

І. А. КОЗАКЕВИЧ, канд.техн.наук., доц., А. А. КОНДРАТЕНКО, студентка
Криворізький національний університет

СИСТЕМА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМ КОМПЕНСАТОРОМ ВИКРИВЛЕНЬ НАПРУГИ

Метою роботи є аналіз існуючих структур силової частини та способів керування динамічним компенсатором викривлень напруги. Виконується порівняння енергоефективності існуючих способів компенсації просадки, перевищення та несиметрії напруги. Доведено, що, оскільки якість електричної енергії є важливим фактором функціонування будь-яких систем електропостачання через її безпосередній вплив на показники енергоефективності, надійності та продуктивності обладнання. Тому виявлення закономірностей функціонування динамічних компенсаторів викривлення напруги для навантажень, що є чутливими до якості електричної енергії, а також розробка енергоефективних способів керування такими системами, що дозволить підвищити їх можливості відносно тривалості компенсації відхилень напруги, є актуальною задачею.

Методи наукового дослідження. Для її вирішення були використані загальні методи теорії автоматичного керування, методи теорії оптимального керування та методи дослідження нелінійних систем автоматичного керування, варіаційне й матричне обчислення.

Наукова новизна роботи полягає в розробці принципів комбінованого керування, яке поєднує в собі компенсацію зміни фази напруги в мережі з подальшим безшовним переходом до синфазної компенсації. Шляхом математичного моделювання роботи динамічного компенсатора напруги було отримано матеріал для порівняльного аналізу енерговитрат автономного джерела енергії при використанні синфазної та попередньої компенсації.

Основними науковими та практичними результатами є аналіз існуючих структур динамічних компенсаторів викривлень напруги. У результаті роботи розрахунки підтверджують, що при використанні синфазної компенсації значно зменшується обсяг електричної енергії, яка споживається від автономного джерела живлення, у порівнянні з попередньою компенсацією, що враховує можливу зміну фазового кута напруги в мережі. Також розроблено структуру системи керування динамічним компенсатором викривлень напруги, яка передбачає комбіноване використання попередньої та синфазної компенсацій, що дозволяє покращити показники енергоефективності таких систем.

Ключові слова: якість електричної енергії, динамічний компенсатор викривлень напруги, фазове автопідлаштування частоти, просадка напруги, перевищення напруги, несиметрія напруги, швидкодія системи.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-154-160

Проблема та її зв'язок з науковими та технічними задачами. Сучасне життя є залежним від електричної енергії, тому проблема її якості є важливою для функціонування системи електропостачання як побутових, так і комерційних та промислових споживачів. Від якості електроенергії залежить як продуктивність використовуваного обладнання, так і його енергоефективність. Проблеми з якістю електроенергії повинні бути скомпенсовані для забезпечення якісного функціонування обладнання, що є актуальною задачею як для постачальника, так і для споживача. Явища просадок або підвищень напруги, які є найбільш розповсюдженими відхиленнями в якості електроенергії, можуть призводити до значного зростання струму або перенапруги. Серед пристроїв, призначених для вирішення даних проблем, представлено клас динамічних компенсаторів викривлень напруги, що є достатньо ефективними та дешевими.

Аналіз досліджень та публікацій. Динамічний компенсатор напруги є напівпровідниковим пристроєм, що призначений для короткочасної компенсації просадок та перевищень напруги в живлячій мережі. За останні роки було розроблено значну кількість технічних рішень щодо структури його силової частини та системи керування. Основні положення щодо розробки та дослідження динамічних компенсаторів викладено у [1-4], де описано системи керування, а також способи їх дослідження шляхом математичного моделювання. Показано, що використання динамічних компенсаторів напруги забезпечує ефективне відновлення її якісної форми. Обговорено базову структуру та принцип функціонування при використанні різних способів компенсації. Системи керування інвертором напруги, що є складовою динамічних компенсаторів напруги, представлені у [5-8]. Аналіз показників динамічних компенсаторів напруги при використанні синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції та просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції представлено у [9-10]. Доведено, що застосування просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції дозволяє краще використовувати напругу в ланці постійного струму та створює менші гармонійні викривлення у порівнянні з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією. Засоби моделювання та фізичної реалізації алгоритмів просторово-

векторної широтно-імпульсної модуляції представлено у [12]. У [13] виконано розробку нової системи керування дворівневим інвертором напруги, що базується на семисегментній просторово-векторній широтно-імпульсній модуляції.

Представлені способи керування передбачають перетворення вектору трифазної живлячої напруги до системи відліку, що обертається синхронно. У такому випадку складова по осі d дає інформацію щодо рівня просадки напруги, а складова q – інформацію щодо фазового зсуву. Отриманий таким чином сигнал помилки передається до блоків просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції для здійснення керування ключами інвертора динамічного компенсатора напруги.

Постановка задачі. Для розробки системи керування динамічним компенсатором, що відрізняється від існуючих здатністю компенсувати не тільки просадки та перевищення, а ще й режими несиметрії напруги, необхідно розробити засоби ідентифікації просадок, перевишень та несиметрій у мережевій напрузі, дослідити шляхи компенсації відхилень у якості електричної енергії, зробити вибір найбільш раціональної структури системи керування та дослідити показники якості системи електропостачання при використанні у її складі динамічного компенсатора запропонованої структури.

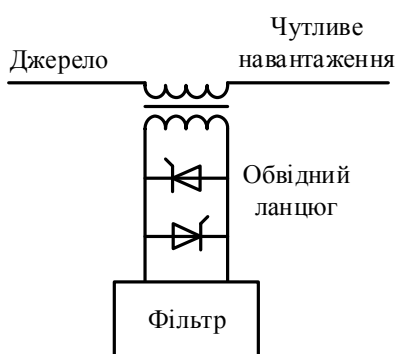


Рис. 1. Динамічний компенсатор викривлень напруги у режимі очікування

Викладення матеріалу та результати. Динамічний компенсатор напруги є пристроєм, який включається послідовно до чутливих навантажень, вводячи додаткову напругу до живлячої напруги таким чином, щоб виконувати корекцію її форми. Більшу частину часу він знаходиться в режимі очікування, а при необхідності за допомогою трьох однофазних трансформаторів, які живляться керованою величиною напруги, що є синфазними з напругою мережі, компенсує наявність викривлень у напрузі мережі. У загальному випадку динамічний компенсатор напруги може працювати в наступних режимах:

1) Режим очікування. У такому режимі низьковольтна обмотка трансформатора закорочена (рис. 1). Керування ключами інвертора не здійснюється.

2) Режим захисту. Для захисту пристрою від руйнівної дії великих струмів під час короткого замикання або перевантаження у структурі динамічного компенсатора напруги необхідно передбачити байпасні перемикачі, щоб струм міг проходити у навантаження, мінаючи динамічний компенсатор (рис. 2).

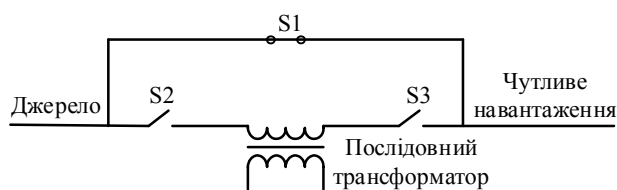


Рис. 2. Динамічний компенсатор викривлень напруги в режимі захисту

3) Режим компенсації. В цьому режимі динамічний компенсатор вводить компенсаційну напругу через послідовний трансформатор, працюючи за наступним алгоритмом: 1. Виявлення відхилення в якості електричної енергії, пов'язаного з просадками або перевищеннями напруги. Це реалізується порівнянням виміряних значень напруги з їх заданими значеннями. Різниця між цими величинами слугує напругою завдання для динамічного компенсатора напруги. 2. Для отримання сигналів керування ключами інвертора, що створює необхідну середню напругу, використовуються відповідні методи модуляції, такі як просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція. 3. В подальшому вихідна напруга інвертора фільтрується за допомогою пасивного фільтра. 4. Отримана напруга подається на обмотку послідовно включеного з навантаженням трансформатора.

Базова структура динамічного компенсатора викривлень напруги представлена на рис. 3 та складається з послідовного трансформатора, автономного інвертора напруги, накопичувача електроенергії, пасивного фільтра та системи керування.

Послідовний трансформатор призначений для підвищення діючого значення вихідної напруги автономного інвертора напруги та введення додаткової напруги до напруги у живлячій

мережі. Вибір схеми з'єднання обмоток даного трансформатора та його коефіцієнту трансформації залежить від використовуваної схеми динамічного компенсатора, а саме від способу зарядки накопичувача електричної енергії. Величина просадки та перевищення напруги, що може бути компенсована за допомогою динамічного компенсатора, залежить від вибору номінальних значень та коефіцієнту трансформації послідовного трансформатора та інвертора.

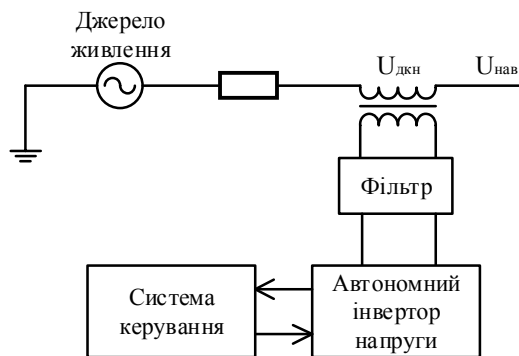


Рис. 3. Базова структура динамічного компенсатора викривлень напруги

Автономний інвертор перетворює постійну напругу накопичувача енергії у змінну. Вихідна напруга інвертора в подальшому підвищується за допомогою трансформатора, тому інвертор обирається з низькою номінальною напругою, проте зі значним номінальним струмом, враховуючи подальше перетворення параметрів електричної енергії трансформатором.

Пасивний фільтр усуває вищі гармонійні складові, що присутні на виході автономного інвертора напруги. Він

може застосовуватися як на стороні автономного інвертора, так і на обмотці трансформатора з вищою напругою.

Накопичувач електричної енергії призначений для забезпечення необхідної реальної потужності під час компенсації для створення компенсаційної напруги потрібної величини. У якості накопичувачів у структурі динамічних компенсаторів можуть застосовуватися свинцово-кислотні батареї, електролітичні конденсатори та суперконденсатори, маховики. Ємність даних накопичувачів є основним фактором, що впливає на показники тривалості компенсації динамічних компенсаторів. Система зі значними відхиленнями у якості електричної енергії вимагає застосування накопичувача з великою ємністю. Якщо у випадку накопичувачів застосовуються акумуляторні батареї та конденсатори, то для їх підключення використовують інвертори, а у випадку використання маховиків застосовують перетворювачі за схемою випрямляч – інвертор.

В основу керування напругою компенсації динамічного компенсатора напруги (рис. 4) покладена синхронізація з напругою живлення як для ідентифікації наявності просадки або перевищення напруги, так і для виконання функції компенсації даних явищ.

Коли у системі не спостерігається відхилення у якості електроенергії, напруга мережі U_s фіксується як величина напруги до просадки U_0 . У такій ситуації напруга, що вводиться компенсатором, дорівнює нулю, а напруга мережі дорівнює напрузі на навантаженні U_l .

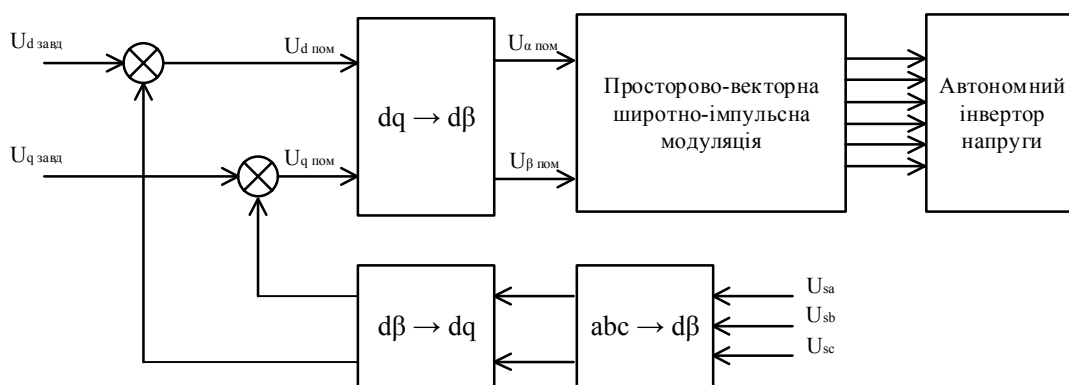


Рис. 4. Структура системи керування динамічним компенсатором напруги

Під час виникнення відхилення величина та фазовий кут напруги у мережі змінюються до величини $U_{прос}$. Динамічний компенсатор напруги починає працювати, додаючи до напруги мережі напругу компенсації $U_{дкн}$. У випадку виникнення відхилення, що може бути повністю скомпенсоване за рахунок динамічного компенсатора, напруга на навантаженні буде дорівнювати тій, що була до виникнення відхилення, тобто U_0 .

Для реалізації керування динамічним компенсатором напруги можна застосувати декілька методів.

1) Попередня компенсація просадки. Цей спосіб, як видно з рис. 5а, компенсує різницю між напругою під час просадки та напругою до просадки шляхом відновлення миттєвих значень напруг до величини і фази номінального режиму. Використання такого підходу може бути рекомендоване для нелінійних навантажень, таких як тиристорно-керовані електроприводи, які використовують фазове керування, а, отже, є чутливими до зміни фази сигналу.

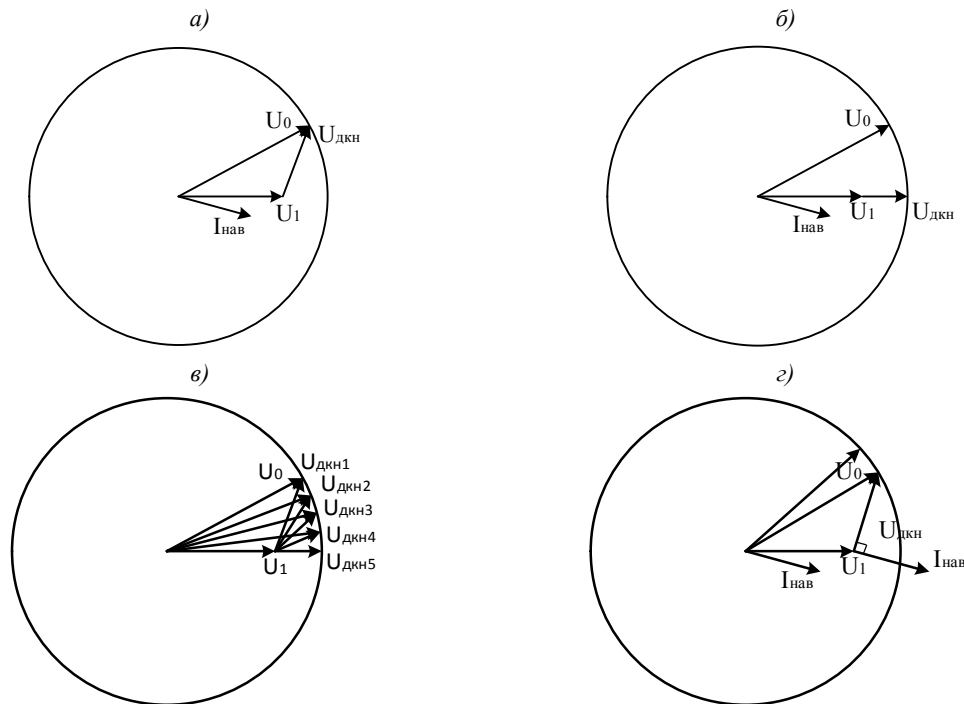


Рис. 5. Векторні діаграми для: а – використання попередньої компенсації, б – використання синфазної компенсації, в – комбінованого використання методів попередньої та синфазної компенсації, з – оптимізації енерговитрат

2) Синфазна компенсація. При реалізації методу, вказаного на рис. 5б, компенсаційна напруга знаходиться в одній фазі з напругою під час просадки, а тому виконується компенсація лише її величини. Дана методика мінімізує напругу, що вводиться за рахунок динамічного компенсатора, а тому її використання рекомендоване лише для лінійних навантажень, що не залежать від фазового кута.

Розглянемо можливість комбінованого використання методів попередньої та синфазної компенсації для досягнення вищої ефективності керування. При такому керуванні система спочатку відновлює напругу навантаження до тієї ж амплітуди і фази, що були до просадки (тобто використовується метод попередньої компенсації), а потім поступово змінює введену напругу у бік фази напруги під час просадки. У кінцевому результаті компенсована напруга знаходиться у тій же фазі, що і напруга під час просадки, повільно зміщуючись від початкової величини.

На рис. 5в представлено концепцію даного методу керування. З рисунку видно, що на початку компенсації додаткова напруга $U_{дкн1}$ використовується у системі для попередньої компенсації, а в подальшому повільно фаза введенної напруги зміщується у напрямку $U_{дкн4}$ (синфазна компенсація).

3) Метод оптимізації енерговитрат. Цей метод виконує керування динамічним компенсатором з мінімізацією вимог до ємності накопичувача енергії, як показано на рис. 5з. При цьому використання активної потужності є мінімальним або рівним нулю за рахунок зміщення компенсаційної напруги на кут 90° по відношенню до струму навантаження. Проте, такий підхід вимагає використання автономного інвертора та трансформатора з більш високими номінальними значеннями через необхідність створювати компенсаційну напругу більшої величини

Шляхом математичного моделювання роботи динамічного компенсатора напруги було розраховано наступні дані для порівняння енергоефективності синфазної та попередньої компен-

сації, що наведені у табл. 1. Як видно з наведених даних, використання синфазної компенсації дозволяє значно знизити кількість електричної енергії споживаної від автономного джерела. Отже, розробка комбінованої системи керування, яка при виникненні просадки здійснювала б компенсацію за принципом збереження закону зміни фазового кута з подальшим безшовним переходом до синфазної компенсації, є доцільним.

Таблиця 1

Порівняння енерговитрат автономного джерела енергії при використанні синфазної та попередньої компенсацій

Просадка напруги $\Delta U, \%$	Напруга в мережі $U, \text{В}$	Синфазна компенсація		Попередня компенсація			
		$U_{к1}, \text{В}$	$P_{к1}, \text{Вт}$	α	$U_{к2}, \text{В}$	α_k	$P_{к2}, \text{Вт}$
10	280,014	31,113	197	10	60,126	-53,97	831,6
				20	107,126	-63,38	1501
				30	155,922	-63,887	2184
20	248,902	62,225	393,9	10	78,899	-33,217	958,1
				20	114,945	-47,783	1553
				30	156,914	-52,478	2160
30	217,789	93,338	590,9	10	103,783	-21,371	1085
				20	129,942	-34,977	1605
				30	163,915	-41,631	2137

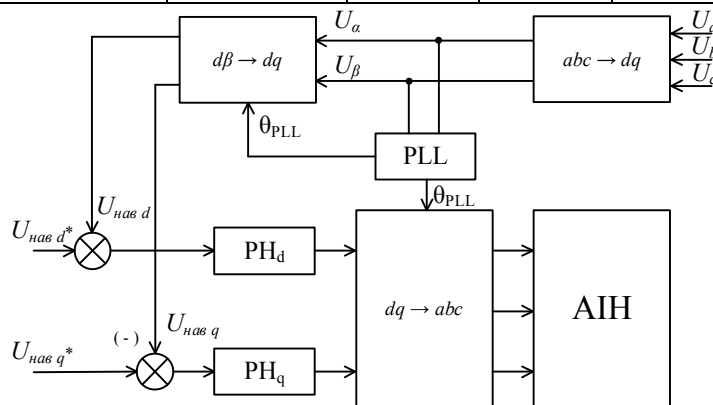
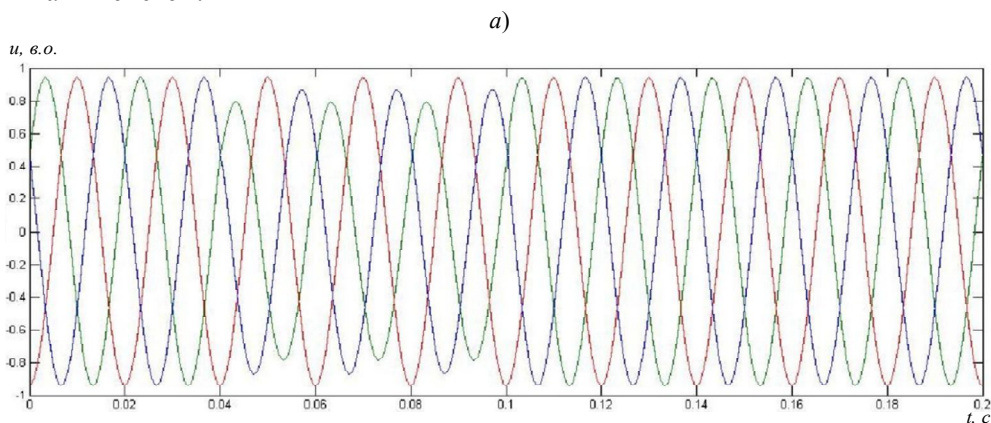


Рис. 6. Запропонована система керування динамічним компенсатором напруги

Структура запропонованої системи керування динамічним компенсатором напруги представлена на рис. 6. Для оцінки поточної фази напруги в мережі використовується блок фазового автопідлаштування частоти.

Для дослідження запропонованої системи керування було виконано математичне моделювання у середовищі Matlab/Simulink. На рис. 7 представлено результати моделювання поведінки динамічного компенсатора викривлень напруги в умовах несиметричної просадки напруги, яка може спостерігатися при підключенні до мережі потужних однофазних навантажень. Вихідна напруга динамічного компенсатора напруги у такому режимі також є несиметричною, що дозволяє створити симетричну напругу на навантаженні, як суму двох несиметричних напруг: мережі та компенсатора.

Система керування демонструє достатню швидкодію для забезпечення високої якості електричної енергії для живлення чутливих навантажень. Використання запропонованого підходу до керування динамічним компенсатором напруги створює умови для зниження кількості споживаної від акумуляторної батареї електричної енергії, що дозволяє підвищити експлуатаційні показники таких систем.



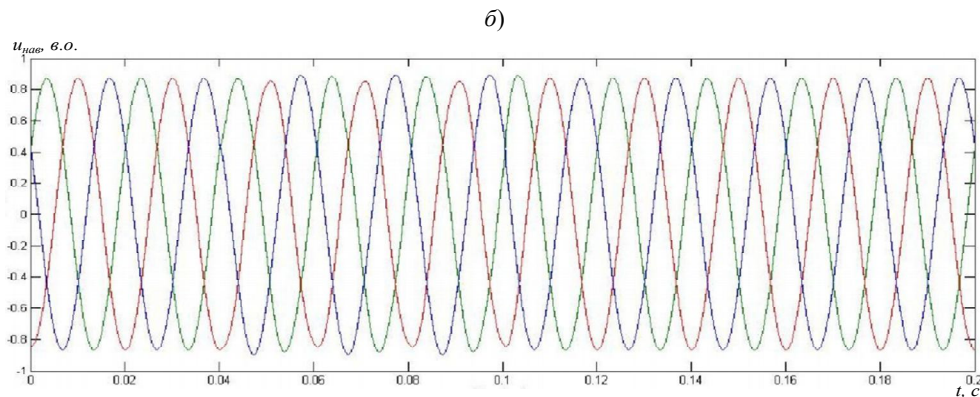


Рис. 7. Графіки напруги в мережі (а) та напруги на навантаженні (б) при несиметричній просадці напруги

Висновки та напрямок подальших досліджень. У роботі здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі підвищення енергоефективності динамічних компенсаторів викривлень напруги. Проаналізовано існуючі структури динамічних компенсаторів напруги та встановлено, що у випадку необхідності компенсації просадок, перевищень та несиметрії напруги доцільно застосовувати схему з одним послідовним трансформатором. Також встановлено, що при використанні синфазної компенсації значно зменшується обсяг електричної енергії, що споживається від автономного джерела живлення, у порівнянні з попередньою компенсацією, що враховує можливу зміну фазового кута напруги в мережі. Розроблено структуру системи керування динамічним компенсатором викривлень напруги, яка передбачає комбіноване використання попередньої та синфазної компенсацій, що дозволяє покращити показники енергоефективності таких систем.

Список літератури

1. Babaei E. Voltage quality improvement by a dynamic voltage restorer based on a direct three-phase converter with fictitious DC link / E. Babaei, M. Farhadi Kangarlu // IET Generator Transmission Distribution. – 2011. – Vol. 5, Iss. 8. – pp. 814-823.
2. Ngai-man Ho C. Design and Implementation of a Fast Dynamic Control Scheme for Capacitor-Supported Dynamic Voltage Restorers / C. Ngai-man, Chung S. H., Au T. K. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2008. – Vol. 23, no. 1.
3. Ямненко Ю. С. Фільтро-компенсуючий перетворювач з системою заряду/розряду акумуляторної батареї / Ю. С. Ямненко, Т. О. Терешенко, Д. А. Миколаєць // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 5. – 16-20 с.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – Изд. 6-ое, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
5. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261.
6. Бурбело М. Й. Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 3. – 30-33 с.
7. Li Y. W. Design and Comparison of High Performance Stationary-Frame Controllers for DVR Implementation / Y. W. Li, F. Blaabjerg, D. Mahinda Vilathgamuwa, P. C. Loh // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, no. 2.
8. Fitzer C. Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer / C. Fitzer, M. Barnes and P. Green // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2004. – Vol. 40, no. 1.
9. Zhan C. Dynamic voltage restorer based on voltage space vector PWM control / Zhan C., V. K. Ramachandaramurthy, A. Arulampalam, C. Fitzer, S. Kromlidis, M. Barnes, and N. Jenkins // IEEE Transactions Industry Applications. – 2001. – Vol. 37. – Pp. 1855-1863.
10. Ananthababu P. Performance of Dynamic Voltage Restorer (DVR) against Voltage sags and swells using Space Vector PWM Technique / P. Ananthababu, B. Trinadha, K. Ramcharan // International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies. – 2009.
11. Roncero-Sanchez P. A Versatile Control Scheme for a Dynamic Voltage Restorer for Power-Quality Improvement / P. Roncero-Sanchez, J. Enrique Ortega-Calderon // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, no. 1.
12. Rodriguez P. A vector control technique for medium voltage multilevel inverters / P. Rodriguez, J. Moran, P. L. Correa, C. Silva // IEEE Transactions, IE-49. – 2002. – Pp. 882-887.
13. Wang F. Sine-triangle versus space vector modulation for three level PWM voltage source inverters / F. Wang // IEEE Transactions. – 2002.

Рукопис подано до редакції 10.04.2019