

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВИХ СТРАТЕГІЙ РОЗВИТКУ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ ТА ВИМОГ

Викладено загальні принципи моделювання впливу екологічних обмежень та вимог при прогнозуванні розвитку електроенергетичного комплексу. Наведено результати оптимізаційних розрахунків реалізації розробленої моделі з прогнозування структури генеруючих потужностей України при різних рівнях платежів за нормативні та понаднормативні викиди забруднювачів та парникових газів.

Ключові слова: електроенергетичний комплекс, технологія, забруднююча речовина, структура генеруючих потужностей, екологічні обмеження

Електроенергетичний комплекс України є потужним джерелом впливу на всі складові навколишнього середовища: атмосферу, гідро-, літо-, біосферу, забруднюючи їх шкідливими викидами та скидами, порушуючи ландшафти, утворюючи значні обсяги золівідвалів і т. ін. Потужні теплові електростанції на органічному паливі, що працюють у складі Об'єднаної електроенергетичної системи, є вагомим джерелом викидів забруднюючих речовин: близько 30 % від загального обсягу викидів оксидів азоту, більше 70 % діоксиду сірки і 40 % твердих речовин, а також більше 20 % парникових газів [1], що обумовлено як значними обсягами споживання органічного палива, так і недосконалістю або відсутністю взагалі засобів очищення димових газів.

В умовах, коли зниження негативного антропогенного впливу на довкілля набуло загальносвітового значення, забезпечення екологічно прийнятної функціонування електроенергетичного комплексу (ЕЕК) України стає вагомим чинником при ухваленні рішень з його розвитку. Проголошені нашою країною рівні обмежень на викиди парникових газів у посткіотський період, а також вже прийняті зобов'язання доведення до 2018 року вмісту забруднюючих речовин у димових газах великих теплоенергетичних установок до нормативних вимог ЄС [2] потребують проведення дослідження впливу таких обмежень на розвиток та функціонування електроенергетичного комплексу [3, 4].

Сучасний стан електроенергетичного комплексу України характеризується значним

фізичним та моральним зносом обладнання, низькою якістю палива, що споживається, недостатньо жорсткими вимогами до рівнів викидів забруднюючих речовин та низькими рівнями платежів за їх нормативні й понаднормативні обсяги, що не спонукає енергетичні компанії до впровадження засобів зниження таких викидів. Але застосування більш жорстких екологічних обмежень та підвищених платежів, а також існуюча в країнах ЄС практика введення обмеження чи заборони на роботу електроенергетичних об'єктів, які неспроможні задовольнити ці екологічні вимоги, потребують проведення економічно та регуляторно виважених заходів із забезпечення виконання таких вимог з урахуванням енергетичної безпеки країни, наявності інвестиційних та матеріальних ресурсів. Тому при прогнозуванні розвитку електроенергетичного комплексу необхідно забезпечити, з одного боку, екологічну прийнятність його функціонування, а з іншого, можливість виконання екологічних вимог з урахуванням потреб економічного розвитку.

Моделювання впливу екологічних факторів на розвиток електроенергетичного комплексу базується на подальшому вдосконаленні й розвитку методології системних досліджень великих систем енергетики. Моделі комплексного прогнозування розвитку енергетики в умовах лібералізації енергетичних ринків на сьогодні розроблені, підтримуються і удосконалюються в Інституті загальної енергетики НАН України [5]. Вони передбачають використання сценарного підходу до прогнозування розвитку енергетики і вдосконаленого методу оптимізаційних моделей для формування варіантів прогнозу. Критерієм оптимізації є мінімі-

зація цін виробництва товарів і послуг, що забезпечує формування найбільш доцільних з погляду загальнодержавних інтересів варіантів розвитку системи енергопостачання і енергоспоживання країни. Екологічні обмеження в таких моделях носять агрегований характер і застосовуються до всієї системи в цілому. Окрім екологічних, вводяться обмеження на можливість використання таких видів ресурсів: паливних, водних, інвестиційних. Екологічні обмеження і вимоги застосовуються на двох основних етапах прогнозування – обґрунтування загальних рішень з розвитку електроенергетичного комплексу і планування розвитку (будівництва, реконструкції) окремих електроенергетичних об'єктів.

У ринкових умовах обґрунтування рішень з розвитку електроенергетичного об'єкта проводиться за критерієм прийнятної для власника (інвестора) норми його рентабельності (прибутковості), що враховується при визначенні гранично-прийнятної ціни електроенергії [6]. Підхід ринкового інвестування об'єктів – зважати на ринкові й реальні можливості енергосистеми, тому врахування екологічних факторів у таких умовах полягає у визначенні механізмів їх впливу на державну екологічну політику і ціну на електроенергію, тобто, при якому рівні екологічних обмежень та вимог наскільки виростуть ціни на електроенергію, як це вплине на техніко-економічні показники технологій і який обсяг заходів зі зниження викидів забруднювачів потрібно впровадити.

На сьогодні не існує технологій, які б забезпечили виробництво електроенергії без негативного впливу на навколишнє середовище. Тому для його зменшення (обмеження) проводиться державне економічно-правове регулювання за допомогою таких важелів:

нормативно-правове регулювання – нормативні обмеження на вміст забруднюючих речовин, які встановлюють жорсткі вимоги до відповідних технологій: робота тих, які не задовольняють цим нормативам, забороняється або обмежується, що обумовлює проведення комплексу заходів з доведення їх екологічних показників до нормативних;

економічні механізми – стимулювання розвитку більш екологічно чистих технологій виробництва електроенергії (“зелені” тарифи для відновлюваних джерел енергії, сертифікати на “зелену” (відновлювану) енергію, “білу”

енергію, пільгові кредити, пільгові умови їх функціонування, надання інвестиційних субсидій, впровадження штрафних платежів за перевищення нормативів, податки на вміст забруднювачів і т. ін.).

Аналіз впливу екологічних факторів на розвиток і функціонування електроенергетичного комплексу полягає в оцінці змін структури генеруючих потужностей залежно від рівня екологічних обмежень та вимог і визначенні комплексу заходів, необхідних для їх дотримання. Така оцінка може проводитися як при безумовному додержанні нормативних вимог, так і при можливості перевищення їхнього рівня з відповідними штрафними платежами.

Для задачі з жорсткими умовами дотримання нормативних обмежень вплив екологічних факторів на етапі формування варіантів розвитку структури генеруючих потужностей визначається відбором припустимого набору технологій виробництва електроенергії з відповідними засобами очищення [7].

Метою задачі прогнозування розвитку електроенергетичного комплексу з гнучкими екологічними умовами є визначення рівня платежів за нормативні та понаднормативні екологічні впливи при заданому рівні загальносистемних екологічних обмежень, за якого впровадження на електроенергетичних об'єктах природоохоронних заходів зі скорочення таких впливів буде економічно більш прийнятним порівняно зі сплатою штрафних платежів.

Для аналізу впливу екологічних факторів на формування структури генеруючих потужностей при моделюванні розвитку та функціонування електроенергетичного комплексу необхідно враховувати як економічні важелі – платежі за викиди і скиди забруднюючих речовин, за використання природних ресурсів, так і нормативні у вигляді технологічних і загальносистемних обмежень, що входять до ціни виробництва електроенергії як витрати на виконання екологічних обмежень і вимог. Тому для проведення дослідження впливу екологічних факторів на рівень ціни виробництва електроенергії доцільно розділити її на екологічну і неекологічну складові.

До неекологічної складової ціни входять такі умовно-постійні витрати на одиницю встановленої потужності, як амортизаційні відрахування, прибуток власників відповідної технології, податки на прибуток, інші обов'язкові

платежі в державний і місцеві бюджети (фонди), які не пов'язані безпосередньо з виробництвом продукції, на забезпечення підтримки технології в працездатному або законсервованому стані, оплата праці, адміністративні витрати і тому подібне, і умовно-змінні витрати, які залежать від потужності технології, що фактично використовується, та від режимів її роботи: оплата продукції і ресурсів, що використовуються в процесі виробництва [8].

До екологічної складової ціни включаються такі умовно-постійні екологічні показники, як капітальні вкладення у встановлення технологій очищення викидів і скидів, витрати, необхідні для їх введення в експлуатацію, а також такі умовно-змінні екологічні витрати, як експлуатаційні витрати на їх обслуговування, платежі за викиди і скиди забруднюючих речовин і парникових газів, витрати на зниження цих обсягів на установках очищення, за розміщення відходів. При визначенні цієї складової враховуються рівні і умови оплати за користування природними ресурсами (наприклад, умови плати за землю: державна власність, оренда, приватна власність), механізми, стимулюючі використання екологічно чистих технологій виробництва електроенергії. Враховуючи, що витрати на виконання екологічних обмежень та вимог входять до складу екологічної складової ціни виробництва електроенергії, дослідження її залежності від рівня таких обмежень та вимог дозволяє виявити вплив екологічних факторів на формування перспективних цін на електроенергію для споживачів, проводити порівняльну оцінку конкурентоспроможності різних технологій та визначати напрями економічно-прийнятної державної екологічної політики в електроенергетичній галузі.

Дослідження впливу екологічних факторів на формування структури генеруючих потужностей проводиться за такою процедурою.

На першому кроці визначаються зовнішні умови розвитку ЕЕК, проводиться збір і обробка такої початкової інформації:

вимоги до обсягів і якості матеріальних і паливних ресурсів, що використовуються при виробництві електроенергії;

поточні і прогнозовані рівні екологічних обмежень і вимог в електроенергетиці;

техніко-економічні показники існуючих і перспективних технологій виробництва електроенергії;

техніко-економічні показники існуючих і перспективних технологій контролю за викидами і скидами забруднюючих речовин та парникових газів;

прогноз рівнів і режимів електроспоживання; поточні й перспективні ціни на матеріальні та паливні ресурси;

поточне та перспективне нормативно-правове регулювання впливу електроенергетичного комплексу на навколишнє середовище.

На другому кроці проводиться техніко-економічна та екологічна оцінка нових та існуючих об'єктів, а також варіантів їх заміни чи реконструкції. У результаті формується список технологій виробництва електроенергії, їх типи та кількість (потужність), технологій очищення, утилізації, можливих до застосування у цих технологіях, видів та якості палива і його фізико-хімічних характеристик, систем технічного водопостачання, можливих до розгляду в моделі.

На третьому кроці для задачі з жорсткими умовами дотримання нормативних екологічних обмежень проводиться техніко-економічна та екологічна оцінка ухвалених рішень і формується набір прийнятних технологій виробництва електроенергії з відповідними технологіями очищення викидів і скидів, які є вхідними даними для оптимізаційної моделі з формування структури генеруючих потужностей за критерієм мінімуму ціни виробництва електроенергії.

Формування варіантів розвитку структури генеруючих потужностей з урахуванням екологічних обмежень та вимог для гнучких умов припустимості понаднормативних викидів проводиться при оптимізації за критерієм мінімізації витрат на виробництво електроенергії, у тому числі екологічних. При цьому досліджується екологічна складова цих витрат виокремлюється із загальних витрат на виробництво електроенергії і враховується платежами за нормативні й понаднормативні обсяги викидів та скидів забруднювачів, які утворюються при роботі відповідних технологій виробництва електроенергії:

$$\sum_{t=1}^T \left(\sum_{k=1}^K (C_{kt}^{nep} X_{kt} + \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L C_{kgml}^{nez} Y_{kgml} \delta_{gmt} H_{gmlt}) + \sum_{p=1}^P (C'_{p't} O'_{p't} + C''_{p't} O''_{p't}) \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де C_{kt}^{nep} – неекологічна умовно-постійна складова витрат на виробництво електроенергії; C_{kgml}^{nez} – неекологічна умовно-змінна складова витрат на виробництво електроенергії; $C'_{p't}$ –

платежі за нормативні обсяги викидів забруднюючих речовин, вплив рівня яких досліджується; $C''_{p't}$ – платежі за понаднормативні обсяги викидів, вплив рівня яких досліджується; $O'_{p't}$ – змінна, що відповідає обсягам нормативних викидів; $O''_{p't}$ – змінна, що відповідає обсягам понаднормативних викидів; X_{kt} – встановлена потужність технології k у розрахунковому етапі t ; Y_{kgmlt} – потужність технології k , що фактично використовується в l зоні графіка електричного навантаження m характерної доби g сезону у розрахунковому етапі t ; H_{gmlt} – тривалість l зони відповідного добового графіка навантаження; δ_{gmlt} – кількість характерних днів відповідного сезону.

При цьому формуються наступні загальносистемні екологічні баланси і обмеження:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L b_{kpp't} Y_{kgmlt} \delta_{gmlt} H_{gmlt} - O'_{p't} - O''_{p't} = 0; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L b^n_{kp't} Y_{kgmlt} \delta_{gmlt} H_{gmlt} - O'_{p't} \geq 0; \quad (3)$$

$$O'_{p't} + O''_{p't} \leq O_{p't}, \quad (4)$$

де $b_{kpp't}$ – питомий викид p' речовини k технологією при спалюванні p палива; $b^n_{kp't}$ – нормативний питомий викид p' речовини для k технології при спалюванні p палива; $O_{p't}$ –

загальносистемні обмеження на викиди p' забруднювача.

Розроблена математична модель формування варіантів розвитку структури генеруючих потужностей з урахуванням впливу екологічних обмежень та вимог за умов припустимості понаднормативних викидів базується на загальних підходах до моделювання розвитку структури генеруючих потужностей об'єднаних енергосистем [9] і реалізована у складі розробленого в Інституті загальної енергетики НАН України програмно-інформаційного комплексу для прогнозування розвитку енергетики "Піраміда-V". З використанням розроблених програмно-інформаційних засобів проведені оптимізаційні розрахунки з визначення структури генеруючих потужностей України при різних прогнозних рівнях платежів за нормативні та понаднормативні викиди забруднювачів та парникових газів (табл. 1), які базуються на рівнях ставок податку за викиди забруднюючих речовин, затверджених у новому Податковому кодексі, та з урахуванням рішень, закладених Енергетичною стратегією України на період до 2030 року щодо розвитку атомної енергетики.

Результати багатоваріантних розрахунків (у табл. 2 наведені для базового сценарію вироб-

Таблиця 1

Розмір платежів за викиди забруднювачів та парникових газів, USD/т речовини	Етапи за роками			
	2015	2020	2030	2040
NOx				
Мінімальні	100	110	125	140
Вірогідні	150	160	175	200
Максимальні	170	180	200	250
SO₂				
Мінімальні	100	110	125	140
Вірогідні	150	160	175	200
Максимальні	170	180	200	250
Пил				
Мінімальні	1	2	6	8
Вірогідні	5	7	10	15
Максимальні	7	10	15	20
CO₂				
Мінімальні	0.25	0.5	1.5	2.5
Вірогідні	2.5	5	15	20
Максимальні	5	10	50	75

Таблиця 2

Структура генеруючих потужностей, викиди забруднювачів та парникових газів	Етапи за роками											
	2015			2020			2030			2040		
	I*	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Всього, ГВт	48,52	48,98	48,98	61,73	74,70	74,70	86,86	105,32	113,65	105,66	105,72	114,31
АЕС	13,84	13,84	13,84	21,84	21,84	21,84	29,50	29,50	29,50	31,00	31,00	31,00
ТЕС, з них:	26,01	26,47	26,47	28,93	41,90	41,90	43,93	62,39	69,94	59,43	59,45	67,41
вугільні КЕС існуючі, в тому числі:	21,90	21,90	21,90	8,93	21,90	21,90	8,93	21,90	21,90	4,43	0,00	0,00
маловитратна реконструкція з подовженням ресурсу на 10–15 років	20,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
середньовитратна реконструкція з подовженням ресурсу на 15–20 років	1,71	21,90	21,90	8,93	21,90	21,90	8,93	21,90	21,90	0,00	0,00	0,00
високовитратна реконструкція з подовженням ресурсу на 20–30 років	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,43	0,00	0,00
нові вугільні ТЕС	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	15,00	30,00	30,00	20,00	50,00	50,00	30,00
ТЕС на природному газі	2,61	3,07	3,07	0,00	0,00	0,00	0,00	5,49	28,04	0,00	4,45	37,41
ГЕС та ГАЕС	7,05	7,05	7,05	8,21	8,21	8,21	8,99	8,99	9,70	9,02	9,07	9,70
Відновлювані джерела енергії, з них:	1,50	1,50	1,50	2,50	2,50	2,50	3,94	3,94	4,00	5,50	5,50	5,50
ВЕС	1,05	1,05	1,05	1,85	1,85	1,85	2,69	2,69	2,75	3,05	3,05	3,05
СЕС	0,45	0,45	0,45	0,65	0,65	0,65	1,25	1,25	1,25	2,45	2,45	2,45
Малі ГЕС	0,13	0,13	0,13	0,25	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50	0,70	0,70	0,70
Викиди SO ₂ , млн т	1,82	0,59	0,59	0,43	0,41	0,41	0,48	0,43	0,08	0,57	0,50	0,12
Викиди NO _x , млн т	0,16	0,12	0,12	0,07	0,07	0,07	0,10	0,09	0,09	0,13	0,13	0,13
Викиди пилю, млн т	0,21	0,21	0,21	0,23	0,21	0,21	0,23	0,21	0,01	0,21	0,15	0,01
Викиди ПГ, млн т	134,49	133,80	133,80	108,44	108,28	108,27	164,55	156,38	100,15	238,87	232,05	156,03

*I – мінімальні платежі за викиди; II – вірогідні платежі за викиди; III – максимальні платежі за викиди.

ництва електроенергії та базових прогнозних цін на паливо) засвідчують, що реабілітація існуючих вугільних конденсаційних електростанцій (КЕС) шляхом проведення маловитратної (100...250 USD/кВт) реконструкції існуючих вугільних технологій з реконструкцією електрофільтрів, модифікацією пальників для зниження викидів NOx забезпечує виконання екологічних обмежень та вимог тільки при мінімальних рівнях платежів за викиди забруднювачів та парникових газів. Але проведення такої реабілітації у другому етапі не задовольняє нормативні вимоги до рівнів викидів забруднювачів. Проведення середньовитратної (400...600 USD/кВт) реконструкції з заміною електрофільтрів та встановленням установок сіркоочищення з ефективністю 60...90 % економічно та екологічно прийнятно лише на перших трьох етапах розвитку електроенергетичного комплексу. Починаючи з 2030 року, для існуючих вугільних КЕС необхідне проведення високовитратної (600...1200 USD/кВт) реконструкції з заміною котлоагрегата та встановленням установок сірко-азоточищення для доведення екологічних показників цих технологій до рівня нормативних вимог. Але навіть високовитратна реконструкція існуючих вугільних технологій подовжує ресурс їх роботи лише на 20–30 років. Тому економічно доцільніше впровадження нових вугільних технологій, які відповідають екологічним вимогам, мають високу паливну ефективність та більший маневрений діапазон.

При максимальному рівні екологічних платежів збільшується потреба у технологіях на природному газі, які екологічно більш прийнятні у порівнянні з новими вугільними технологіями навіть при відносно більших цінах на природний газ. Також на всіх етапах при різних рівнях платежів передбачається широке впровадження екологічно чистих технологій на відновлюваних джерелах енергії.

ВИСНОВКИ

Розроблена математична оптимізаційна модель формування структури генеруючих потужностей з урахуванням впливу екологічних обмежень та вимог є інструментом для проведення досліджень з прогнозування впливу жорсткості екологічних обмежень на розвиток структури генеруючих потужностей, визначен-

ня обсягів впровадження необхідних заходів зі зниження таких впливів.

Вплив екологічних факторів моделюється виділенням із загальних витрат на виробництво електроенергії екологічної складової, що враховується платежами за нормативні і понаднормативні обсяги викидів та скидів забруднювачів, які утворюються при роботі відповідних технологій виробництва електроенергії. Це дозволяє дослідити, при якому рівні платежів за такі екологічні впливи при заданому рівні загальносистемних екологічних обмежень впровадження на електроенергетичних об'єктах природоохоронних заходів щодо скорочення таких впливів буде економічно більш виправдано порівняно зі сплатою штрафних платежів.

Результати багатоваріантних розрахунків із формування перспективної структури генеруючих потужностей України при різних рівнях платежів за викиди забруднювачів та парникових газів показали наступне. Для забезпечення виконання нормативних обмежень та вимог необхідно проведення реконструкції існуючих вугільних технологій з доведенням їх екологічних показників до рівня нормативних вимог за рахунок встановлення установок сірко-азоточистки, реконструкції або заміни електрофільтрів, підвищення ККД до проектного або встановлення нового котлоагрегата. При високих рівнях платежів потрібно широке впровадження технологій на природному газі. На всіх етапах при різних рівнях платежів необхідне впровадження екологічно чистих технологій на відновлюваних джерелах.

Встановлення новітніх вугільних технологій є екологічно та економічно більш виправданим, ніж подовження терміну роботи існуючих енергоблоків за рахунок їх відновлення при поглиблених капітальних ремонтах зі встановленням високоефективних засобів зниження викидів забруднювачів у повітря. Це обумовлено тим, що при практично однакових потребах в інвестиціях та експлуатаційних витратах на забезпечення прийнятного рівня викидів забруднювачів новітні вугільні енергоблоки мають значно більш високу паливну економічність й відповідно менші платежі за викиди забруднювачів та парникових газів і експлуатаційні витрати на зниження викидів оксидів сірки та азоту. Перевагами таких енергоблоків є ширший маневровий діапазон, суттєво довший тер-

мін їх роботи відносно реконструйованих існуючих енергоблоків з подовженим ресурсом експлуатації.

1. *Результати інвентаризації джерел викидів* / Міністерство охорони навколишнього природного середовища України [Електронний ресурс]. – <http://www.menr.gov.ua>.
2. *Закон України* “Про ратифікацію Протоколу про приєднання України до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства” від 15 грудня 2010 року № 2787-VI / Офіційний вісник України від 14.01.2011. – 2011. – № 1. – С. 13, код акту 54336/201.
3. *Костюковський Б.А., Радченко О.Л., Шульженко С.В., Нечаєва Т.П. та інші.* Проблема зниження викидів забруднювачів у атмосферу в тепловій енергетиці України в контексті інтеграції ОЕС України в УСТЕ // Проблеми загальної енергетики. – 2007. – № 15. – С. 26–31.
4. *Костюковський Б.А., Шульженко С.В., Нечаєва Т.П.* Напрямки забезпечення екологічних вимог по викидах забруднювачів у повітря в тепловій енергетиці України // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – № 20. – С. 63–68.
5. *Костюковський Б.А., Рубан-Максимець Е.А., Сас Д.П., Парасюк М.В.* Теоретико-методологические основы прогнозирования развития энергетики в условиях либерализации и глобализации мировой экономики и интернационализации экологических ограничений // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – № 19. – С. 31–38.
6. *Костюковський Б.А., Шульженко С.В., Радченко А.Л., Нечаєва Т.П.* Прогнозирование развития электроэнергетических систем в условиях рыночного регулирования в электроэнергетике // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. “Энергоэффективность-2007”, 15–17 октября 2007 г., Киев. – К.: Ин-т газа НАНУ, 2007. – С. 14–15.
7. *Нечаєва Т.П.* Загальні методичні підходи до формалізації екологічних обмежень та вимог при прогнозуванні розвитку електроенергетичного комплексу // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – № 19. – С. 63–69.
8. *Шульженко С.В.* Особливості розрахунку вартісних показників у задачах прогнозування розвитку електроенергетичних систем за ринкових умов їх функціонування // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 18. – С. 16–20.
9. *Костюковський Б.А.* Моделювання розвитку структури генеруючих потужностей Об’єднаних електроенергетичних систем в умовах впровадження ринкових механізмів регулювання діяльності в електроенергетиці // Проблеми загальної енергетики. – 2007. – № 15. – С. 22–25.

Надійшла до редколегії: 11.03.2011