УДК 621.311

В. В. Мацейко

ДЕМПФИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Рассмотрены актуальные вопросы исследования низкочастотных колебаний мощности в объединенной электроэнергетической системе (ОЭС) Украины в условиях внедрения современных систем мониторинга переходных режимов (СМПР). Проанализированы методы и средства уменьшения воздействия низкочастотных колебаний на режимы работы ОЭС путем их демпфирования. Проведены моделирование режимов работы энергосистем с тиристорной установкой продольной компенсации (ТУПК) и анализ влияния ТУПК на демпфирование низкочастотных колебаний мощности.

Ключевые слова: *низкочастотные колебания, мониторинг переходных режимов, демпфирование, системы гибкой передачи переменного тока, тиристорная установка продольной компенсации.*

Введение

Внедрение новых генерирующих мощностей, увеличение нагрузки электроэнергетических систем (ЭЭС), проведение организационно-технических мероприятий, направленных на модернизацию, экономическое и технологическое развитие приводят к тому, что объединенные электроэнергетические системы (ОЭС) приобретают новые свойства, в том числе связанные с возможностью нарушения их устойчивости за счет появления низкочастотных общесистемных колебаний режимных параметров, которые могут обусловить значительные социально-экономические потери. Наличие низкочастотных колебаний (НЧК) может привести к нарушению устойчивости и значительно снизить допустимые перетоки мощности в системе [1]. В связи с этим исследования методов и средств уменьшения влияния НЧК на режимы работы ЭЭС являются одной из основных задач диспетчерского управления.

Данная задача актуальна, особенно для ОЭС Украины, которая характеризуется наличием мощных ЕЭС, связанных между собой относительно слабыми межсистемными связями. Кроме того привлечение энергоблоков тепловых электростанций (ТЭС), а также дополнительных гидроагрегатов (ГА) гидроэлектростанций (ГЭС) к автоматическому вторичному регулированию частоты и мощности, а энергоблоков ТЭС – к первичному регулированию с целью повышения эффективности работы ОЭС Украины создаст высокую вероятность появления опасных НЧК мощности при ненадлежащей настройке регуляторов. К тому же, осуществление эффективного демпфирования колебаний мощности является одним из обязательных требований ассоциации ENTSO-E по возможности реализации параллельной работы ОЭС Украины с энергетическим объединением европейских стран.

Особое внимание данному вопросу стали уделять с использованием систем мониторинга переходных режимов (СМПР), которые создали новые возможности выявления НЧК как в режиме off-line, так и в on-line режиме [2]. Это, прежде всего, связано с периодом дискретизации данных, с которой осуществляется синхронная регистрация, и возможностью указанных систем с высокой точностью отображать изменение режимных параметров. В настоящее время в ОЭС Украины размещены 24 устройства СМПР типа Регина-Ч [3] на двух электростанциях и 22-х подстанциях (ПС) напряжениями 330 – 750 кВ, образующие систему мониторинга 75 воздушных линий (ВЛ) классами напряжений 220 – 750 кВ.

Проведенные экспериментальные исследования при использовании синхронизированных измерений из устройств Регина-Ч подтвердили появление НЧК мощности в сечениях ОЭС Украины при возникновении значительных возмущений в системообразующих сети, в том числе опасных с точки зрения нарушения колебательной устойчивости. Это, в свою очередь, требует исследований по демпфированию указанных НЧК [4].

Цель работы состоит в анализе путей уменьшения влияния НЧК на режимы работы энергосистем за счет осуществления демпфирования на станционном и сетевом уровнях; разработке математической модели автоматической системы управления тиристорной установки продольной компенсации (ТУПК) в программной среде Power Factory; проведении исследований режимов работы энергосистемы с ТУПК и анализе влияния ТУПК на демпфирования низкочастотных колебаний мощности.

Методы и средства уменьшения влияния НЧК на режимы работы ОЭС путем их демпфирования

Проанализированы пути уменьшения влияния низкочастотных колебаний на режимы работы ЭЭС посредством реализации комплексного подхода демпфирования колебаний. Комплексный подход заключается в обеспечении демпфирования колебаний на станционном и сетевом уровнях ОЭС.

Эффективная настройка средств регулирования генераторов, модернизация существующих систем возбуждения синхронных генераторов и применение системных стабилизаторов PSS обеспечивают станционный уровень демпфирования колебаний, а внедрение систем гибкой передачи переменным током (FACTS) и вставок постоянного тока создают сетевой уровень демпфирования [5].

Одним из приоритетных способов повышения эффективности работы крупнейших энергосистем (ЭС) мира является внедрение в практику их эксплуатации систем FACTS. Данные системы позволяют адаптивно регулировать основные системные параметры передачи переменного тока и в реальном масштабе времени добиваться лучших характеристик передачи мощности [6].

Целый ряд работ украинских специалистов направлен на исследование эффективности внедрения систем FACTS, а именно: статических тиристорных компенсаторов (СТК) в ОЭС Украины [7], результаты которых наглядно отражают преимущества применения данных устройств и рекомендации по их установке. Вопросы интеграции ТУПК в ЕЭС ОЭС Украины также освещены в некоторых работах, но исследований в данном направлении значительно меньше. Поэтому выполним анализ и моделирование работы ТУПК.

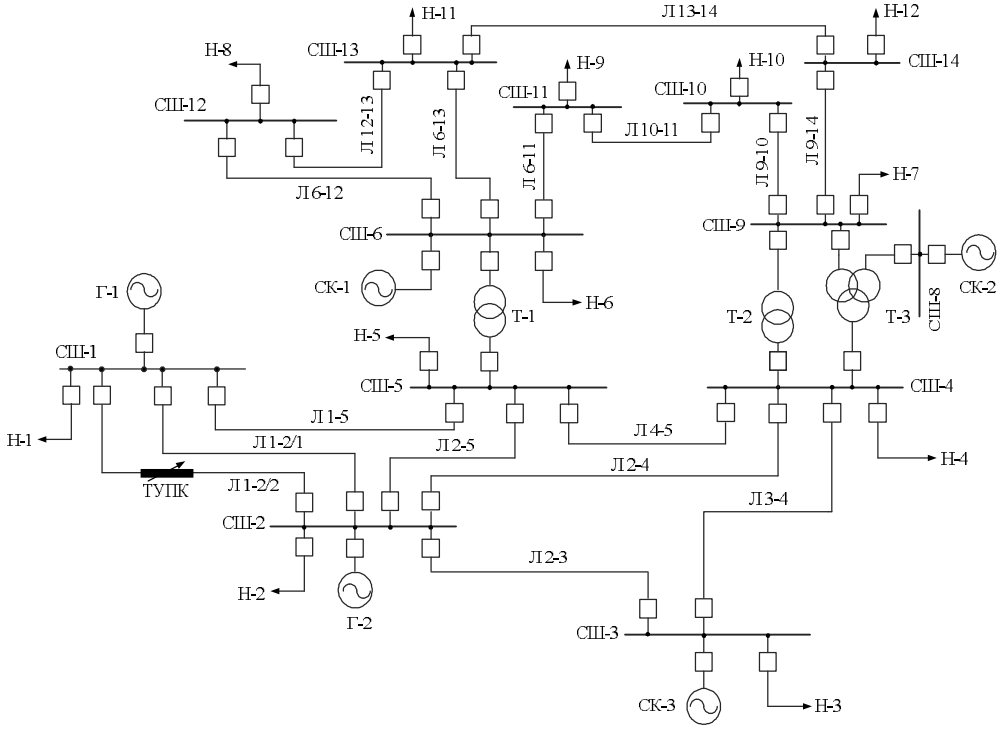

Рис. 1. 14-узловая тестовая схема IEEE с установленным ТУПК

ТУПК представляет собой емкостной компенсатор, состоящий из продольной батареи

конденсаторов, которые шунтируются тиристорно управляемым реактором с целью плавного регулирования реактивного сопротивления. Для определения влияния ТУПК на повышение пропускной способности ЛЭП и возможности демпфирования колебаний перетоков мощности в программной среде Power Factory выполним моделирование процессов на примере 14-узловой тестовой схемы IEEE, приведенной на рис. 1.

Для моделирования разработана автоматическая система управления тиристорной установкой продольной компенсации, представленная в [8]. В модели учтены системы автоматического управления на различных уровнях управления. Станционный уровень автоматических систем управления представлен автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) генераторов и стабилизаторами ЕЭС, а сетевой уровень – регуляторами ТУПК.

Оценка качества функционирования систем FACTS продольной компенсации

Увеличение пропускной способности ЛЭП - 220кВ 1-2 / 2, реактивное сопротивление которой составляет 65,205 Ом, зависит от величины степени компенсации k_C установленного ТУПК. Общее сопротивление ТУПК состоит из постоянного сопротивления конденсатора и переменного сопротивления реактора и определяется как:

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

$$0,3X_{ЛЭП} \le X_{ТУПК} \le 0,7X_{ЛЭП}$$

$$20\,Ом \le X_{ТУПК} \le 45\,Ом$$

Исследование эффективности демпфирования колебаний перетока активной мощности по ЛЭП 1-2 / 2 с помощью ТУПК выполнено для случаев возникновения возмущений различной величины.

Разработанная модель автоматической системы управления ТУПК включает контроллер демпфирования колебаний, который в процессе моделирования переходных процессов ЕЭС находился во включенном и выключенном положениях. Изменение перетока активной мощности по ЛЭП 1-2 / 2 при:

- увеличении потребления активной мощности на узловой СШ-2 на 100% (рис. 2);
- увеличении потребления реактивной мощности на узловой СШ-5 на 12 МВар (рис. 3);
- отключении трансформатора Т_1 между узловыми СШ-5 и СШ-6 (рис. 4);
- возникновении трехфазного короткого замыкания продолжительностью 1 с на СШ-5 (рис. 5).

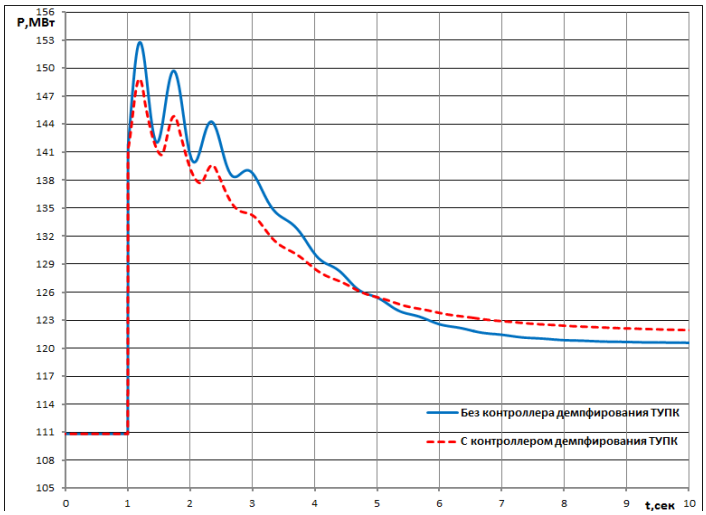

Рис. 2. Изменение активной мощности при увеличении потребления активной мощности на узловой СШ-2 на 100%

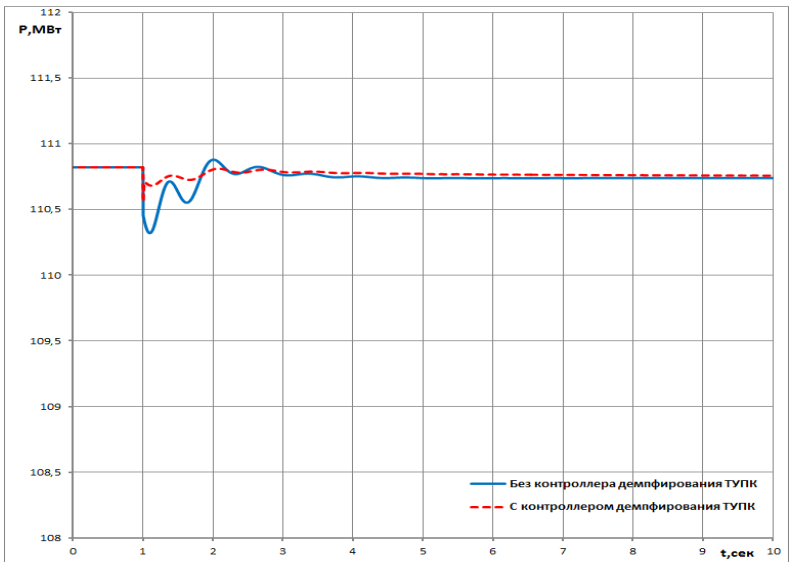

Рис. 3. Изменение активной мощности при увеличении потребления реактивной мощности на узловой СШ-5 на 12 МВар

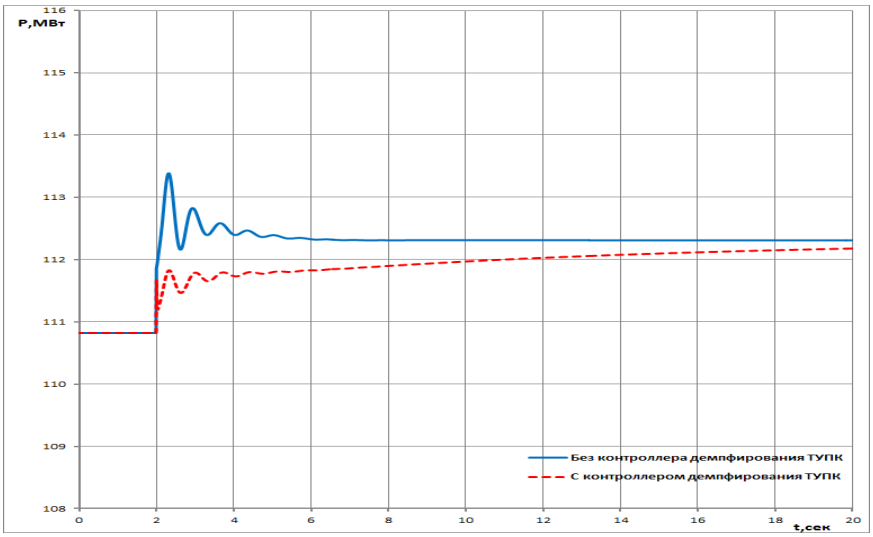

Рис. 4. Изменение активной мощности при отключении трансформатора Т_1 между узловыми СШ-5 и СШ-6

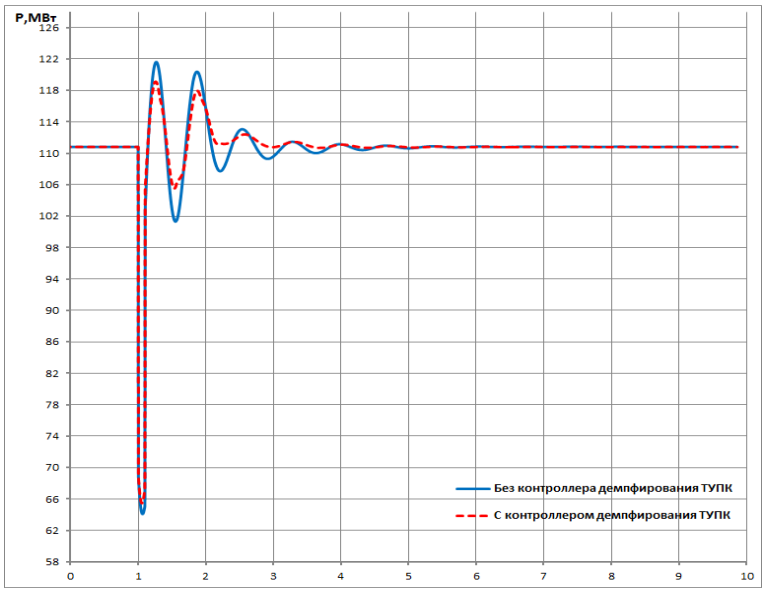

Рис. 5. Изменение активной мощности при возникновении трехфазного короткого замыкания продолжительностью 0,1 с на СШ-5

Как видно из представленных рис. 2 – 5, использование ТУПК с предложенной моделью регулятора способствует уменьшению динамических отклонений и числа колебаний перетока активной мощности, чем обеспечивает демпфирование колебаний в переходных режимах. Это особенно актуально в условиях загруженных ЛЭП, когда дополнительное увеличение перетока активной мощности может привести к нарушению параллельной работы ЕЭС.

Также были проведены исследования качества функционирования систем FACTS продольной компенсации и оценка их влияния на частотные характеристики перетока активной мощности на примере Южной ЕЭС ОЭС Украины. Исследования выполняли с использованием программы Power Factory.

Общее влияние установки ТУПК на ЛЭП-330 кВ Аджалык – Усатово наглядно изображено на рис. 6, где приведены изменения перетока активной мощности по представленной ЛЭП при возникновении возмущения на Южно-Украинской АЭС (отключение одного из блоков 1000 МВт на 50 с после начала моделирования) для трех случаев работы продольной компенсации:

а) ТУПК выведен из работы;

б) ТУПК в работе с включенным контроллером демпфирования;

в) ТУПК в работе с выключенным контроллером демпфирования.

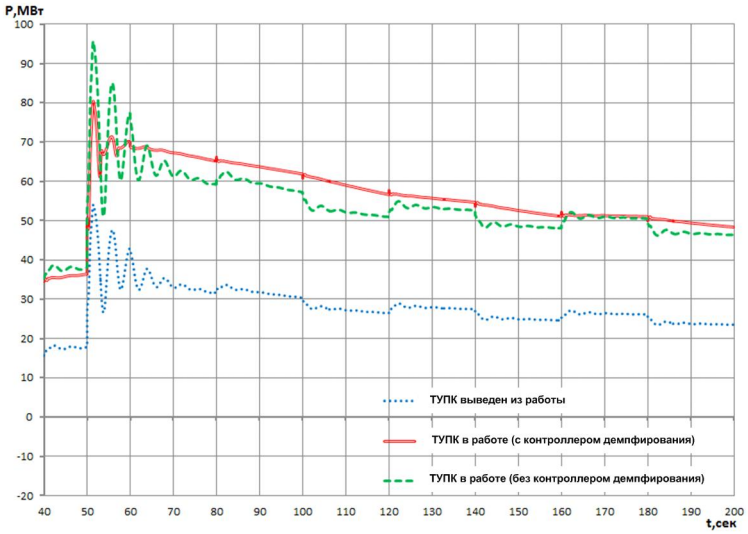

Рис. 6. Изменение активной мощности по ЛЭП-330 кВ Аджалык – Усатово при отключении блока 1000 МВт на Южно-Украинской АЭС

Анализ полученных результатов перетока активной мощности по ЛЭП-330 кВ Аджалык – Усатово, где установлено устройство продольной компенсации, свидетельствует об увеличении перетока активной мощности данной ЛЭП примерно вдвое при обеспечении максимальной степени компенсации ТУПК. Таким образом, наглядно представлена эффективность применения ТУПК для увеличения пропускной способности линии.

Как видно из рис. 6, время переходного процесса при использовании ТУПК с контроллером демпфирования уменьшается примерно на 20 с, т. е. качественно улучшаются динамические характеристики переходных процессов ЕЭС с использованием систем FACTS.

Анализ влияния ТУПК на частотные характеристики перетока активной мощности по ЛЭП, где установлено устройство компенсации, проведен в соответствии с предложенным общим алгоритмом спектрального анализа [9] для указанного случая возникновения возмущения при введенном в работу ТУПК с и без контроллера демпфирования колебаний мощности.

Характеристики выявленных доминирующих низкочастотных колебаний (НЧК) перетока активной мощности по ЛЭП-330 кВ Аджалык – Усатово при возникновении возмущения на Южно-Украинской АЭС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели доминирующего НЧК активной мощности

	ТУПК без контроллера демпфирования	ТУПК с контроллером демпфирования
Частота, Гц	0,293	0,293
Амплитуда, МВт	18,32	14,86
Декремент затухания	1,369	6,405
Логарифмический декремент затухания	0,314	1,857
Время затухания, с	10,861	1,838
Коэффициент затухания	0,092	0,544
Коэффициент демпфирования	0,05 (5%)	0,295 (29,5%)

В результате обработки перетока активной мощности по ЛЭП-330 кВ Аджалык – Усатово при введенном в работу ТУПК без контроллера демпфирования колебаний мощности в случае возникновения значительного возмущения в размере отключения блока 1000 МВт на Южно-Украинской АЭС определены электромеханические доминирующие низкочастотные колебания с частотами в диапазоне 0,1 – 0,3 Гц, что свидетельствует об их соответствии межсистемным колебаниям в энергосистеме.

Рассчитанная амплитуда данных колебаний значительна и превышает опасное критическое значение, которое составляет 10 % от установившегося значения перетока активной мощности данной ЛЭП. Рассчитанные коэффициенты демпфирования и время затухания свидетельствуют о недостаточной демпфированости выявленных низкочастотных колебаний (коэффициент демпфирования равен 5 %, время затухания превышает 10 с).

Использование ТУПК с контроллером обеспечивает эффективное демпфирование низкочастотных колебаний перетока активной мощности по ЛЭП. В данном случае наблюдается возникновение в момент аварии доминирующего колебания с частотой 0,293 Гц, которое носит межсистемный характер и достаточно демпфировано, то есть является безопасным с точки зрения раскачивания режима системы и нарушения колебательной устойчивости. При этом уменьшаются динамические отклонения и число колебаний перетока активной мощности по сравнению с предыдущим случаем.

Выводы

Таким образом, гибкое регулирование параметров режима, а именно: гибкое изменение во времени реактивного сопротивления, которое осуществляется с помощью установленного ТУПК, позволяет повысить качество работы ЭЭС путем увеличения пропускной способности и обеспечением демпфирования колебаний мощности по ЛЭП. Учитывая особенности ОЭС Украины, необходимо отметить, что внедрение систем гибких передач переменным током позволит решить ряд первоочередных задач и будет соответствовать требованиям европейской системы по осуществлению эффективного демпфирования колебаний мощности.

Перспективы дальнейших исследований в этом направлении связаны с:

1. Обеспечением комплексного демпфирования низкочастотных колебаний на станционном и сетевом уровнях ОЭС:

• определение требований к системам автоматического регулирования и применения системных стабилизаторов;

• разработка методики оценки технико-экономической эффективности применения устройств ГПЗС, необходимой для корректного принятия и обоснования решений относительно мест установки устройств и их характеристик.

2. Совершенствованием и развитием СМПР в ОЭС Украины:

• установки дополнительных устройств СМПР на основных электростанциях и ПС ОЭС Украины;

• определение оптимальных требований к системам передачи информации для устройств

СМПР с целью осуществления мониторинга ОЭС в режиме реального времени;

• мониторинг энергосистем в режиме реального времени (расчет характеристик доминирующих колебаний в режиме on-line).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Яндульський О. С. Аналіз та ідентифікація низькочастотних коливань потужності при виникненні збурень в системоутворюючій мережі ОЕС України / О. С. Яндульський, 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 [Електронний 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. Яндульський О. С. Моделювання та аналіз впливу тиристорних установок поздовжньої компенсації на якість роботи електроенергетичних систем / О. С. Яндульський, В. В. Мацейко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2013. – № 2 (15). – С. 305 – 309.

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

Мацейко Виталия Викторовна – аспирант, ассистент кафедры автоматизации энергосистем факультета электроэнерготехники и автоматики, e-mail: fea@kpi.ua, Vitaliya_M@i.ua.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».