

В. В. Мацейко

ДЕМПФУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

Розглянуто актуальні питання дослідження низькочастотних коливань потужності в об'єднаній електроенергетичній системі (ОЕС) України в умовах упровадження сучасних систем моніторингу перехідних режимів (СМПР). Проаналізовано методи та засоби зменшення впливу низькочастотних коливань на режими роботи ОЕС шляхом їх демпфування. Проведено моделювання режимів роботи енергосистем з тиристорною установкою поздовжньої компенсації (ТУПК) та аналіз впливу ТУПК на демпфування низькочастотних коливань потужності.

Ключові слова: *низькочастотні коливання, моніторинг перехідних режимів, демпфування, системи гнучкої передачі змінним струмом, тиристорна установка поздовжньої компенсації.*

Вступ

Упровадження нових генерувальних потужностей, збільшення навантаження електроенергетичних систем (ЕЕС), проведення організаційно-технічних заходів, спрямованих на модернізацію, економічний і технологічний розвитку призводять до того, що об'єднані електроенергетичні системи (ОЕС) набувають нових властивостей, серед яких пов'язані з можливістю порушення їхньої стійкості за рахунок появи низькочастотних загальносистемних коливань режимних параметрів, які можуть зумовити значні соціально-економічні втрати. Наявність низькочастотних коливань (НЧК) може призвести до порушення стійкості й значно знизити допустимі перетоки потужності в системі [1]. Через це дослідження методів і засобів зменшення впливу НЧК на режими роботи ЕЕС є одним із основних завдань диспетчерського управління.

Це завдання є актуальним, особливо для ОЕС України, яка характеризується наявністю потужних ЕЕС, пов'язаних між собою відносно слабкими міжсистемними зв'язками. Крім того залучення енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС), а також додаткових гідроагрегатів (ГА) гідроелектростанцій (ГЕС) до автоматичного вторинного регулювання частоти та потужності, а енергоблоків ТЕС – до первинного регулювання з метою підвищення ефективності роботи ОЕС України створить високу ймовірність появи небезпечних НЧК потужності за неналежного налаштування регуляторів. До того ж, здійснення ефективного демпфування коливань потужності є однією з обов'язкових вимог асоціації ENTSO-E щодо можливості реалізації паралельної роботи ОЕС України з енергетичним об'єднанням європейських країн.

Особливу увагу цьому питанню почали приділяти з упровадженням систем моніторингу перехідних режимів (СМПР), які створили нові можливості виявлення НЧК як в режимі off-line, так і в on-line режимі [2]. Це, насамперед, пов'язано з періодом дискретизації даних, з якою здійснюється синхронна реєстрація, та можливістю зазначених систем із високою точністю відображати зміну режимних параметрів. На сьогодні в ОЕС України розміщено 24 пристрої СМПР типу Регіна-Ч [3] на двох електростанціях та 22-х підстанціях (ПС) напругами 330 – 750 кВ, які утворюють систему моніторингу 75 повітряних ліній (ПЛ) класами напруг 220-750 кВ.

Проведені експериментальні дослідження з використанням синхронізованих вимірів із пристроїв Регіна-Ч підтвердили появу НЧК потужності в перетинах ОЕС України під час виникнення значних збурень у системоутворювальній мережі, серед яких і небезпечні з погляду порушення коливальної стійкості, що потребує досліджень з демпфування зазначених НЧК [4].

Мета роботи полягає в аналізі шляхів зменшення впливу НЧК на режими роботи енергосистем за рахунок здійснення демпфування на станційному та мережевому рівнях; Наукові праці ВНТУ, 2014, № 4

розробці математичної моделі автоматичної системи керування тиристорної установки поздовжньої компенсації (ТУПК) в програмному середовищі PowerFactory; проведенні досліджень режимів роботи енергосистеми з ТУПК та аналізі впливу ТУПК на демпфування низькочастотних коливань потужності.

Методи та засоби зменшення впливу НЧК на режими роботи ОЕС шляхом їхнього демпфування

Проаналізовано шляхи зменшення впливу низькочастотних коливань на режими роботи ЕЕС за допомогою реалізації комплексного підходу демпфування коливань. Комплексний підхід полягає в забезпеченні демпфуванні коливань на станційному та мережевому рівнях ОЕС.

Ефективне налаштування засобів регулювання генераторів, модернізація наявних систем збудження синхронних генераторів та застосування системних стабілізаторів PSS забезпечують станційний рівень демпфувань коливань, а впровадження систем гнучкої передачі змінним струмом (ГПЗС) та вставок постійного струму створюють мережевий рівень демпфування [5].

Одним із пріоритетних засобів підвищення ефективності роботи найбільших енергосистем (ЕС) світу є впровадження у практику їх експлуатації систем ГПЗС. Ці системи дозволяють адаптивно регулювати основні системні параметри передачі змінного струму і в реальному масштабі часу досягати найкращих характеристик передачі потужності [6].

Низка робіт українських фахівців направлена на дослідження ефективності впровадження систем ГПЗС, а саме: статичних тиристорних компенсаторів (СТК) в ОЕС України [7], результати яких наочно відображають переваги застосування цих пристроїв та рекомендації щодо їх установа. Питання інтеграції ТУПК в ЕЕС ОЕС України також висвітлено в деяких роботах, але досліджень у цьому напрямку значно менше, тому виконаємо аналіз та моделювання роботи ТУПК.

ТУПК являє собою ємнісний компенсатор, до складу якого входить поздовжня батарея конденсаторів, що шунтуються тиристорно керованим реактором з метою плавного регулювання реактивного опору. Для визначення впливу ТУПК на підвищення пропускної здатності ЛЕП та можливості демпфувань коливань перетоків потужності в програмному середовищі PowerFactory виконаємо моделювання процесів на прикладі 14-вузлової тестової схеми IEEE, яка наведена на рис. 1.

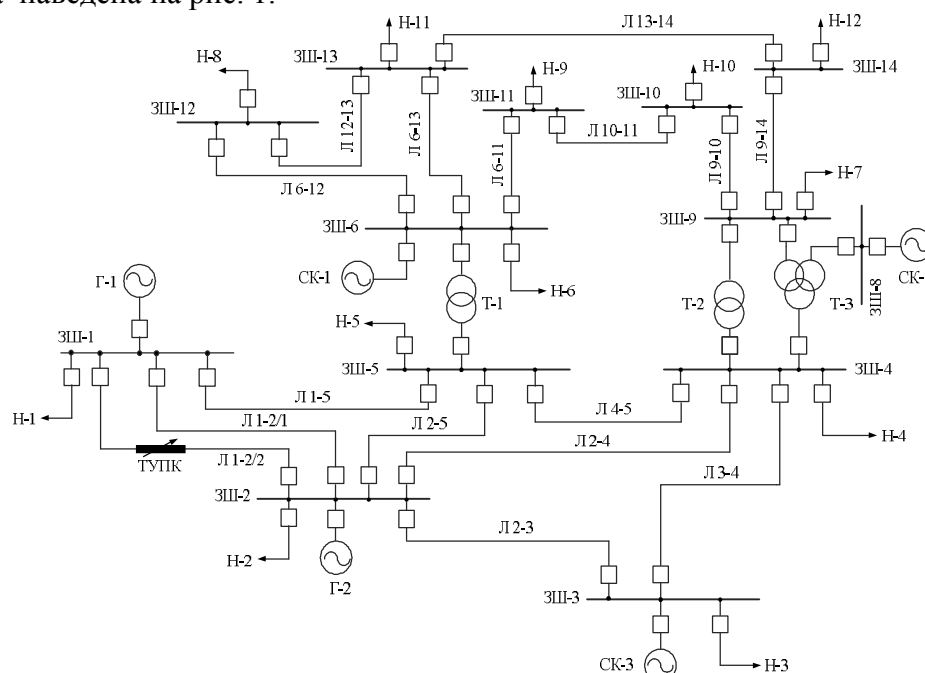


Рис. 1. 14-вузлова тестова схема IEEE зі встановленим ТУПК

Для моделювання розроблено автоматичну систему керування тиристорною установкою поздовжньої компенсації, яка представлена у [8]. У моделі ЕС враховані системи автоматичного керування на різних рівнях управління. Станційний рівень автоматичних систем керування представлений автоматичними регуляторами збудження (АРЗ) генераторів і стабілізаторами ЕС, а мережевий рівень – регуляторами ТУПК.

Оцінка якості функціонування систем ГПЗС поздовжньої компенсації

Збільшення пропускної здатності ЛЕП – 220кВ 1-2/2, реактивний опір якої складає 65,205 Ом, залежить від величини ступеня компенсації k_C встановленого ТУПК. Загальний опір ТУПК складається з постійного опору конденсатора та змінного опору реактора і визначається як:

$$X_{ТУПК} = \frac{X_c \cdot X_l}{X_c + X_l},$$

$$0,3X_{ЛЕП} \leq X_{ТУПК} \leq 0,7X_{ЛЕП}$$

$$20\text{ Ом} \leq X_{ТУПК} \leq 45\text{ Ом}$$

Дослідження ефективності демпфування коливань перетоку активної потужності по ЛЕП 1-2/2 за допомогою ТУПК виконано для випадків виникнення збурень різної величини.

Розроблена модель автоматичної системи керування ТУПК містить контролер демпфування коливань, який у процесі моделювання перехідних процесів ЕЕС був у ввімкненому та вимкненому положеннях. Зміна перетоку активної потужності по ЛЕП 1-2/2 при:

- збільшенні споживання активної потужності на вузловій ЗШ-2 на 100% (рис. 5);
- збільшенні споживання реактивної потужності на вузловій ЗШ-5 на 12 Мвар (рис. 6);
- вимкненні трансформатора Т_1 між вузловими ЗШ-5 та ЗШ-6 (рис. 7);
- виникненні трифазного короткого замикання тривалістю 1 с на ЗШ-5 (рис. 8).

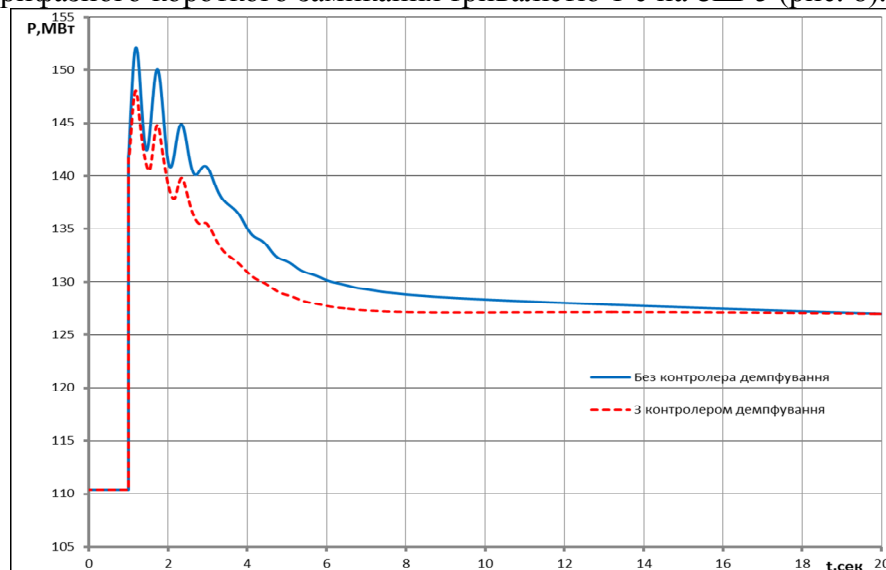


Рис. 2. Зміна активної потужності під час збільшення споживання активної потужності на вузловій ЗШ-2 на 100%

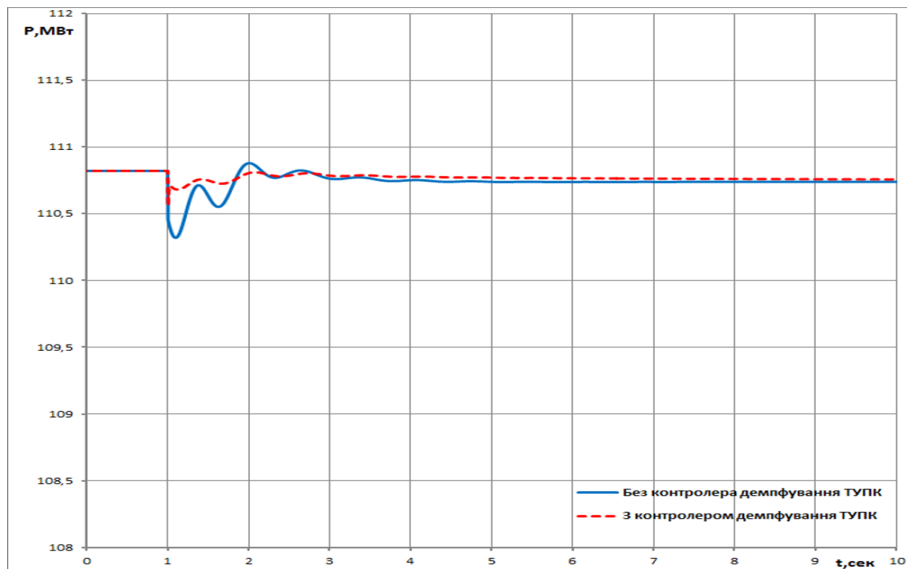


Рис. 3. Зміна активної потужності під час збільшення споживання реактивної потужності на вузловій ЗШ-5 на 12 МВар

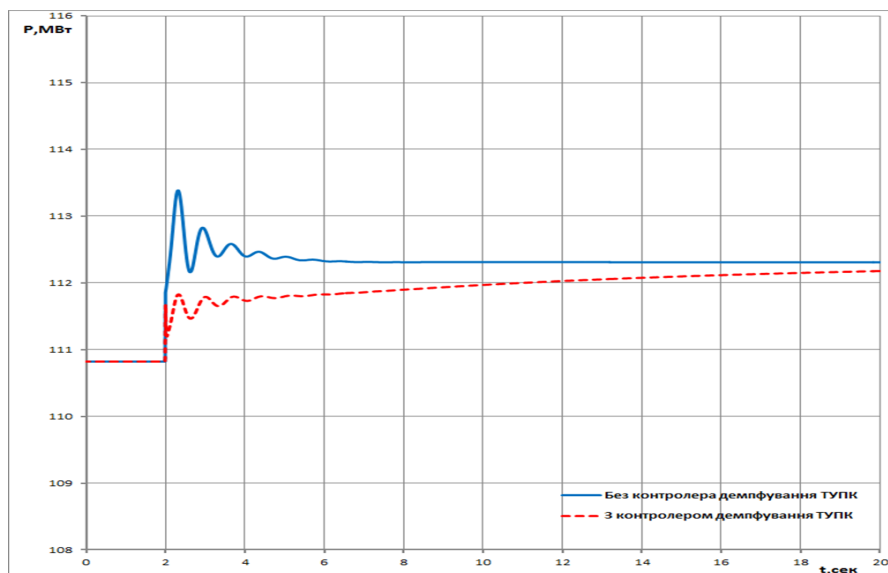


Рис. 4. Зміна активної потужності під час вимкнення трансформатора T_1 між вузловими ЗШ-5 та ЗШ-6

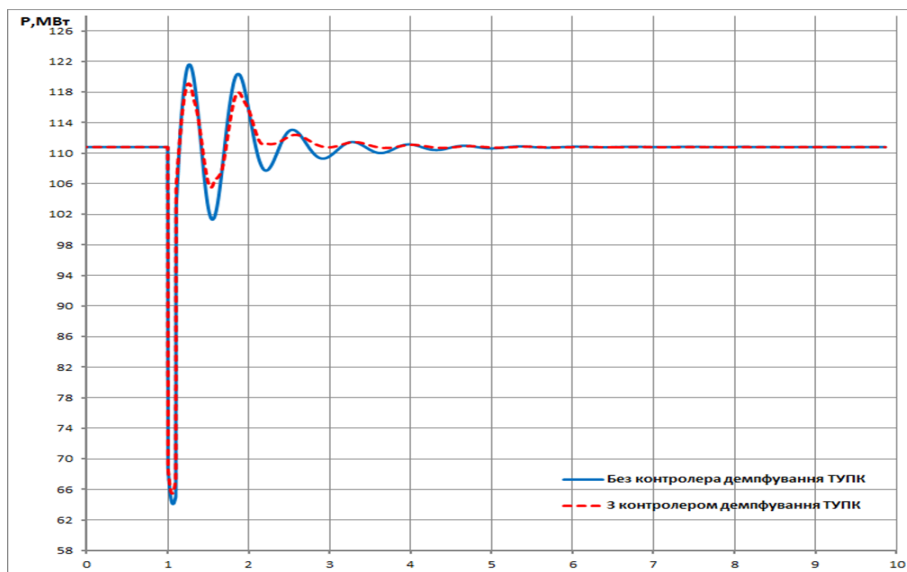


Рис. 5. Зміна активної потужності під час виникнення трифазного короткого замикання тривалістю 0,1 с на ЗШ-5

Як видно з представлених рис. 2 – 5, використання ТУПК із запропонованою моделлю регулятора сприяє зменшенню динамічних відхилень та числа коливань перетоку активної потужності, чим забезпечує демпфування коливань у перехідних режимах. Це особливо актуально в умовах завантажених ЛЕП, коли додаткове збільшення перетоку активної потужності може призвести до порушення паралельної роботи ЕС.

Також були проведені дослідження якості функціонування систем ГПЗС поздовжньої компенсації та оцінка їхнього впливу на частотні характеристики перетоку активної потужності на прикладі Південної ЕС ОЕС України. Дослідження виконували з використанням програми PowerFactory.

Загальний вплив установки ТУПК на ЛЕП-330кВ Аджалик – Усатове наочно зображений на рис. 6, де представлено зміну перетоку активної потужності по представленій ЛЕП під час виникнення збурення на Південноукраїнській АЕС (вимкнення одного з блоків 1000 МВт на 50 с після початку моделювання) для трьох випадків роботи поздовжньої компенсації:

- а) ТУПК виведений з роботи;
- б) ТУПК в роботі з увімкненим контролером демпфування;
- в) ТУПК в роботі з вимкненим контролером демпфування.

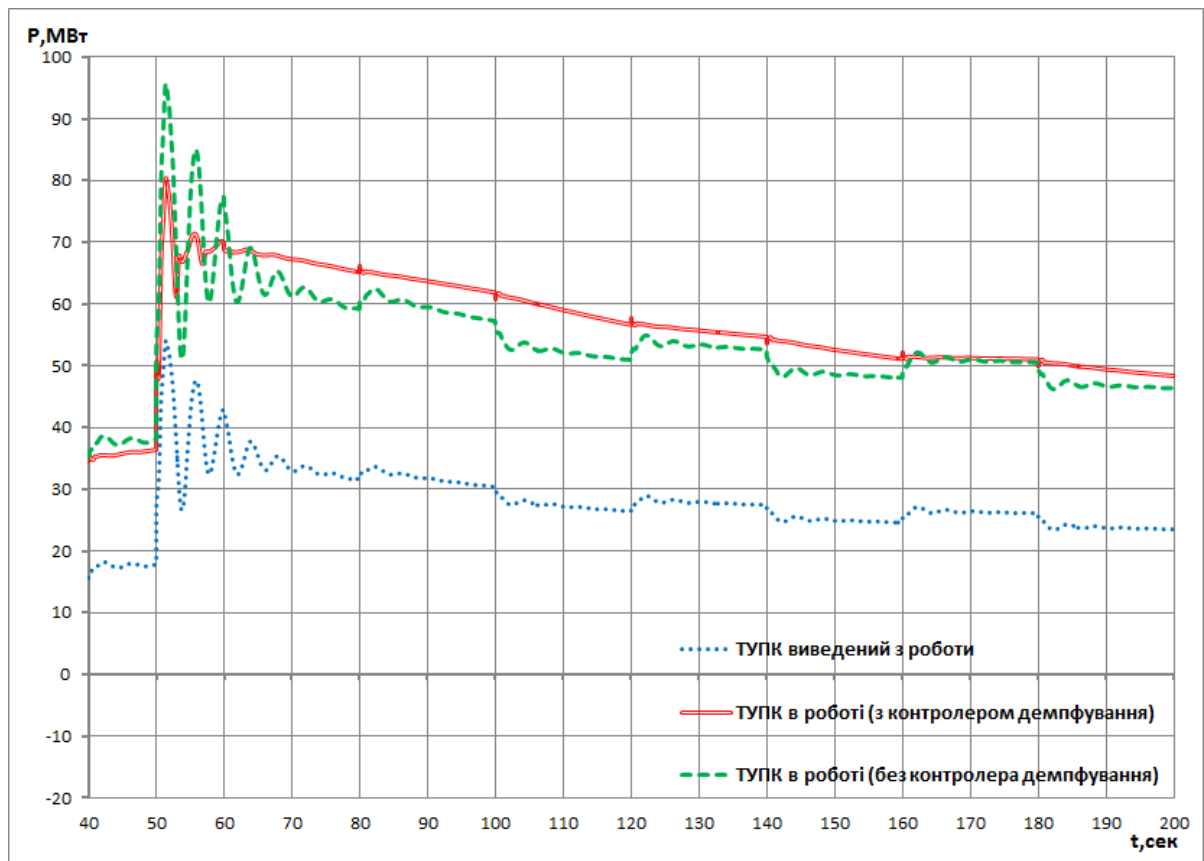


Рис. 6. Зміна активної потужності по ЛЕП-330 кВ Аджалик – Усатове під час вимкнення блоку 1000 МВт на Південноукраїнській АЕС

Аналіз отриманих результатів перетоку активної потужності по ЛЕП-330 кВ Аджалик – Усатове, де встановлено пристрій поздовжньої компенсації, свідчить про збільшення перетоку активної потужності цієї ЛЕП приблизно вдвічі при забезпеченні максимального ступеня компенсації ТУПК. Отже, наочно представлено ефективність застосування ТУПК для збільшення пропускної здатності лінії.

Як видно з рис. 6, час перехідного процесу за використання ТУПК з контролером демпфування зменшується приблизно на 20 с, тобто якісно покращуються динамічні характеристики перехідних процесів ЕЕС з використанням систем ГПЗС.

Аналіз впливу ТУПК на частотні характеристики перетоку активної потужності по ЛЕП, де встановлено пристрій компенсації, проведено відповідно до запропонованого загального алгоритму спектрального аналізу [9] для зазначеного випадку виникнення збурення при введеному в роботу ТУПК з та без контролера демпфування коливань потужності.

Характеристики виявлених домінуючих низькочастотних коливань (НЧК) перетоку активної потужності по ЛЕП-330кВ Аджалик – Усатове під час виникнення збурення на Південноукраїнській АЕС представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Показники домінуючого НЧК активної потужності

	ТУПК без контролера демпфування	ТУПК з контролером демпфування
Частота, Гц	0,293	0,293
Амплітуда, МВт	18,32	14,86
Декремент загасання	1,369	6,405
Логарифмічний декремент загасання	0,314	1,857
Час загасання, с	10,861	1,838
Коефіцієнт загасання	0,092	0,544
Коефіцієнт демпфування	0,05 (5%)	0,295 (29,5%)

У результаті обробки перетоку активної потужності по ЛЕП-330кВ Аджалик – Усатове при введеному в роботу ТУПК без контролера демпфування коливань потужності у випадку виникнення значного збурення розміром вимкнення блоку 1000 МВт на Південноукраїнській АЕС визначено електромеханічні домінуючі низькочастотні коливання з частотами в діапазоні 0,1 – 0,3 Гц, що свідчить про їхню відповідність міжсистемним коливанням в енергосистемі.

Розрахована амплітуда цих коливань є значною та перевищує небезпечне критичне значення, яке складає 10 % від усталеного значення перетоку активної потужності цієї ЛЕП. Розраховані коефіцієнти демпфування та час загасання свідчать про недостатню демпфованість виявлених низькочастотних коливань (коефіцієнт демпфування дорівнює 5 %, час затухання перевищує 10 с).

Використання ТУПК із контролером забезпечує ефективне демпфування низькочастотних коливань перетоку активної потужності по ЛЕП. У цьому випадку спостерігається виникнення в момент аварії домінуючого коливання з частотою 0,293 Гц, яке має міжсистемний характер і є достатньо демпфованим, тобто безпечним з погляду розгойдування режиму системи і порушення коливальної стійкості. При цьому зменшуються динамічні відхилення та число коливань перетоку активної потужності порівняно з попереднім випадком.

Висновки

Отже, гнучке регулювання параметрів режиму, а саме: гнучка зміна в часі реактивного опору, яке здійснюється за допомогою встановленого ТУПК, дозволяє підвищити якість роботи ЕЕС шляхом збільшення пропускної здатності та забезпеченням демпфування коливань потужності по ЛЕП. Ураховуючи особливості ОЕС України, необхідно зазначити, що впровадження систем гнучких передач змінним струмом дозволить розв'язати низку першочергових завдань та дозволить бути у відповідності до вимог європейської системи щодо здійснення ефективного демпфірування коливань потужності.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку пов'язані з:

1. *Забезпеченням комплексного демпфування низькочастотних коливань на станційному та - мережевому рівнях ОЕС:*

- визначення вимог до систем автоматичного регулювання та застосування системних стабілізаторів;
- розробка методики оцінки техніко-економічної ефективності застосування пристроїв

ГПЗС, необхідної для коректного прийняття та обґрунтування рішень щодо місць установлення пристроїв та їхньої характеристик;

2. Удосконаленням та розвитком СМПР в ОЕС України:

- установлення додаткових пристроїв СМПР на основних електростанціях та ПС ОЕС України;

- визначення оптимальних вимог до систем передачі інформації для пристроїв СМПР з метою здійснення моніторингу ОЕС у режимі реального часу;

- моніторинг енергосистем у режимі реального часу (розрахунок характеристик домінуючих коливань у режимі on-line).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Graham Rogers Power System Oscillations / Rogers Graham. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2000. – 328 p.

2. Стогній О. С. Застосування засобів моніторингу перехідних режимів в ОЕС України при розв'язанні задач диспетчерського керування / О. С. Стогній, О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич, М. Ф. Сопель // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 7. – С. 27 – 35.

3. Буткевич О. Ф. Першочергові завдання проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів ОЕС України / О. Ф. Буткевич, О. В. Кириленко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2007. – № 597. – С. 129 – 135.

4. Яндутьський О. С. Аналіз та ідентифікація низькочастотних коливань потужності при виникненні збурень в системоутворюючій мережі ОЕС України / О. С. Яндутьський, В. В. Мацейко // Оптико – електронні інформаційно – енергетичні технології. – 2013. – № 1 (25). – С. 134 – 136.

5. Сорокин Д. В. Централизованная система демпфирования низкочастотных колебаний в энергосистемах на основе применения системы мониторинга переходных режимов [Электронный ресурс] / Д. В. Сорокин // Сборник докладов 4-ой Международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Екатеринбург, издание на CD-диске, CIGRE, 2013. С. 2.2 – 6.

6. Gyugyi Laszlo Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems / Laszlo Gyugyi, Narain G. Hingorani. – Wiley-IEEE Press, 1999. – 452 p.

7. Pavlovsky V. Power Transfer Capability Assessment of Transmission Interfaces with SVC and Load Shedding Systems / V. Pavlovsky, Y. Dolzhenitsa, K. Ushapovskiy // Power and Energy Systems: 9th IASTED Int. Conf., 7-9 Sep., 2009: Proc. – Palma, Spain, 2009. – P. 132 – 136.

8. Яндутьський О. С. Моделювання та аналіз впливу тиристорних установок поздовжньої компенсації на якість роботи електроенергетичних систем / О. С. Яндутьський, В. В. Мацейко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 2 (15). – С. 305 – 309.

9. Яндутьський О. С. Ідентифікація низькочастотних коливань на основі синхронізованих векторних вимірів / О. С. Яндутьський, В. В. Мацейко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 5. – С. 32 – 38.

Мацейко Віталія Вікторівна – аспірант, асистент кафедри автоматизації енергосистем факультету електроенергетичної та автоматики, e-mail: fea@kpi.ua, Vitaliya_M@i.ua.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».