

УДК 621.311:681.3

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ СПЕКТРІВ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
ПО ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ СТІЙКОСТІ
У ПЕРЕТИНІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Авраменко В.М., докт.техн.наук, Мартинюк О.В., канд.техн.наук, Гурсєва Т.М.
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. e-mail: samark@ukr.net

Досліджено спектри електромеханічних коливань (з частотою 0,5...2,0 Гц) і можливості їхнього використання для моніторингу поточного запасу статичної стійкості у перетині ЕЕС. Як метод дослідження використовується перетворення Фур'є. Розрахунки спектрів для реально зареєстрованого процесу зміни активної потужності по лінії 750 кВ показали відсутність домінуючої частоти в режимі, який має запас з активної потужності 28%. Виконані також розрахунки спектрів для модельних процесів, одержаних за допомогою програмного комплексу АВР-84, в якому реалізована нелінійна модель динаміки ЕЕС, для послідовно обважнених режимів. Запропонована методика моніторингу рівня стійкості у перетині ОЕС, яка базується на on-line розрахунках коефіцієнта загасання вільних коливань ЕЕС. Бібл. 4, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: перетоки потужності, власні коливання, спектральний аналіз, перетворення Фур'є, запас стійкості, енергосистема.

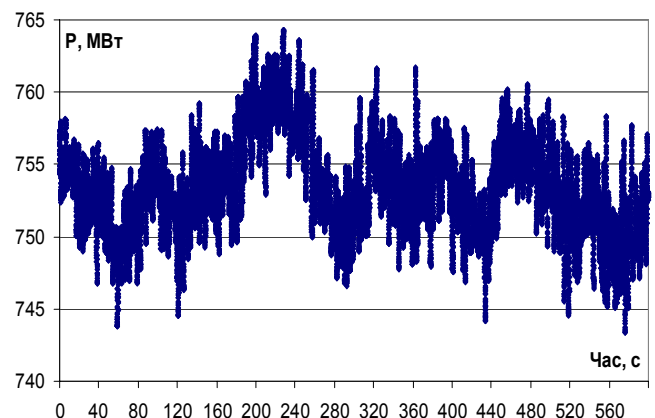
Вступ. Великі і малі збурення в енергосистемі можуть спричинити тривалі слабо згасаючі коливання активної потужності по лініях і навіть порушення стійкості синхронних генераторів, об'єднаних електричною мережею в систему. Дослідження таких процесів є актуальною задачею для великих енергетичних об'єднань і створення засобів для їхнього аналізу є метою даної роботи.

Зростання амплітуди коливань, спричинених малими збуреннями (коливне порушення статичної стійкості електроенергетичної системи), виникає внаслідок співпадання, резонансу частоти періодичних зовнішніх збурень з частотою вільних електромеханічних коливань електроенергетичної системи (ЕЕС). З досвіду розрахунків електромеханічних перехідних процесів для перевірки динамічної стійкості ЕЕС відомо, що згадана вище частота знаходиться в діапазоні 0,5...2,0 Гц. Часто ці коливання називають низькочастотними (наприклад, [3]), для них визначальною є механічна інерція обертальних мас агрегатів генератор-турбіна. Частоти вільних коливань можна одержати шляхом розрахунку власних чисел характеристичної матриці, яка в операторному вигляді відображає систему лінеаризованих рівнянь збуреного руху ЕЕС [2].

Інший спосіб – це прямий розрахунок перехідного процесу після імпульсного збурення з подальшим застосуванням перетворення Фур'є [4]. Саме такий спосіб вибраний нами для дослідження амплітудно-частотних спектрів активної потужності по лініях ЕЕС. Його перевага полягає в тому, що в частині застосування перетворення Фур'є його можна використати і для аналізу реально зареєстрованих процесів. Складність цього аналізу полягає в тому, що реальний процес є наслідком неперервних збурень як з боку навантаження, так і з боку оперативного і автоматичного керування режимом шляхом зміни потужності генераторів.

Дослідження реального процесу. На рис. 1 показано зареєстрований електровимірювальним пристроєм «Регіна» з дискретністю 0,02 с графік активної потужності по лінії електропередачі 750 кВ Хмельницька АЕС-Київська для 10-хвилинного інтервалу 9:10:00...9:20:00 11.11.2013 р.

Візуальний аналіз показує наявність інфранизькочастотної нерегулярної складової досить значної амплітуди, яку можна пов'язати із керуванням потужністю станцій, і коливання потужності, характер яких відповідає електромеханічним коливанням роторів синхронних генерато-



рів, що можна побачити на рис. 2, де показаний інтервал 9:10:00...9:10:10.

Реальний процес не є періодичним і перетворення Фур'є дає апроксимацію заданого часового ряду за передумови, що заданий інтервал є частиною періодичного процесу. Таким чином, локально виконане перетворення Фур'є принципово не може дати загасання коливань або їхнє зростання. Це можна визначити, лише розглядаючи послідовні інтервали як усталені гармонійні. Однак, для реального процесу, в якому відсутня домінуюча гармонійна складова із загасанням або наростанням коливань, це зробити неможливо. Підтвердженням цього є знайдені перетворенням Фур'є спектри, в яких відсутня домінуюча частота. Функція апроксимації вихідних даних, що використовувалася, має наступний вигляд:

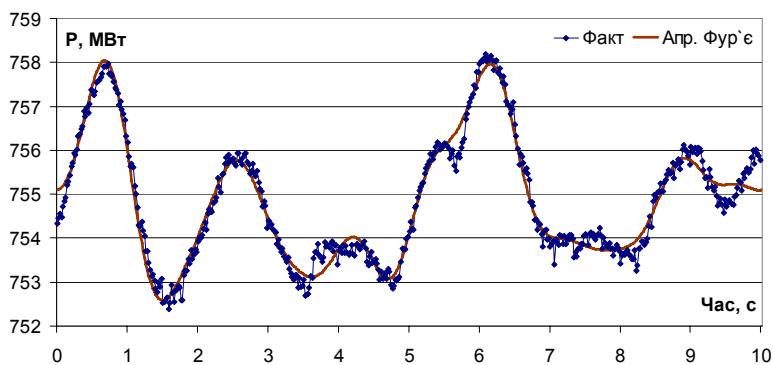


Рис. 2

$$P = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{10} (a_i \cos(2\pi\nu_i t) + b_i \sin(2\pi\nu_i t)),$$

де $i = 1 \dots 10$, ν_i – перші 10 частот, що відповідають найбільшим значенням періодограми, a_i, b_i – розраховані коефіцієнти при відповідних тригонометричних функціях, t – час (с), для якого розраховується значення перетoku потужності.

В табл. 1 наведено амплітудно-частотні характеристики апроксимації процесу рядом Фур'є для інтервалу 9:10:00...9:10:10 та інтервалу 9:18:55...09:19:05. Для оцінки величини впливу окремих гар-

монік розраховувалася загальна амплітуда їхніх коливань за формулою $A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$. Розраховані значення константи $a_0/2$ становлять 754,86 МВт та 752,66 МВт для першого та другого інтервалів відповідно.

Таблиця 1

Інтервал 9:10:00...9:10:10				Інтервал 9:18:55...09:19:05			
ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт	ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт
0,20	0,62	0,79	1,00	0,60	1,54	0,38	1,59
0,30	0,56	-0,77	0,95	0,50	1,48	0,33	1,52
0,60	-0,74	0,11	0,75	0,10	-1,17	0,38	1,24
0,40	-0,20	0,65	0,68	0,40	0,66	0,95	1,16
0,50	-0,04	0,68	0,68	0,30	-0,10	0,87	0,88
0,10	0,28	-0,40	0,49	0,20	0,36	-0,49	0,60
0,90	-0,08	-0,32	0,33	0,80	0,30	-0,37	0,48
0,70	-0,25	-0,02	0,25	0,70	-0,38	-0,06	0,39
1,10	0,08	-0,20	0,21	0,90	0,28	0,03	0,28

вань. Це дозволяє побудувати методику оперативного моніторингу рівня стійкості з використанням off-line знайдених залежностей між запасом стійкості і мірою загасання коливань на основній частоті. Інформаційну основу моніторингу створює періодичне оцінювання стану ОЕС з 10-хвилинним інтервалом. Для цього усталеного режиму виконується розрахунок перехідного процесу після тестового збурення з використанням нелінійної моделі динаміки ЕЕС, як у розрахунках динамічної стійкості ЕЕС [1] з врахуванням автоматичного регулювання збудження синхронних генераторів і динамічних характеристик навантаження, а для одержаного перехідного процесу визначається перетворенням Фур'є основна гармоніка для двох послідовних інтервалів і нарешті коефіцієнт згасання коливань

$$K_s = (A_2 - A_1) / A_1 \Delta t_{21},$$

де A_1 – амплітуда гармоніки для 1-го інтервалу; A_2 – амплітуда гармоніки для 2-го інтервалу; Δt_{21} – зміщення у часі 2-го інтервалу відносно 1-го.

Моделльні розрахункові дослідження виконані у реальному режимі об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України оцінюванням стану (розрахунком усталеного режиму по даних телеметрії) на 19.30 год. 2.03.2012 р. Розрахункова схема має 719 вузлів, 60 генераторів (електростанцій, енергоблоків). Щоб кількісно наблизити активну потужність по лінії 750 кВ Хмельницька АЕС–Київська до

Дослідження модельних процесів. Модельний процес можна одержати як результат конкретного тестового збурення. На відміну від [4], як тестове ми використовуємо збурення, величина якого вибрана такою, щоб амплітуда і характер коливань були подібні до характеристик реальних електромеханічних коли-

зарєєстрованого 11.11.2013 р. перетоку, додатково була вимкнена (виведена в ремонт) лінія 330 кВ Шепетівка–Житомир. У розрахунках перехідних процесів, які виконувалися за допомогою програмного комплексу ІЕД НАН України АВР-84, у вузлах Центральної ЕЕС враховувалися динамічні характеристики навантаження з часткою асинхронних двигунів $K_{ад}=0,5$. Для усіх АЕС і частини теплових електростанцій в явному вигляді враховувалося автоматичне регулювання збудження. Тестовим збуренням було вимикання навантаження 20 МВт на підстанції Октябрська (це 5,2% навантаження підстанції у розрахунковій схемі) з одночасним зменшенням на 22 МВт за 0,2 с потужності енергоблоку ХАЕС.

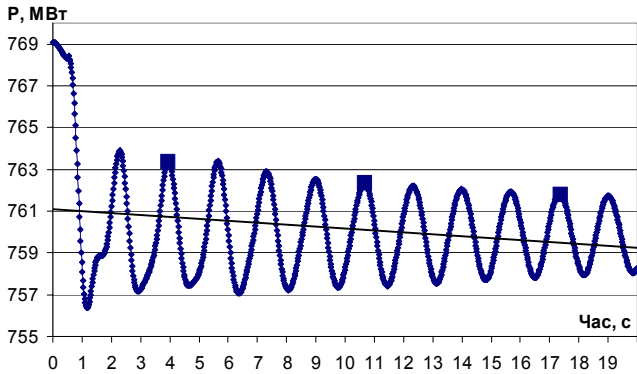


Рис. 3

На рис. 3 показано вихідний 20-секундний графік активної потужності по лінії $P_{л}$ дискретністю 0,02 с. Для проведення апроксимації за допомогою розкладу в ряд Фур'є серед вихідних даних обрано два інтервали: інтервал 1 – [3,94; 10,64], інтервал 2 – [10,66; 17,36]. У кожному з інтервалів міститься 336 миттєвих значень перетоків потужності. Початок і кінець обраних інтервалів виділено на рис. 3.

За результатами спектрального аналізу обрано перші десять складових ряду Фур'є, що відповідають найбільшим значенням періодограми. Результати апроксимації двох інтервалів представлено на рис. 4, 5 відповідно. Згідно з графіками забезпечується висока точність апроксимації вихідного ряду даних, окрім початку і кінця інтервалів.

ного ряду даних, окрім початку і кінця інтервалів.

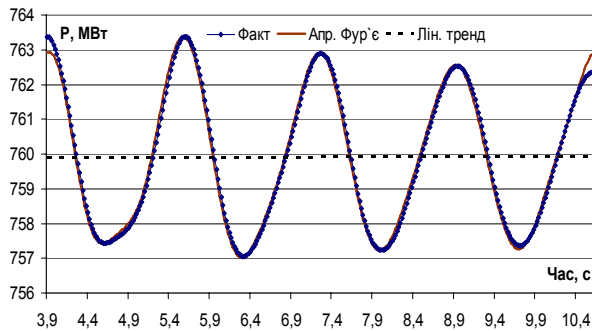


Рис. 4

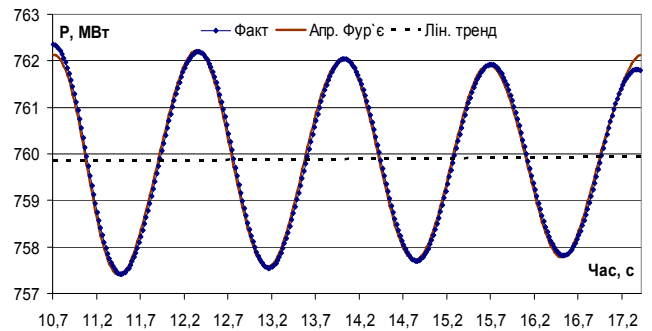


Рис. 5

Інтервал 1				Інтервал 2			
ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт	ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт
0,60	2,76	-0,28	2,78	0,60	2,19	-0,35	2,22
1,19	0,27	0,25	0,37	0,74	0,02	0,10	0,10
0,74	-0,08	0,15	0,17	1,19	-0,01	0,09	0,09
1,04	0,04	-0,12	0,13	0,45	0,02	-0,07	0,07
1,34	0,01	0,10	0,11	0,89	0,01	0,05	0,05

р'є для наведених інтервалів наведено в табл. 2. Розраховані значення константи $a_0/2$ для обох інтервалів становлять 759,89 МВт. Відповідно до табл. 2, на відміну від реального, в модельному процесі при вказаному збуренні спостерігається поява однієї домінуючої гармоніки з частотою 0,60 Гц.

Коефіцієнт загасання і постійна часу загасання основної гармоніки становлять відповідно

$$K_3 = \frac{A_2 - A_1}{A_1 \Delta t} = \frac{2,22 - 2,78}{2,78 * 336 * 0,02} = -0,0299 \text{ c}^{-1}, \quad T = \frac{1}{|K_3|} = \frac{1}{|-0,0299|} = 33,5 \text{ c}.$$

На рис. 6 показано графік $P_{л}(t)$ для обваженого режиму. Дискретність наведених даних перетоків потужності складає 0,02 с. Обваження здійснювалося покроковим зменшенням потужності Трипільської ТЕС і Київських ТЕЦ-5 і ТЕЦ-6 з одночасним збільшенням потужності, яку виробляють Хмельницька і Рівненська АЕС.

Слід відзначити, що на відміну від вихідної вибірки, у виділених інтервалах відсутній лінійний тренд перетоків потужності. Амплітудно-частотні характеристики перших п'яти гармонік розкладу даних в ряд Фур'є

Аналогічно до попередніх розрахунків, з вихідних даних обрано два рівні інтервали, виділені на рис. 6, та виконано спектральний розклад процесу перетоку потужності у ряд Фур'є. Загальна

Інтервал 1				Інтервал 2			
ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт	ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт
0,58	4,50	-0,48	4,53	0,58	4,29	-0,53	4,33
1,17	0,43	-0,03	0,43	1,17	0,05	0,02	0,05
1,29	0,06	0,16	0,17	0,47	0,01	-0,03	0,03
0,82	0,08	-0,09	0,12	0,70	0,00	0,03	0,03
1,05	-0,04	-0,08	0,09	1,29	0,01	0,02	0,02

кількість значень перетоків потужності в кожному інтервалі – 428. Амплітудно-частотні характеристики розкладу даних у ряд Фур'є для обох інтервалів наведено в табл. 3. Розраховані значення константи $a_0/2$ для

обох інтервалів становлять 954,5 МВт.

Коефіцієнт загасання і постійна часу загасання основної гармоніки становлять відповідно

$$K_3 = \frac{4,33 - 4,53}{4,53 * 428 * 0,02} = -0,00516 \text{ с}^{-1},$$

$$T = (|-0,0051|)^{-1} = 193,88 \text{ с}.$$

Був виконаний ще один крок обважнення, графік збуреного режиму якого та виділені на ньому інтервали показано на рис. 7, а амплітудно-частотні характеристики розкладу даних у ряд Фур'є – в табл. 4. Розраховані значення константи $a_0/2$ для обох інтервалів становлять 1066,27 МВт.

Коефіцієнт загасання і постійна часу загасання основної гармоніки становлять відповідно

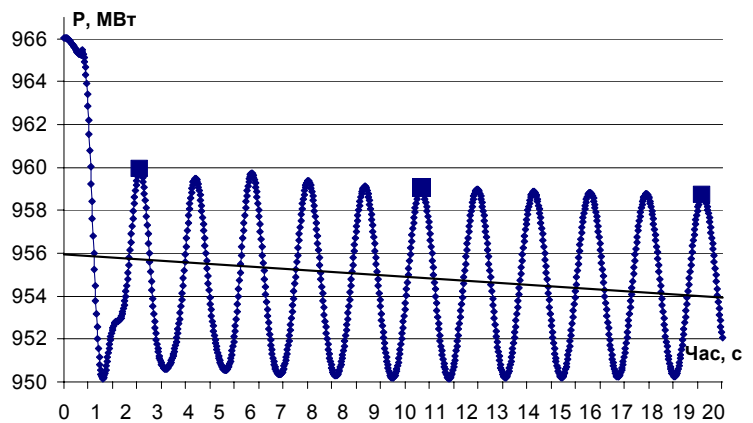


Рис. 6

Інтервал 1				Інтервал 2			
ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт	ν , Гц	a , МВт	b , МВт	A , МВт
0,57	14,58	-1,31	14,64	0,57	16,22	-4,63	16,87
0,43	0,50	0,26	0,56	0,71	-0,60	-0,25	0,65
0,85	-0,44	-0,31	0,54	0,43	0,61	0,16	0,63
0,71	-0,51	-0,11	0,52	0,28	0,34	0,07	0,35
0,99	-0,17	-0,46	0,49	0,85	-0,33	-0,11	0,34

$$K_3 = \frac{16,87 - 14,64}{14,64 * 352 * 0,02} = 0,0216 \text{ с}^{-1},$$

$$T = (0,0216)^{-1} = 46,22 \text{ с}.$$

Тут $K_3 > 0$, отже, коливання мають наростаючу амплітуду.

Лінійною інтерполяцією для двох точок

$P_{л1}=955$ МВт, $K_3=-0,00516$ і $P_{л2}=1066$ МВт, $K_3=0,0216$ знаходимо (в точці $K_3=0$) потужність для граничного режиму $P_{гр}=975$ МВт.

Таким чином, запас стійкості за активною потужністю для $P_{л1}=760$ МВт (середнє значення перетоку потужності, рис. 4–5) становить $K_p=(975-760)/760=0,283$, для обважненого режиму (середнє значення перетоку потужності $P_{л2}=955$ МВт) становить $K_p=(975-955)/955=0,022$.

Висновки. В реальному процесі зміни активної потужності по лініях у перетині енергосистеми, якщо режим має достатній запас стійкості, неможливо визначити домінантні частоти. Вони проявляються лише тоді, коли відстань до границі

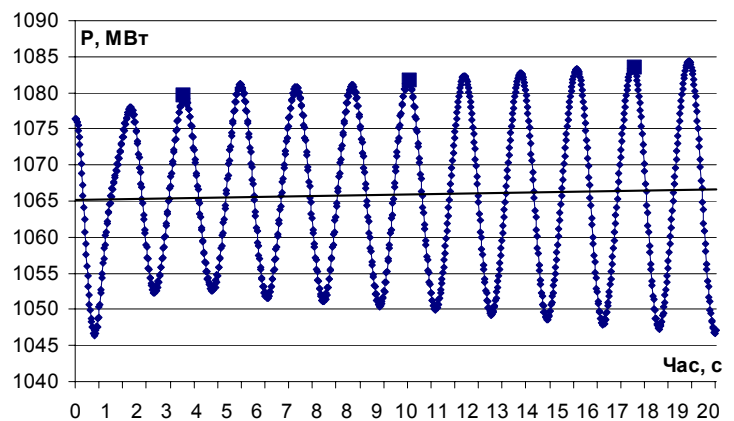


Рис. 7

стійкості (запас стійкості) стає настільки малою, що вимагає негайних дій по розвантаженню критичного перетину. З цим завданням краще впорається автоматика, ніж оперативний персонал.

Off-line розрахунками можна знайти кількісний зв'язок між запасом стійкості і мірою загасання коливань на основній частоті, який можна використати для оперативного моніторингу рівня стійкості шляхом on-line розрахунків амплітудно-частотних спектрів коливань після тестових збурень. Проте необхідно зауважити, що визначення впливу видів збурень, а також параметрів динамічних характеристик навантаження та АРВ синхронних генераторів потребує окремого дослідження.

1. Авраменко В.Н. Модели, методы и программные средства для расчета и анализа переходных режимов и устойчивости ЭЭС // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2007. – Вип. 18. – С. 12-26.

2. Буткевич О.Ф. Проблемно-орієнтований моніторинг режимів ОЕС України // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 5. – С. 39-52.

3. Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Рибіна О.Б. Низькочастотні коливання режимних параметрів об'єднаних енергосистем та запобігання системним аваріям // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2014. – Вип.38. – С. 30-39.

4. Яндутьський О.С., Марченко А.А., Мацейко В.В. Дослідження властивостей низькочастотних коливань на основі синхронізованих векторних вимірів // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 74-76 .

УДК 621.311:681.3

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО ЛИНИЯМ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ УСТОЙЧИВОСТИ В СЕЧЕНИИ ЭЭС

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

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: samark@ukr.net

Исследованы спектры электромеханических колебаний (с частотой 0,5...2,0 Гц) и возможности их использования для мониторинга текущего запаса статической устойчивости в сечении ЭЭС. В качестве метода исследования используется преобразование Фурье. Расчеты спектров для реально зарегистрированного процесса изменения активной мощности по линии 750 кВ показали отсутствие доминантной частоты в режиме, имеющем запас по активной мощности 28%. Выполнены также расчеты спектров для модельных процессов, полученных расчетом с помощью программного комплекса АРВ-84, в котором реализована нелинейная модель динамики ЭЭС, для последовательно утяжеленных режимов. Предложена методика мониторинга уровня устойчивости в сечении ЭЭС, основанная на on-line расчетах коэффициента затухания свободных колебаний ЭЭС. Библ. 4, табл. 5, рис. 7.

Ключевые слова: перетоки мощности, собственные колебания, спектральный анализ, преобразование Фурье, запас устойчивости, энергосистема.

STUDY OF AMPLITUDE-FREQUENCY SPECTRA OF ACTIVE POWER THROUGH POWER SYSTEM TRANSMISSION LINES

V.Avramenko, A.Martyniuk, T.Hurcieieva

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: samark@ukr.net

The purpose of this paper is to study the spectra of electromechanical oscillations (within 0.5 ... 2.0 Hz frequency range) and the possibility of using them to monitor the current steady state stability margin of electric power system (EPS). The research method applied for the study is the Fourier transform. The calculations of the spectra for the real process showed no dominant frequency. The calculations of the spectra for the model processes obtained by the calculation, using a nonlinear dynamics model of EPS, were carried out as well. The calculations were performed for the real-state evening peak of the United power system of Ukraine. It is shown dependency of the stability margin factor with decay coefficient. It is suggested to perform the real-time monitoring of the stability level by calculation of the electromechanical transient process after the test disturbance for this state and determination of the Fourier transform and the decay coefficient on its basis. References 4, tables 5, figures 7.

Key words: power flows, free oscillations, spectrum analysis, Fourier transform, stability margin, electric power system.

1. Avramenko V.N. Models, methods and software for calculation and analysis of electric power systems transient states and stability // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2007. – Vypusk 18. – Pp. 12-26. (Rus)

2. Butkevych O.F. Problem-oriented monitoring of Ukrainian IPS operation conditions // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2007. – No 5. – Pp. 39-52. (Ukr)

3. Kyrylenko O.V., Butkevych O.F., Rybina O.B. Low-frequency oscillations of interconnected power systems' mode parameters and prevention of power system failures // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2014. – Vypusk 38. – Pp. 30-39. (Ukr)

4. Yandulskiy O.S., Marchenko A.A., Matseiko V.V. Investigation of properties of low frequency oscillations using synchrophasor measurements // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 5. – Pp. 74-76. (Ukr)

Надійшла 25.12.2014
Остаточний варіант 16.02.2015