

УДК 621.314

**С.П. Денисюк, П.Й. Тарасевич,  
О.В. Сподинський, Д.Г. Дерев'янку****ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА СТІЙКОЇ РОБОТИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

*Представлено напрямки розвитку сучасних енергетичних систем на основі концепції Smart Grid. Наведено аналіз сучасних технологій, які використовуються при створенні та забезпеченні ефективного функціонування інтелектуальних мереж Smart Grid. Показано умови стійкої роботи елементів систем при пульсуючому характері енергетичних потоків.*

Структура електроенергетичної системи нашої країни, що склалася на початку ХХІ ст., є різномірною за широкою сукупністю техніко-економічних та інших показників і характеристик [8]. Для підвищення надійності та якості енергопостачання споживачів доцільно здійснювати модернізацію електроенергетичних систем України на базі передових інноваційних технологій з перетворенням їх в інтелектуальне ядро технологічної інфраструктури електроенергетики [9].

Створення інтелектуальних електроенергетичних систем доцільно вести за такими напрямками [9]:

- розробка та використання нових типів силового обладнання (на основі силових напівпровідникових приладів та обладнання, високотемпературної надпровідності тощо);
- створення нових засобів релейного захисту та протиаварійної автоматики, діагностики обладнання та обліку енергоресурсів на мікропроцесорній основі;
- створення систем керування режимами мережі та обладнанням;
- забезпечення захисту мереж від зовнішніх впливів (блискавки, ожеледі та вітру);
- підвищення енергоефективності та безпеки функціонування електричних мереж;
- поєднання зусиль вітчизняної науки і наукової бази при розробці нових інноваційних технологій.

За кордоном активно використовуються різні підходи до практичної реалізації концепції Smart Grid – інтелектуальних мереж, ведуться роботи щодо їх комплексного впровадження [11]. Так, у США здійснюється розробка нової концепції Smart Grid. Президентом США проведено анонсування програми щодо розвитку інтелектуальних мереж. Євросоюз сформував платформу Smart Grid для подальшої реалізації. При цьому у Швеції використовуються до 100 % інтелектуальних приладів обліку, Велика Британія вийшла на рівень створення інтелектуального міста.

Інтелектуальні мережі Smart Grid поєднують в собі елементи традиційної енергетики та новітні енергетичні технології, комплексні інструменти контролю (WACS – Wide Area Control System) та моніторингу (WAMS – Wide Area Monitoring System), інформаційні технології та засоби комунікації, інтелектуальні вимірювальні системи, у тому числі інтелектуальні лічильники (Smart Metering); динамічне керування електромережами (Dynamic Grid Management) та енергетичними потоками; регулювання попиту (Demand Response); підвищення безпеки; скорочення витрат. Завдяки моніторингу та керуванню енергопотоками в реальному часі визначається більш чітка картина ефективності енергозатрат, інтенсивності використання обладнання і тенденцій розвитку ситуацій, що пришвидшує виявлення та усунення проблем функціонування електричних мереж, забезпечення ефективного їх розвитку.

Smart Grids забезпечують більш високу продуктивність енергосистеми за рахунок регулювання споживання, моніторингу та динамічного керування двонаправленими потоками енергії в реальному часі. Використання інтелектуальних енерготехнологій забезпечує кращу адаптацію до енергомережі пульсуючого динамічного характеру розосередженої

генерації та нетрадиційних відновлюваних джерел енергії.

Очевидно, що створення інтегрованих інтелектуальних мереж вимагає розробки нової динамічної архітектури оперативного-диспетчерського керування енергетичними мережами в режимі реального часу (без участі людини або з її участю в якості контролера) та дієвих систем регулювання енергопотоків.

Побудова нових методів диспетчерського керування (ДК) можлива завдяки використанню новітніх технологій автоматизованих систем керування диспетчерського керування (АСК ДК) та збору даних, відомих як SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Саме завдяки SCADA-системам стає можливою інтеграція систем моніторингу, діагностування, вимірювання та аналізу режимів у систему ДК [9]. Це дозволяє покращити функції телекерування, телесигналізації, телевимірювання та телерегулювання, які в свою чергу сприяють покращенню роботи диспетчерського персоналу. З врахуванням наявних уявлень про Smart Grid можна сформулювати таке розуміння «розумної» енергосистеми, з точки зору АСК – енергосистема з використанням сучасного електротехнічного обладнання з оснащенням сучасними засобами і системами діагностики, моніторингу та керування на основі інформаційних та комп'ютерних технологій для забезпечення надійності і керованості об'єктами та режимами роботи.

АСК ДК є інтегрованою, багаторівневою, ієрархічною та розподіленою системою, структура якої відповідає структурі та ієрархії диспетчерського керування режимами й устаткуванням електричної мережі. Саме завдяки інтеграції в АСК інших автоматизованих систем (підсистем), наприклад, системи збору інформації від мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики (МП РЗА), забезпечується можливість керування як в автоматизованому режимі, так і в автоматичному через пристрої РЗ та протиаварійної автоматики (ПА). Інтеграція системи керування дала можливість розширити обсяг вхідної інформації для ДК при прийнятті оперативних рішень, а саме повний моніторинг параметрів режимів роботи електроенергетичних систем у нормальних, аварійних та післяаварійних режимах (виключаючи неповноту та невисокоточність вхідної інформації), розширення можливостей телекерування, телесигналізації, телевимірювання та телерегулювання, діагностування силового обладнання в режимі реального часу та ін.

Впровадження нової динамічної архітектури ДК та SCADA-систем зробило можливим вирішення таких задач, як контроль (моніторинг) стану систем режимного та протиаварійного керування, виконання оперативних команд диспетчерів і керуючих дій приладів автоматичного регулювання (напруги, частоти, потужності) та розрахунок статичної і динамічної стійкості та визначення допустимих значень перетоків по окремих перетинах електропередавальної мережі. Для отримання таких можливостей необхідно покращити збір і аналіз інформації про схеми і режими енергосистеми, зробити можливим проведення якісного аналізу аварійних ситуацій і формування плану нормалізації післяаварійного режиму, можливість представлення і відображення інформацій на диспетчерських пунктах.

Аналізуючи сучасні можливості забезпечення статичної стійкості інтелектуальних мереж можливостями АСК ДК, слід також сказати і про розвиток новітніх технологій в цьому напрямку. Створення сучасного інформаційно-програмного середовища (ПС) може істотно впливати на зміни у самій технології ДК, «наближаючи» все більшу кількість функцій керування до автоматичного режиму виконання шляхом забезпечення можливості автоматичного розв'язання відповідних задач, тим самим все більше вивільнюючи диспетчера для виконання його основної функції в системі оперативного керування – прийняття рішень та керування їхньою реалізацією. Така технологія створення прикладного програмного забезпечення ДК була названа IST-технологією (Intelligent Simulation Tools), а відповідна інструментальна система, на підставі якої створюються системи розв'язання задач ДК, IST-системою [8].

Уся використувана при розв'язанні обчислювальних задач ДК інформація про енергосистему структурується і зберігається в інформаційних структурах, представлених у вигляді таблиць. На рис. 1 показана загальна схема опису ієрархії належності.



Рис. 1

Впровадженн я новітніх АСК ДК з ви-користанням SCADA-систем відкриває прин-ципово нові можливості щодо вдосконалення та розвитку систем ДК. Покращуючи основні елементи, якими забезпечується ДК, а саме: телекерування, телесигналізація та телевимірювання, з'являється підґрунтя для застосування таких нових можливостей, як моніторинг, діагностуван-ня, аналіз режимів роботи енергосистеми [9].

Побудова інтелектуальних систем Smart Grid обумовила широке використання пристроїв силової електроніки. Слід відзначити використання цілого сімейства системних пристроїв гнучкого автоматичного регулювання, об'єднаних під однією загальною назвою – FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [1, 3–5, 7]. Системи FACTS дозволяють адаптивно регулювати основні системні параметри передачі змінного струму, в реальному масштабі часу досягати найкращих характеристик передачі потужності. Іншими словами, технології FACTS збільшують гнучкість енергосистем, роблячи їх більш керованими та надійними [6].

Використання пристроїв FACTS базується на добре відомих принципах поздовжньої та поперечної компенсації реактивних параметрів передачі (струму та потужностей) електроенергії. Застосування ж швидкодіючих напівпровідникових ключів і мікропроцесорних систем керування дозволило перейти від повільного та дискретного оперативного керування до плавного автоматичного регулювання реактивних параметрів передачі зі швидкодією, яка достатня для керування режимами при протіканні перехідних процесів в енергосистемах.

Так, використання послідовно з лінією електропередачі установок поздовжньої компенсації (УПК) дозволяє змінювати результуючий опір ланцюга та впливати на потокорозподілення потужностей по двох лініях зв'язку. Якщо ж установити поздовжній компенсатор, який, по суті, є плавно- і швидкорегульованим УПК, то з'являється можливість гнучко керувати режимами роботи зв'язку між енергосистемами, змінюючи опір такого компенсатора. Гнучкість керування полягає у тому, що в залежності від генерації і споживання в кожній з енергосистем, параметри яких змінюються в часі, можливість постійно в автоматичному режимі підкоригувати опір передачі для досягнення поставленої мети регулювання (забезпечення мінімуму втрат електроенергії в нормальних режимах чи демпфірування низькочастотних коливань потужності при перехідних процесах тощо).

Класифікацію систем FACTS можна провести відповідно до типу компенсації: системи поздовжньої компенсації, системи поперечної компенсації та комплексні системи, що поєднують в одному пристрої поздовжню і поперечну компенсації [6–8, 11]. Основними перевагами впровадження технологій FACTS в електроенергетику є: підвищення економічної ефективності перспективного розвитку мереж; збільшення пропускної здатності

існуючих мереж; поліпшення статичної та динамічної стійкості; демпфірування низькочастотних коливань потужності; ефективне керування напругою, потоками активної і реактивної потужностей у складнозамкнених мережах згідно з транзакціями енергоринку чи програмами експорту-імпорту електроенергії; підвищення надійності; зниження втрат електроенергії; скорочення загального часу регулювання.

У таблиці зведені основні технології сімейства FACTS, які використовуються на сьогоднішній день для коригування спотворень у мережах Smart Grid [1].

№	Пристрої FACTS	Предмет управління
1	Статичний компенсатор VAR's (SVC) (TCR, TCS, TRS)	Контроль напруги та стійкості, усунення коливань
2	Керований тиристорами поздовжній компенсатор Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC, TSSC)	Контроль струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
3	Керований тиристорами поздовжній реактор Thyristor Controlled Reactor Series (TCSR, TSSR)	Контроль струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
4	Керований тиристорами фазний перетворювач Thyristor Controlled Phase Transformer (TCPST о TCPR)	Перехід до керування активної потужності, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
5	Керований тиристорами регулятор напруги Thyristor Controlled Voltage Regulator (TCVR)	Керування реактивною потужністю, регулювання напруги, глушіння коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
6	Керований тиристорами обмежувач напруги Thyristor Controlled Voltage Limited (TCVL)	Тимчасове і динамічне обмеження напруги
7	Синхронний статичний компенсатор Synchronous Static Compensator (STATCOM Without storage)	Управління напругою, компенсації VAR's, усунення коливань, стійкість за напругою
8	Синхронний статичний компенсатор Synchronous Static Compensator (STATCOM With storage)	Управління напругою та забезпечення стійкості, компенсації VAR's, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
9	Синхронний статичний компенсатор послідовного ввімкнення Static Synchronous Series Compensator (SSSC Without storage)	Контроль струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
10	Синхронний статичний компенсатор послідовного ввімкнення Static Synchronous Series Compensator (SSSC With storage)	Контроль струму, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою
11	Уніфікований контролер потоків потужності Unified Power Flow Controller (UPFC)	Управління активною та реактивною потужностями, регулювання напруги, компенсації VAR's, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою, обмеження струму короткого замикання
12	Контролер розподілу навантаження між лініями Interline Power Flow Controller (IPFC) or Back to Back (BtB)	Управління реактивною потужністю, регулювання напруги, усунення коливань, динамічна стійкість і стійкість за напругою

У таблиці пунктами 7...12 визначено друге покоління пристроїв сімейства FACTS, що свідчить про стрімкий розвиток та вдосконалення цих технологій.

Важлива задача при побудові нових інтелектуальних мереж – забезпечення статичної та динамічної стійкості. Однією з найважливіших задач аналізу режимів роботи інтелектуальних систем є оцінка стійкості їх рівноваги за малих збурень. До зазначених збурень належать невеликі зміни усталеного режиму, спричинені малими нерегулярними збуреннями електрорушійних сил (ЕРС) генераторів, механічних моментів на валу генераторів, змінами потужності електроспоживання та іншими чинниками.

Забезпечення статичної стійкості означає спроможність системи повернутися до початкового стану після припинення дії малих збурень, які вивели її з цього стану. Воно пов'язане з певним її станом, тобто статична стійкість системи – це стійкість стану рівноваги системи (для системи такий стан рівноваги – це її усталений режим).

Для аналізу рівня стійкості, що забезпечується в елементі конкретної розосередженої мережі, розглянемо структурну схему підсистеми інтелектуальної енергетичної системи, представлену з'єднанням  $\{Г\} - \{Н\}$ . Для такої ЕРС справедливим є вираз  $i_G(t) = i_H(t)$ , де  $i_G(t), i_H(t)$  – відповідно струми генератора та навантаження. Виділимо активну  $i_A(t)$  та реактивну  $i_p(t)$  складові струму генератора  $i_G(t) = i_A(t) + i_p(t)$ .

Розглянемо компенсацію реактивної складової струму за допомогою гібридного фільтра (ГФ), який включимо в переріз А-А системи Г-Н. Припустимо, що ГФ генерує струм  $i_{ГФ}(t)$ , який компенсує реактивну складову  $i_p(t)$  струму генератора  $i_G(t)$ ,  $i_{ГФ}(t) = -i_p(t)$ . Тоді можемо записати

$$i_G^*(t) = i_A(t) + i_p(t) + i_{ГФ}(t) = i_A(t) + i_p(t) - i_p(t) = i_A(t), \quad (2)$$

де  $i_G^*(t)$  – струм генератора після компенсації.

Оцінимо межу стійкості роботи ГФ у випадку, коли його пасивна частина представляється конденсатором  $C_{опт}$  (причому параметри конденсатора  $C_{опт}$  розраховуються на компенсацію першої та вищих гармонік, у той час як активна частина компенсує залишкові струми). Для цього проаналізуємо вплив струму, що генерує ПФ  $i_{p,ПФ2}(t)$ , на сумарний струм, який компенсує АФ  $i_{\Sigma p, АФ}(t)$ .

Для аналізу стійкості роботи фільтра використаємо співвідношення цих величин. У даному випадку діючі та амплітудні значення струмів співпадають.

У розгорнутому вигляді ці залежності мають такий вигляд:

$$\frac{I_{\Sigma p}}{I_3} = \frac{I_{p\Sigma p}}{I_{3m}} = \frac{\sqrt{(I_{3MP} \sin \varphi + I_{C3M} \sin \psi_3^{uc})^2 + (I_{3MP} \cos \varphi + I_{C3M} \cos \psi_3^{uc})^2}}{\sqrt{(I_3 \sin \psi_3^i - I_{3MA} \sin \psi_3^u)^2 + (I_3 \cos \psi_3^i - I_{3MA} \cos \psi_3^u)^2}}. \quad (3)$$

Прийнявши  $K_{П(u)} = \frac{U_3}{U_1}$  – коефіцієнт пульсації за напругою, побудуємо графіки залежності

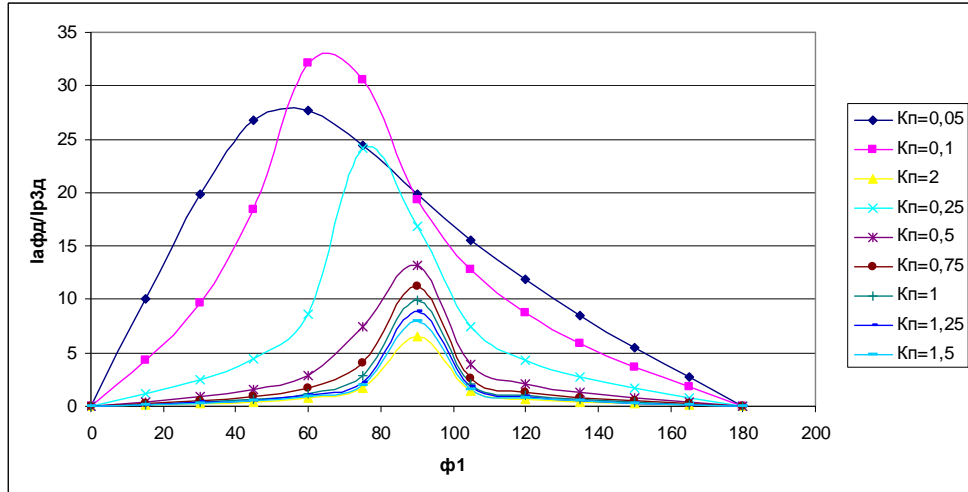
$\frac{I_{АФ}}{I_3}$  при дискретних значеннях  $K_{П(i)} = 0.05; 0.1; 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 2$ ,  $\psi_3^u = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ;  $\varphi_1 = 0; 180$  (рис. 2).

Отримані графіки свідчать про складний характер отриманих характеристик. Для оцінки стійкості роботи даної системи необхідно ввести зони стійкості для даного конкретного випадку, що дасть змогу більш точно оцінити роботу системи в цілому.

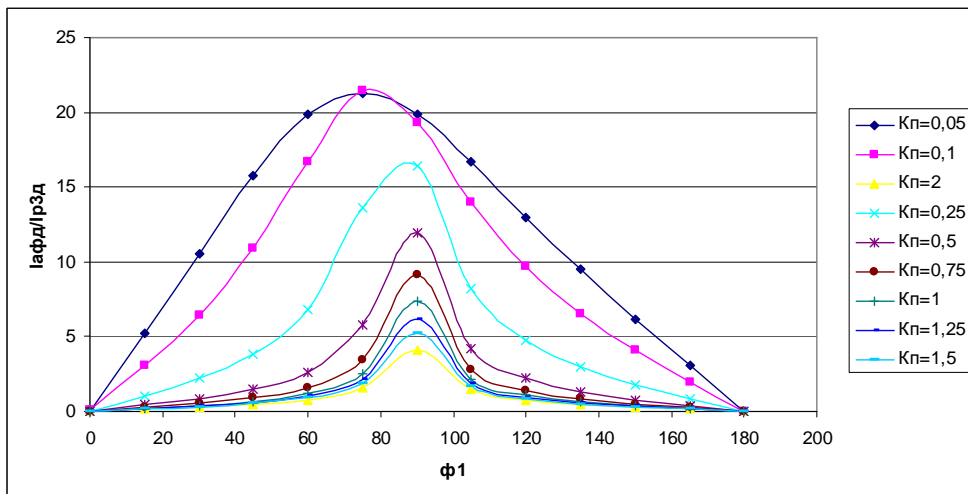
**Висновки:** Проведений аналіз показав, що одночасне застосування і впровадження пристроїв силової електроніки та новітніх АСК ДК є необхідною та ефективною умовою для побудови нових інтелектуальних енергетичних систем. Саме завдяки поєднанню таких технологій досягається вдосконалення показників інтелектуальних енергетичних мереж, а саме:

1. Аналіз статичної стійкості енергетичних систем показав, що при значеннях  $K_{CT} \in (1, 5)$  робота системи буде стійкою, при значеннях  $K_{CT} \in (5, 15)$  система функціонуватиме у зоні відносної стійкості, а при значеннях  $K_{CT} > 15$  робота системи буде нестійкою. Отже, можна зробити висновок, що пристрої силової електроніки (активні та гібридні фільтри, універсальні компенсатори) є ефективним засобом коригування наявних у системі спотворень; вони забезпечують оптимальні режими роботи як окремих елементів, так і системи електроживлення в цілому;

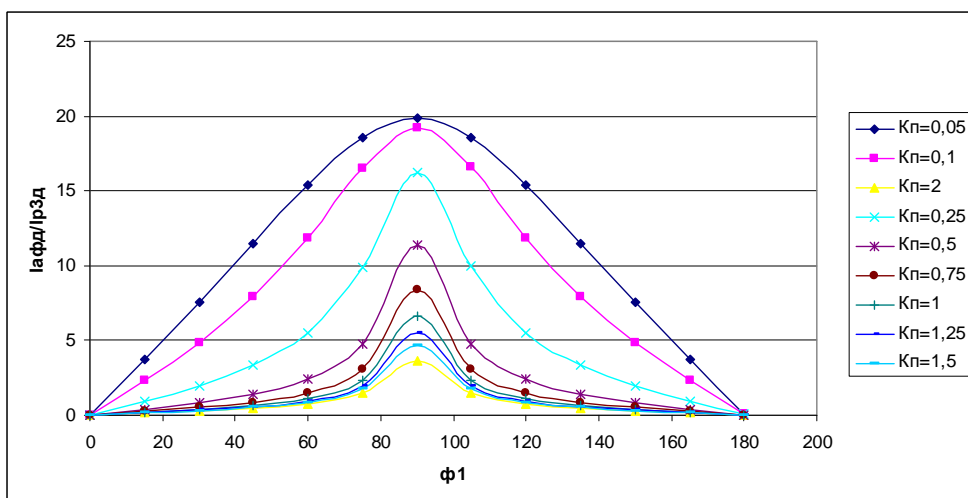
2. Використання новітніх інтегрованих та ієрархічних АСК з розширеними можливостями моніторингу, діагностування та контролю призводить до підвищення стійкості ЕРС, а саме досягаються стійка безаварійна робота технологічного обладнання, підвищення рівня експлуатації і надійності систем керування, значне покращення всіх економічних показників роботи об'єктів, збільшення терміну служби обладнання та зменшення трудових і фінансових затрат на його обладнання, значне підвищення показників енергозбереження, забезпечення вимог вітчизняних і міжнародних стандартів.



a



б



в

Рис. 2

*Представлены направления развития современных энергетических систем на основе концепции Smart Grid. Приведен анализ современных технологий, используемых при создании и обеспечении эффективного функционирования интеллектуальных сетей Smart Grid. Показаны условия устойчивой работы элементов систем при пульсирующем характере энергетических потоков.*

*The trends of modern energy systems based on the concept of Smart Grid are presented. The analysis of modern technologies used in the creation and effective functioning of Smart Grid are brought. The items provided for stable work of the systems in the pulsating nature of energy flows are displayed.*

1. Бурштейн Н.В., Неймарн Ю.И., Фуфаев Н.А. Введение в теорию нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1976. – 420 с.
2. Буткевич О.Ф. Запаси статичної стійкості та пропускну спроможність контрольованих перетинів енергосистем – деякі ретроспекції та сьогодення // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2007. – Вип. 18. – С. 3–12.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк. – 1985. – 536 с.
4. Выдмыш А.А., Родькин Д.И., Черный А.П., Величко Т.В. Выравнивание графика нагрузки систем электропривода электромеханическими накопителями компенсаторами // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Тр. науч.-техн. конф. Крым, Алушта, 15–20 сентября 1997. – Харьков: Основа. – С. 127–131.
5. Денисюк С.П., Дерев'янку Д.Г. Аналіз надійності роботи компенсаторів в системах електроживлення з нелінійними нестационарними навантаженнями // Вісн. НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2010. – Вип. 19.
6. Денисюк С.П., Рибіна О.Б., Дерев'янку Д.Г. Аналіз електромагнітної сумісності елементів систем електропостачання при змінних параметрах генератора та навантажень // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. Спец. вип., 2010.
7. Денисюк С.П., Сафроненко Є.В., Дерев'янку Д.Г. Аналіз якості енергетичних процесів в системах електроживлення з нелінійними нестационарними елементами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2009. – Вип. 24. – С. 37–40.
8. Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Денисюк С.П., Левитський В.Г., Рибіна О.Б. Інформатизація та інтелектуалізація систем керування в електроенергетиці: деякі підсумки за останні роки // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2007. – С. 51–58.
9. Кириленко О.В., Стогній Б.С., Прихно В.Л., Сопель М.Ф., Черненко П.О. Ієрархічний оперативно-керуючий комплекс автоматизованої системи диспетчерського керування // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2008. – Вип. 20. – С. 3–4.
10. Прихно В.Л., Черненко П.А. Модели, методы и программные средства для анализа и прогнозирования электрических нагрузок и для решения задач оперативного управления ЭЭС // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2007. – Вип. 18. – С. 26–33.
11. *The Smart Energy Grid: An Introduction* – [www.energy.gov](http://www.energy.gov)

Надійшла 25.10.2010