або їхнім безмежним зростанням, то для оцінки стійкості визначальними є початковий та кінцевий інтервали збуреного процесу. З огляду на це середній інтервал не досліджувався.

На рис. 4 показано результати моделювання фрагменту даних 0,62 с ... 4,16 с двохкомпонентною функцією. Як критерій пошуку параметрів апроксимації використано цільову функцію МАРЕ.

Розраховані параметри функції апроксимації на цьому інтервалі:  $A_0 = -996,37$  МВт;  $T_1 = 1,9$  с;  $A_1 = 2,18$  МВт;  $f_1 = 1,09$  с<sup>-1</sup>;  $T_2 = 1,8$  с;  $A_2 = 2,34$  МВт;  $f_2 = 0,08$  с<sup>-1</sup>;  $t'_0 = -1,2$  с; MAPE = 0,12 МВт, СКВ = 0,18 МВт.

На рис. 5 показано результати моделювання фрагменту даних третього інтервалу 10,54 с – 19,98 с двохкомпонентною функцією (умовно гармонічний незагасаючий процес).

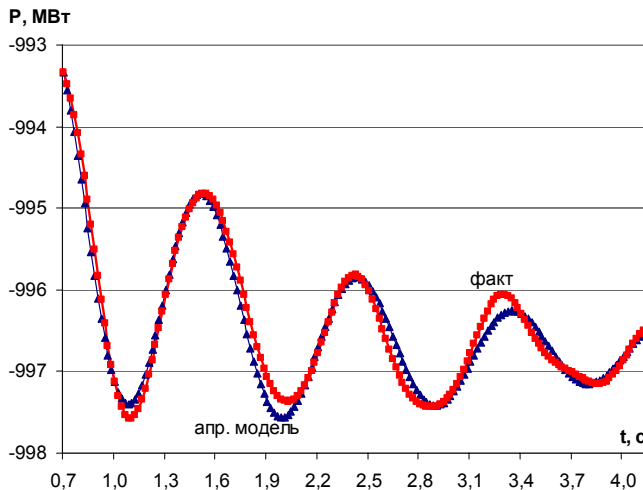


Рис. 4

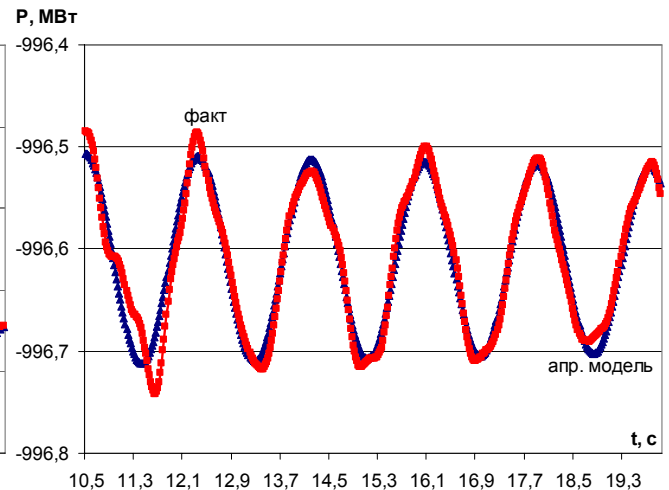


Рис. 5

Результати апроксимації:  $A_0 = -996,61$  МВт;  $T_1 = -6,28$  с;  $A_1 = 0,015$  МВт;  $f_1 = 0,56$  с<sup>-1</sup>;  $T_2 = -133,43$  с;  $A_2 = 0,077$  МВт;  $f_2 = 0,53$  с<sup>-1</sup>; MAPE = 0,011 МВт, СКВ = 0,016 МВт.

Відповідно до отриманих значень  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  спостерігається повільно розгойдуваний періодичний процес з двома близькими за значеннями частотами і малою амплітудою  $A_1$ , наближеною до середньої похибки моделювання MAPE. Це свідчить про можливість ефективного моделювання даних на третьому інтервалі також і однокомпонентною функцією апроксимації. Результати такого моделювання за тих самих вихідних умов:  $A_0 = -996,61$  МВт,  $T_1 = 72,71$ с;  $A_1 = 0,103$  МВт;  $f_1 = 0,54$  с<sup>-1</sup>; MAPE = 0,012 МВт, СКВ = 0,017 МВт.

Отже, за похибками MAPE та СКВ результати апроксимації даних перетоку потужності на часовому відрізку 10,54 с – 19,98 с за допомогою одно- та двоскладових функцій є практично ідентичними. Обидва варіанти забезпечують високу точність апроксимації на рівні  $1,2 \cdot 10^{-3}$  % по відношенню до середнього перетоку  $A_0$ . Слід зазначити, що у випадку однокомпонентної функції апроксимації  $T_1 = 72,71 > 0$ , тобто отримана модель процесу є повільно загасаючою. Амплітуда процесу приблизно дорівнює сумі амплітуд двохкомпонентної апроксимації, а частота – зваженої по амплітудах середньої частоті.

Таким чином, для режиму з нормативним запасом стійкості мале тестове збурення не дозволяє виявити і надійно апроксимувати домінуючі компоненти вільних коливань на всьому інтервалі даних. Моделювання слід проводити на фрагментованих відрізках, при цьому задовільною є спрощена (однокомпонентна) апроксимація.

Наявність у вільних коливаннях незагасаючої складової електричної потужності малої амплітуди, яка передається по лінії (рис. 2, 4) при значному запасі стійкості, є наслідком розрахунку збуреного процесу за умови постійності потужності турбіни і не свідчить про порушення стійкості.

### 3. Стійкий режим поблизу границі стійкості ( $K_p = 0$ ).

Режим одержано обважненням 3x200 МВт. Візуальний аналіз перетоку потужності в даному випадку також показав наявність трьох зон, що якісно аналогічні першим двом прикладам. Однак результати розрахунків показали можливість моделювання двохкомпонентною функцією майже всього відрізка (окрім перших 1,5 с) з прийнятною точністю.

Вихідні дані розрахунку функції апроксимації:  $t_0 = 1,54$  с,  $t_{кін} = 19,98$  с, критерій пошуку параметрів – мінімум цільової функції СКВ. Розраховані параметри функції апроксимації на зазначеному інтервалі:  $A_0 = -1097,87$  МВт;  $T_1 = 1,96$  с;  $A_1 = 1,31$  МВт;  $f_1 = 1,11$  с<sup>-1</sup>;  $T_2 = 53,09$  с;  $A_2 = 0,27$  МВт;  $f_2 = 0,55$  с<sup>-1</sup>; MAPE = 0,05 МВт, СКВ = 0,08 МВт.

У графічному вигляді результати апроксимації показано на рис. 6.

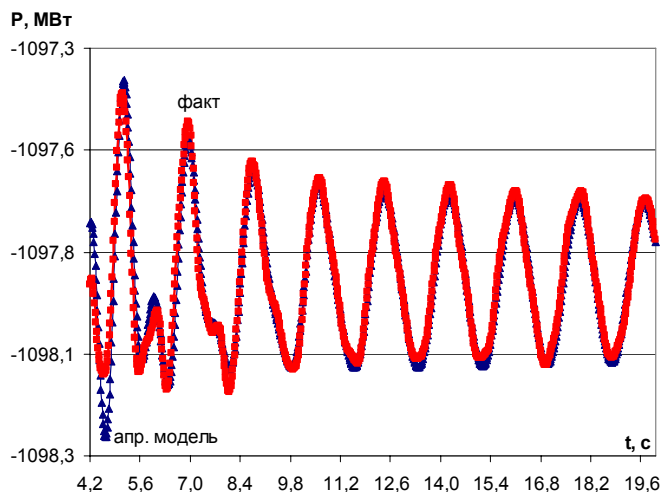


Рис. 6

монічних одноперіодичних коливань з наростаючою амплітудою (рис. 7). Для моделювання обрано початковий процес розхитування 0,72 с ... 10,5 с, що містить п'ять повних періодів. Результати аналізу показали можливість апроксимації зазначеного відрізка однокомпонентною гармонічною функцією. Критерій пошуку параметрів функції апроксимації – мінімум цільової функції. Результати апроксимації:  $A_0 = -1284,43$  МВт;  $T_1 = -2,5$  с;  $A_1 = 1,57$  МВт;  $f_1 = 0,51$  с<sup>-1</sup>; МАРЕ=0,89 МВт; СКВ=1,06 МВт.

Фактичні дані перетоку потужності і отримана модельна функція апроксимації показано на рис. 7. Їхня збіжність свідчить про високу точність апроксимації на всьому обраному інтервалі даних.

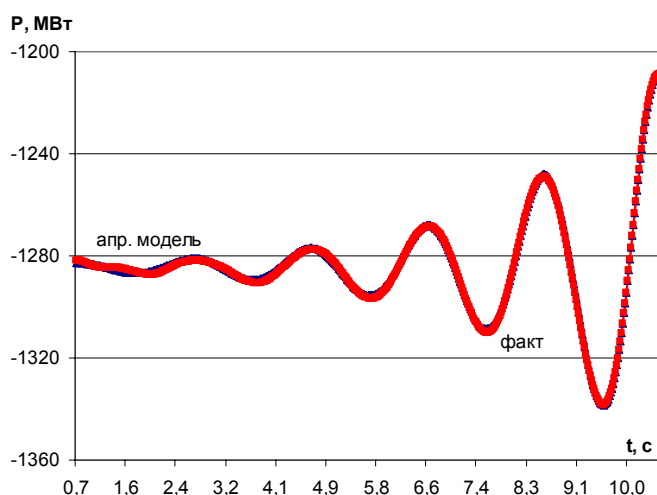


Рис. 7

$T_1 = -2,48$  с) навіть за умови, що для пошуку їхніх параметрів використовувалися мінімізації різних цільових функцій. Початкова амплітуда при другій гармоніці  $A_2$  становить лише 0,0001 МВт і не впливає на висновок щодо коливного порушення стійкості, про яке свідчить наростання першої гармоніки.

Слід відзначити, що компонента коливного процесу з частотою  $\approx 1,1$  с<sup>-1</sup>, яка безпосередньо пов'язана із затуханням малого збурення і проявлялася в попередніх трьох прикладах, в даному випадку не ідентифікується.

Підсумуємо результати дослідження у вигляді таблиці.

#### Висновки

1. Використання гармонічних функцій із експоненційно змінюваною амплітудою дозволяє виконати задовільну апроксимацію вільних коливань електромеханічного руху динамічної моделі ЕЕС, розрахованих після малого збурення.

Отримана апроксимаційна функція складається з швидкозагасаючої гармоніки вищої частоти і початкової амплітуди (на початку процесу) та повільно загасаючої з меншою частотою і амплітудою (на кінці інтервалу даних). Розрахована точність апроксимації становить  $4,5 \cdot 10^{-3}$  % по відношенню до середнього перетоку  $A_0$ , і модельний процес є адекватним реальному на всьому відрізку даних, оскільки  $A_1, A_2 \gg \text{МАРЕ}$ .

4. Режим з коливним порушенням стійкості ОЕС після малого збурення (потужність у вихідному режимі суттєво перевищує границю  $K_p = (1098 - 1284) / 1284 = -0,14$ . Усталений режим до збурення одержано після обважнення  $4 \times 200$  МВт. Візуальний аналіз показав наявність гар-

моніки потужності в лінії для режиму за межею граничної стійкості лежить у діапазоні частот електромеханічних коливань в електроенергетичній системі, а порушення коливної стійкості відбувається внаслідок нестійкості пристроїв автоматичного керування збудженням синхронних генераторів.

Використання двохкомпонентної функції призводить лише до незначного підвищення точності і не є доцільним (отримані параметри апроксимації в цьому випадку:  $A_0 = -1284,43$  МВт;  $T_1 = -2,48$  с;  $A_1 = 1,53$  МВт;  $f_1 = 0,51$  с<sup>-1</sup>;  $T_2 = -0,94$  с;  $A_2 = 0,0001$  МВт;  $f_2 = 1,16$  с<sup>-1</sup>; МАРЕ=0,79 МВт, СКВ=0,94 МВт. При цьому амплітуда, частота і постійна загасання (розгойдування) першої гармоніки практично ідентична однокомпонентній апроксимації ( $f_1 = 0,51$  с<sup>-1</sup>,

Кількісна оцінка запасу стійкості режиму	$K_P = 0,43$	$K_P = 0,10$	$K_P = 0$			$K_P = -0,14$
Кількість функцій апроксимації	2	2	2	1	2	1
Інтервал апроксимації $t_0 \dots t_{кін}$ (с)	0,54 ... 19,98	0,62... 19,98	0,62... 4,16	10,54... 19,98	1,54 ... 19,98	0,72. ... 10,5
Амплітуди гармонік $A_1$ (МВт) $A_2$ (МВт)	0,52 -0,008	2,63 -0,06	2,18 2,34	0,1 —	1,31 0,27	1,57 —
Постійна загасання $T_1$ (с) $T_2$ (с)	4,2 -9,0	0,91 -25,9	1,9 1,8	72,7 —	1,96 53,1	-2,5 —
Оцінка результату, похибка апроксимації, $MAPE/A_0$ , МВт	добре, 0,03/769	задов., 0,12/997	відмінно, 0,12/996	відмінно, 0,01/997	відмінно, 0,05/1098	добре 0,89/1284

2. Спосіб і якість апроксимації модельних процесів після малого збурення суттєво залежить від рівня стійкості режиму, який перевіряється на статичну стійкість. Зокрема:

- для режиму з великим запасом стійкості коливання потужності ефективно апроксимується двохкомпонентною моделлю;
- для режиму з нормативним запасом стійкості, коли потрібна апроксимація по трьох характерних інтервалах, високу точність забезпечують обидві апроксимаційні моделі;
- для стійкого режиму поблизу границі стійкості двохкомпонентна модель апроксимації забезпечує високу точність визначення амплітуди і швидкості загасання основних компонент на усьому інтервалі перевірки стійкості;
- для фізично здійсненого, але нестійкого режиму однокомпонентна апроксимація дає задовільні результати щодо оцінки швидкості наростання амплітуди коливань (саморозхитування системи за рахунок дії АРЗ генераторів).

3. Запропонований спосіб аналізу з використанням загасаючих гармонічних функцій коливань потужності, яка передається по лінії, розрахованих чисельним інтегруванням рівнянь динаміки електромеханічного руху ЕЕС після малого скінченного збурення, має перспективи до використання у програмних засобах оцінки рівня стійкості у перетині ОЕС.

1. Авраменко В.М., Мартинюк О.В., Гурєєва Т.М. Дослідження амплітудно-частотних спектрів активної потужності по лініях електропередачі для визначення рівня стійкості у перетині енергосистеми // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 3. – С. 47-51.

2. Авраменко В.М., Мартинюк О.В., Гурєєва Т.М. Спектральний аналіз коливань потужності і методика моніторингу статичної стійкості енергосистеми // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 5. – С. 52-54.

3. Буткевич О.Ф., Чижевський В.В. Деякі питання побудови інтегрованої системи запобігання коливальному порушенню стійкості об'єднаної енергосистеми // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – № 3. – С. 28-36.

4. Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Рибіна О.Б. Низькочастотні коливання режимних параметрів об'єднаних енергосистем та запобігання системним аваріям // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2014. – № 38. – С. 30-39.

5. Яндутьський О.С., Тимохін О.В., Труніна Г.О., Несстерко, А.Б. Визначення когерентних груп генераторів під час електромеханічних процесів в електроенергетичній системі // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 129-135.

6. Ballance J., Bhargava B., Palayam P., Chen H., Hiebert J. Analysis of power systems oscillations in WECC system using synchro-phasor technology. // 2014 CIGRE Session. – Pp. 2-115.

7. Pavlovskiy V., Lukianenko L., Lenga O., Lambillon V., Rese L. Analysis of Electromechanical Oscillation in the IPS of Ukraine using Eurostag and Digsilent Powerfactory Software Tools // Технічна електродинаміка. – 2015. № 5. – С. 42-51.

## АНАЛИЗ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОЭС УКРАИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ПЕРЕМЕННОЙ АМПЛИТУДЫ

**В.Н. Авраменко**, докт.техн.наук, **А.В. Мартынюк**, канд.техн.наук, **Т.М. Гуреева**

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [avr@ied.org.ua](mailto:avr@ied.org.ua)

*Проведено исследование возможности аппроксимации модельных (рассчитанных) процессов с помощью гармонических функций с затухающей или возрастающей амплитудой для оценки уровня статической устойчивости ЭЭС. Моделирование колебаний мощности линии с помощью одной или двух гармонических функций с экспоненциально переменной амплитудой выполнено на примере реального режима ОЭС Украины, полученного расчетом текущего режима по данным телеметрии с последующим его утяжелением. Исследовалось сечение в составе двух линий 750 кВ и трех транзитов 330 кВ, источником питания которого являются три мощные АЭС с передачей мощности в остродефицитный регион с концентрированной нагрузкой. В переходном процессе, рассчитанном после возмущения близкого к предельному режима, обнаружены две доминантные гармоники: первая - быстро затухающая, вторая - очень медленно затухающая на интервале проверки статической устойчивости ЭЭС. Изменение параметров функций аппроксимации (начальной амплитуды и постоянной времени затухания) на различных этапах утяжеления можно использовать для определения предельного режима сечения. Библи. 7, табл. 1, рис. 7.*

**Ключевые слова:** энергосистема, сечение, мощность по линии, статическая устойчивость, имитационное моделирование, свободные колебания, гармонические функции.

## ANALYSIS OF FLUCTUATIONS STATIC STABILITY OF IPS UKRAINE USING HARMONIC FUNCTIONS WITH VARIABLE AMPLITUDE

**V.M. Avramenko**, **O.V. Martyniuk**, **T.M. Hurieieva**

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: [avr@ied.org.ua](mailto:avr@ied.org.ua)

*The purpose of this work is to investigate the approximation method using a damped harmonic functions (DHF) for power flows on the line in the section of the IPS of Ukraine, to estimate the level of steady state stability in cross-section. The research method is simulation of free oscillations by the calculation of electromechanical transient process after a small disturbance. On the basis of calculations of transients after a small disturbance of the real IPS mode, the approximation functions for modes with different levels of stability are obtained. It is shown the connection of the safety factor, or the excess of the limit flow with the dynamics of the approximation function parameters.*

References 7, table 1, figures 7.

**Key words:** grid, cross-section, steady state stability, simulation, free oscillations, harmonic functions.

1. Avramenko V., Martyniuk A., Hurieieva T. Study of Amplitude-Frequency Spectra of Active Power through Power System Transmission Lines // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 3. – Pp. 47-51. (Ukr)
2. Avramenko V., Martyniuk A., Hurieieva T. Spectral analysis of the power oscillation and monitoring methods static stability of power system // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 5. – Pp. 52-54. (Ukr)
3. Butkevych O., Chyzhevskyi V. Some issues of constructing an integrated system for preventing violation of stability of united power system // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2015. – No 3. – Pp. 48-51. (Ukr)
4. Kyrylenko O., Butkevych O., Rybina O. Low-frequency Oscillations of Interconnected Power Systems' Mode Parameters and Prevention of Power System Failures // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2014. – No 38. – Pp. 30-39. (Ukr)
5. Yandulskyi O.S., Tymokhin O.V., Trunina H.O., Nesterko A.B. Coherent generator group estimation during electromechanical transients in power systems // Visnyk Vinnytskoho Politekhnicnoho Instytutu. – 2015. – No 6. – Pp. 129-135. (Ukr)
6. Ballance J., Bhargava B., Palayam P., Chen H., Hiebert J. Analysis of power systems oscillations in WECC system using synchro-phasor technology. // 2014 CIGRE Session. – Pp. 2-115.
7. Pavlovskiy V., Lukianenko L., Lenga O., Lambillon V., Rese L. Analysis of Electromechanical Oscillation in the IPS of Ukraine using Eurostag and Digsilent Powerfactory Software Tools // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 5. – Pp. 42-51.

Надійшла 09.12.2016  
Остаточний варіант 21.04.2017