

УДК 621.316.1

КУЛИК В. В. \*, БУРИКІН О. Б. \*, ПІРНЯК В. М. \*\*

\*Вінницький національний технічний університет,

\*\*ТОВ «Подільський енергоконсалтинг»

## КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ ДОДАТКОВИХ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**Мета.** Розроблення методу комплексного оцінювання ефективності встановлення джерел реактивної потужності (ДРП) в електричних мережах.

**Методика.** Показник ефективності отримано шляхом поєднання методу оцінювання якості функціонування електромереж на основі мереж Маркова та методу інтервального аналізу втрат електроенергії.

**Результати.** Розроблений показник дозволяє вдосконалити постановку задачі оптимізації розміщення ДРП в електричних мережах та підвищити якість її розв'язання.

**Наукова новизна.** Запропоновано метод формування показника гарантованої ефективності впровадження КРП, який забезпечує її однозначне комплексне оцінювання з урахуванням надійності електромережі, якості напруги у її вузлах, а також точності визначення відпуску та втрат електроенергії.

**Практична значимість.** Алгоритми оптимізації розміщення ДРП, що побудовані на основі розробленого методу дозволяють без втручання аналітика в обчислювальний процес вилучити з області пошуку оптимальних розв'язків фрагменти мереж, для яких оцінювання реального ефекту є ускладненим або неможливим через часті відмови та відсутність засобів моніторингу режимів. Це підвищує обґрунтованість технічних рішень.

**Ключові слова:** розподільні електричні мережі, компенсація реактивної потужності, оцінювання ефективності, комплексний показник, якість функціонування, інтервальный аналіз.

**Вступ.** Розподільні електричні мережі 10(6) кВ та 0.4 кВ, у яких зосереджено основну частку втрат електроенергії, мають низьку надійність, характеризуються невідповідністю параметрів основного обладнання новим умовам експлуатації, недосконалістю систем релейного захисту та автоматики, складністю резервування, а отже мало пристосовані для впровадження групової компенсації реактивної потужності (КРП) [1].

Розвиток місцевих відновлюваних джерел, зокрема фотоелектричних станцій (ФЕС), дає певні переваги, наприклад, зниження екологічного навантаження, участь абонентів у виробництві енергії, підвищення надійності ЕМ, зниження втрат. Однак збільшення їх кількості ускладнює постановку задачі КРП [2], що пов'язано з урахуванням якості напруги в умовах невизначеності генерування ФЕС. Нові види споживачів також зумовлюють необхідність змін постановки задачі КРП. Так, наприклад, за зростання попиту на електромобілі необхідно враховувати зниження напруги в ЕМ під час використання швидкісних зарядних станцій [3].

Через недосконалість систем технічного та комерційного обліку електроенергії в електричних мережах задачі оптимізації КРП розв'язуються в умовах часткової невизначеності [4].

Отже, для забезпечення ефективної роботи ДРП в таких мережах необхідно враховувати вплив якості мереж на функціонування джерел ще на стадії проектування [5],

необхідно комплексно оцінювати ефект від впровадження ДРП, що пов'язаний зі зниженням втрат електроенергії та підвищенням якості напруги, враховуючи обмеженість вихідної інформації та рівень надійності ЕМ.

**Постановка задачі.** Переважно, оптимізуючи режими електромереж за реактивною потужністю оцінюють ефект зменшення втрат електроенергії у натуральному, або грошовому виразі [4]. В якості впливових факторів враховують конфігурацію, пасивні параметри та рівні напруги в ЕМ, а також коефіцієнти потужності та обсяги електроспоживання [6, 7]. Однак, крім означених факторів необхідно враховувати зміни режимних параметрів джерел та електромереж, а формальний показник має бути придатним для використання у оптимізаційних розрахунках [8].

Для оцінювання складової показника ефективності функціонування ДРП, що пов'язана з надійністю ЕМ доцільно використовувати методи, побудовані на підставі теорії марковських процесів [9]. Вони дають можливість отримати придатні до практичного застосування математичні моделі імовірності працездатного стану ЕМ з урахуванням процесів пошкодження та відновлення.

Після ідентифікації частково працездатних станів ЕМ та визначення їх ймовірностей на підставі системи диференціальних рівнянь Колмогорова [9], можна узагальнено оцінити ефективність функціонування розподільної мережі у вигляді моделі грошових надходжень від передачі електроенергії мережами [10]:

$$\Pi = b_{ня} \cdot W \cdot E_* + [(b_{нд} - b_{ня})W - b_{\Delta W} \cdot \Delta W] E'_* - (b_{нд} - b_{тар})W, \quad (1)$$

де  $b_{тар}$ ,  $b_{\Delta W}$  – відповідно, тариф на передачу 1 кВт·год електроенергії електричними мережами та вартість втрат електроенергії;

$b_{нд}$ ,  $b_{ня}$  – відповідно, питома вартість недовідпущеної та неякісної електроенергії;

$W$  та  $\Delta W$  – корисний відпуск електроенергії споживачам ЕМ та розрахункові втрати електроенергії протягом заданого інтервалу часу  $T$  за умови відсутності перерв у електропостачанні;

$E_*$ ,  $E'_*$  – відповідно, показники якості функціонування ЕМ у критеріальній формі, отримані з урахуванням та без врахування якості електричної енергії:

$$E_* = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \frac{1}{P_i[A]^{v_{i|}}} \prod_{j=1}^n P_j[A]^{v_{j|}} - \sum_{i=n+1}^{n+k} p_i \prod_{j=1}^n P_j[A]^{v_{j|}}; \quad (2)$$

$$E'_* = \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=n+1}^{n+k} p_i,$$

де  $p_i$  – імовірність перебування ЕМ у  $i$ -му стані;

$P_j[A]$  – імовірність того, що відхилення напруги для  $j$ -го стану ЕМ відповідає допустимим межах ( $U_{\min} \leq U_{i,j} \leq U_{\max}$ );

$v^{ji}$  – елементи матриці переходів, які є алгебраїчними сумами інтенсивностей відмов  $\lambda$  та інтенсивностей відновлення  $\mu$  [9];

$n$ ,  $k$  – кількість робочих та неробочих станів у графі станів ЕМ.

Використовуючи описаний підхід щодо оцінювання якості електромереж у поєднанні з інтервальним аналізом втрат електроенергії в мережах було запропоновано метод

однозначного комплексного оцінювання гарантованого ефекту від компенсації реактивної потужності.

**Результати досліджень.** Встановлення додаткових ДРП практично не впливає на структурну надійність розподільної мережі ( $E'_* = const$ ), а також обсяг корисного відпуску електроенергії споживачам ( $W = const$ ), однак суттєво впливає на режими її роботи. Виходячи з цього, значення втрат електроенергії  $\Delta W$  та показник якості  $E_*$  будуть змінюватися. З урахуванням наведеного ефективність електромереж після встановлення ДРП можна оцінити за виразом:

$$\Pi_k = b_{ня} \cdot W \cdot E_{k*} + [(b_{нд} - b_{ня})W - b_{\Delta W} \cdot \Delta W_k] E'_* - (b_{нд} - b_{тар})W, \quad (3)$$

де  $E_{k*}$ ,  $\Delta W_k$  – відповідно, значення показника якості функціонування  $E_*$  та втрат електроенергії в мережі після встановлення ДРП на  $k$ -ій підстанції. Використовуючи (1) та (3) були виокремлені додаткові грошові надходження завдяки впровадженню ДРП, які є основним джерелом їх окупності:

$$\Delta \Pi_k = \Pi_k - \Pi = b_{ня} \cdot W (E_{k*} - E_*) + b_{\Delta W} (\Delta W - \Delta W_k) E'_*. \quad (4)$$

З (4) видно, що прибутковість КРП залежить не лише від параметрів та характеристик джерел реактивної потужності, але й від рівня зношеності основного обладнання електромережі, у якій ці джерела впроваджуються. Показник ефективності функціонування ДРП (4), виявляється чутливим як до режимів роботи електромережі та ДРП (перша складова), так і до надійності транспортування електроенергії мережами (друга складова). Виходячи з цього, він може бути застосований не лише для оптимізації схем приєднання ДРП на етапі техніко-економічного обґрунтування, а й для оцінювання якості та своєчасності керувальних впливів з оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ, а отже, для оптимізації налагоджувальних параметрів локальних автоматизованих систем керування ДРП. Використання (4), як цільової функції для проектних та експлуатаційних задач дозволяє реалізувати комплексний підхід до забезпечення ефективності функціонування ДРП у розподільних мережах енергопостачальних компаній.

Однак, через обмеженість інформаційного забезпечення розподільних мереж детерміновані значення корисного відпуску  $W$  та втрат електроенергії  $\Delta W$ ,  $\Delta W_k$  на практиці не можуть бути визначені [4]. Використовуючи результати вимірів та інформацію систем технічного та комерційного обліку електроенергії можна оцінити інтервали невизначеності вказаних параметрів ( $[W_{\min}; W_{\max}]$  та  $[\Delta W_{\min}; \Delta W_{\max}]$ ), до яких вони належать з певною імовірністю. Для практичних розрахунків виявляється достатньою забезпечення імовірності на рівні 0.95 [4], що зумовлює ширину інтервалу невизначеності  $\pm 2\delta_\Sigma$ , де  $\delta_\Sigma$  – середньоквадратичне відхилення від математичного значення.

Для оцінювання гарантованого ефекту від впровадження ДРП виходячи з (4) слід використовувати значення відпуску електроенергії та втрат, що відповідають нижній межі інтервалу невизначеності. Приймаючи попередньо розраховані значення корисного відпуску  $W$  та втрат електроенергії  $\Delta W$ ,  $\Delta W_k$  за математичні сподівання, необхідні значення можна подати у вигляді:

$$W_{\min} = W(1 - 2\delta_w); \quad \Delta W_{\min} = \Delta W(1 - 2\delta_{\Delta W}); \quad \Delta W_{k \min} = \Delta W_k(1 - 2\delta_{\Delta W}), \quad (5)$$

де  $\delta_w$  та  $\delta_{\Delta W}$  – відповідно, середньоквадратичні відхилення корисного відпуску та втрат електроенергії, що можуть бути визначені за методиками з [4], причому  $\delta_w \leq \delta_{\Delta W}$ .

Переписавши (4) з урахуванням недосконалості вихідної інформації отримано нижню межу інтервалу невизначеності додаткових надходжень від впровадження ДРП, яка характеризує гарантований ефект з імовірністю 0.95:

$$\Delta\Pi_{k\min} = \Delta\Pi_k (1 - \delta_{\Pi}); \delta_{\Pi} = 2 \left[ \frac{\delta_w}{1 + K_{\text{яв}k}} + \frac{\delta_{\Delta W}}{1 + K_{\text{яв}k}^{-1}} \right]; \quad (6)$$

$$K_{\text{яв}k} = \frac{b_{\Delta W}}{b_{\text{ня}}} d\Delta W_{k*} \cdot dE_{k*}^{-1},$$

де  $\delta_{\Pi}$  – відповідає розмаху відхилення величини  $\Delta\Pi_k$ ;

$K_{\text{яв}k}$  – коефіцієнт, який характеризує співвідношення ефекту від зменшення втрат та підвищення якості електроенергії завдяки встановленню ДРП на k-тій підстанції;

$d\Delta W_*$  та  $dE_{k*}$  – відносні зменшення втрат електроенергії та показника якості функціонування ЕМ, оцінених за математичними сподіваннями:

$$d\Delta W_* = \frac{\Delta W - \Delta W_k}{W}; \quad dE_{k*} = \frac{E_{k*} - E_*}{E_*}. \quad (7)$$

Залежності комплексного показника ефективності  $\Delta\Pi_{k\min}$  від впливових факторів було досліджено на прикладі розподільної мережі 10 кВ, що складається з 30 підстанцій 10/0,4 кВ (встановлена потужність 4395 кВА) та 59 повітряних ліній (сумарна довжина 41 км). Математичне сподівання річного корисного відпуску електроенергії споживачам становить 3.54 млн. кВт\*год. Математичне сподівання втрат електроенергії в лініях 10 кВ, розраховане за методом середніх навантажень складає 0.28 млн. кВт\*год. Максимальне відхилення напруги, зафіксоване на шинах підстанцій складає 7%, що говорить про порушення обмежень за напругою у мережі ( $E_* < E'_*$ ). Однак ці порушення можуть бути усунені завдяки встановленню ДРП.

На стороні 10 кВ підстанції 10/0,4 кВ з найнижчою напругою було імітовано встановлення ДРП з потужностями від 50 до 500 квар. Коефіцієнт якості електромережі варіювався у діапазоні  $E'_* \in (0.7; 0.997)$  шляхом зміни інтенсивності відмов окремих ліній електропередачі. Середньоквадратичні відхилення  $\delta_w$  та  $\delta_{\Delta W}$  змінювалися в діапазонах, що характерні для реальних електричних мереж 10(6) кВ:  $\delta_w \in (0.02; 0.15)$ ,  $\delta_{\Delta W} \in (0.1; 0.4)$ . Результати розрахунків подано на рисунку.

Аналізуючи вираз (6) та результати обчислювального експерименту (див. рис.) було отримано наступні висновки щодо впливу надійності ЕМ та інформаційного забезпечення на розв'язки задачі оптимізації КРП. Для електричних мереж, які через зношеність основного обладнання мають низьку структурну надійність (рис., а), очікуваний і, відповідно, гарантований ефект від зменшення втрат та регулювання напруги завдяки КРП знижується (до 30%). Тому для його оцінювання необхідно вдосконалювати інформаційне забезпечення, що часто для зношених, ненадійних мереж виявляється технічно недоцільним. Виходячи з цього, обґрунтоване запровадження заходів з КРП потребує попередньої реконструкції мереж для забезпечення нормативних значень показників SAIDI та SAIFI.

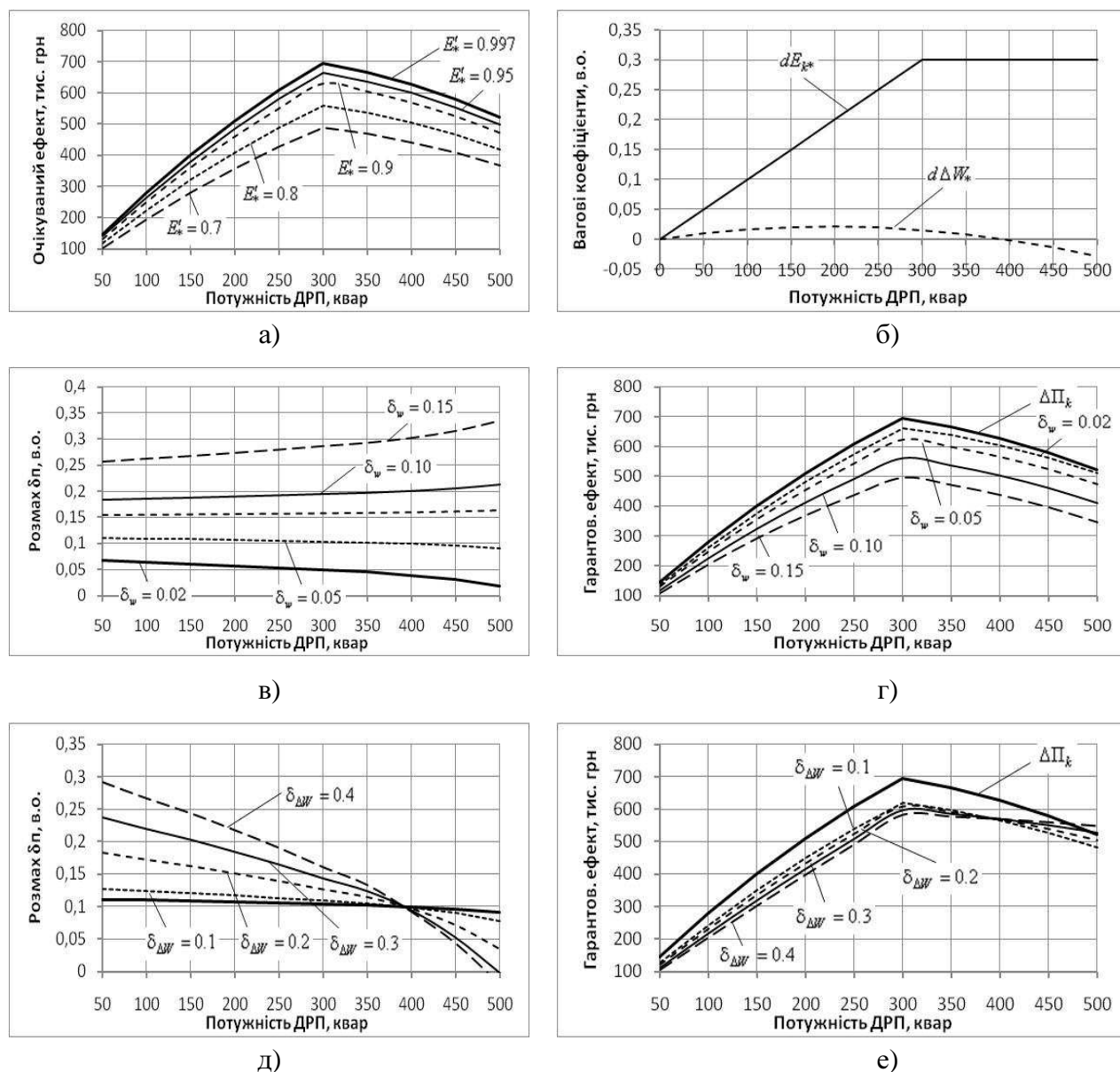


Рис. Вплив надійності мереж та точності інформаційного забезпечення на ефективність компенсації реактивної потужності

Якщо ефект від впровадження ДРП зумовлений, переважно, підвищенням якості напруги, то особливу увагу слід приділити точності визначення корисного відпуску електроенергії  $\delta_w$  та розподілу його між підстанціями ЕМ. У цьому випадку природно  $dE_{k^*}$  виявляється істотно більше за  $d\Delta W_k$  (рис., б), що згідно (6), спричиняє збільшення впливу  $\delta_w$  на розмах відхилення значень оцінюваного ефекту  $\delta_{\Pi}$  (рис., в) і, як наслідок, на значення гарантованого ефекту від встановлення ДРП (рис., г).

Якщо задача КРП в електромережах полягає у зменшенні надлишкових втрат електроенергії, то для оцінювання ефекту основну увагу слід приділити зменшенню методичної та інформаційної похибок їх визначення (рис., д), оскільки значні відхилення розрахункових втрат призводять до впливу їх зміни на значення гарантованого ефекту (рис.,

е). А це може призводити до хибних рішень щодо оптимальної потужності ДРП. Практика показує, що у електричних мережах, для яких втрати не можуть бути оцінені з належною точністю ( $\delta_{\Delta W} > 0.4$ ), оптимальну потужність ДРП  $Q_{i\text{опт}}$  визначити неможливо. Адже, зростання втрат для значень потужності  $Q_i > Q_{i\text{опт}}$  супроводжується зменшенням відхилення  $\delta_{\Delta W}$ , а отже зростанням розрахункового ефекту від КРП. Таким чином оптимальні потужності ДРП виявляються завищеними, що негативно впливає на рентабельність встановлення пристроїв.

Для дослідження впливу факторів надійності електромереж та якості інформаційного забезпечення на результати розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП у електричних мережах було застосовано авторський програмний комплекс «ВТРАТИ-10». За його допомогою було розраховано відхилення  $\delta_w$  та  $\delta_{\Delta W}$ , за методикою, викладеною в [4]. Далі було визначено місця встановлення та потужності ДРП для фрагменту електромереж 10/0,4 кВ без урахування надійності та похибок визначення електричних параметрів (за очікуваним ефектом) та з урахуванням вказаних факторів (за гарантованим ефектом) (табл. 1). Для обох варіантів було розраховано гарантований ефект та оцінено його відхилення (табл. 2).

Таблиця 1.

**Розміщення ДРП в електромережах 10/0,4 кВ для забезпечення максимального ефекту**

Оптимізація очікуваного ефекту (схема 1)				Оптимізація гарантованого ефекту (схема 2)			
Підстанція	Фідер	Підстанція 10/0,4 кВ	$Q_{i\text{опт}}$ , квар	Підстанція	Фідер	Підстанція 10/0,4 кВ	$Q_{i\text{опт}}$ , квар
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-496	200	ТП "Нова"	Ф-113	ТП-496	200
ТП "Нова"	Ф-111	ТП-292	70	ТП "Нова"	Ф-111	ТП-292	70
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-297	70	ТП "Північна"	Ф-204	ТП-429	70
ТП "Західна"	Ф-167	ТП-260	60	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-260	60
ТП "Промислова"	Ф-265	ТП-234	60	ТП "Нова"	Ф-111	ТП-74	60
...	...	...	...	...	...	...	...
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-205	40	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-369	40
ТП "Нова"	Ф-113	ТП-587	40	ТП "Нова"	Ф-106	ТП-113	40
...	...	...	...	...	...	...	...
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-12	30	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-630	30
ТП "Нова"	Ф-106	ТП-225	30	ТП "Західна"	Ф-167	ТП-650	30
...	...	...	...	...	...	...	...

Результати аналізу ефективності розміщення ДРП в електричних мережах показали, що врахування якості вихідної інформації для задачі КРП дозволяє суттєво (біля 10%, або 500 тис. грн/рік) підвищити гарантований ефект (табл. 3). У випадку, коли перелік потенційних місць встановлення обмежений лише технічними можливостями підстанцій, кількість додатково встановлених ДРП з використанням запропонованого критерію оптимальності виявляється меншою. З переліку мереж для встановлення ДРП автоматично виключаються мережі з частими відмовами та мережі з низькою якістю інформаційного забезпечення.

Таблиця 2.

**Оцінювання гарантованого ефекту для варіантів розміщення ДРП в електромережах**

Назва підстанції електромереж	Ефект від впровадження ДРП				Зміна гарантованого ефекту КРП	
	Розміщення ДРП за схемою 1		Розміщення ДРП за схемою 2		тис. грн	%
	$\Delta P_k$ , тис. грн	$\Delta P_{k \min}$ тис. грн	$\Delta P_k$ , тис. грн	$\Delta P_{k \min}$ тис. грн		
Всі підстанції	5051,5	4296,9	4983,8	4797,0	500,1	10,4
ТП "Західна"	799,5	704,8	617,7	587,0	-117,8	-20,1
ТП "Промислова"	440,2	376,8	409,5	393,1	16,4	4,2
ТП "Нова"	3459,6	2930,9	3405,7	3278,3	347,4	10,6
ТП "Центральна"	-	-	128,6	118,3	118,3	-
ТП "Південна"	67,0	33,9	206,6	205,1	171,2	83,5
ТП "Північна"	285,1	250,4	225,9	215,1	-35,4	-16,5
ТП "Технологічна"	-	-	-	-	-	-

Примітка. Розміщення додаткових джерел реактивної потужності виконувалося за критерієм максимуму очікуваного ефекту (схема 1) та максимуму гарантованого ефекту (схема 2)

**Висновки.** Значна зношеність основного обладнання розподільних електричних мереж України, а також їх недостатня оснащеність засобами телевимірювань та технічного моніторингу зумовлює необхідність урахування означених факторів під час планування заходів щодо зменшення втрат та підвищення якості напруги в мережах. Таким чином, для постановки задачі оптимізації КРП, як функцію мети, слід застосовувати комплексні показники ефективності.

За результатами теоретичних та практичних досліджень запропоновано метод формування комплексного показника гарантованої ефективності впровадження КРП, що на відміну від відомих, враховує надійність електромережі, якість напруги у її вузлах, а також точність визначення корисного відпуску та втрат електроенергії. Це дозволяє автоматично, без залучення фахівців до формування обчислювального експерименту, вилучити з переліку потенційних місць встановлення ДРП фрагменти мереж з частими відмовами та відсутністю засобів моніторингу режимів. Таким чином приймаються більш обґрунтовані рішення щодо місць приєднання та оптимальних потужностей ДРП.

**Література**

1. Банін Д. Б., Яндульський О. С., Банін М. Д., Боднар А. М., Гнатівський А. В. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз. *Промелектро*. 2004. №1. С. 22–33.  
 2. S. Ibrahim, A. Cramer, X. Liu and Y. Liao. PV inverter reactive power control for chance-constrained distribution system performance optimisation. *Transmission & Distribution*. 2018. vol. 12. no. 5. pp. 1089-1098.  
 3. A. Zecchino, M. Marinelli, C. Træholt and M. Korpås. Guidelines for distribution system operators on reactive power provision by electric vehicles in low-voltage grids. *CIREC* -

**References**

1. Banin D. B., Yandulskyi O. S., Banin M. D., Bodnar A. M., Hnatovskiy A. V. Ekonomichni ekvivalenty reaktivnoi potuzhnosti. Matematychnyi ta chyselnyi analiz (*Economic equivalents of reactive power. Mathematical and numerical analysis*) *Promelektro*. 2004. no.1. pp. 22–33. (in Ukrainian)  
 2. S. Ibrahim, A. Cramer, X. Liu and Y. Liao. PV inverter reactive power control for chance-constrained distribution system performance optimisation. *Transmission & Distribution*. 2018. vol. 12. no. 5. pp. 1089-1098.  
 3. A. Zecchino, M. Marinelli, C. Træholt and M. Korpås. Guidelines for distribution system operators on reactive power provision by electric vehicles in low-

*Open Access Proceedings Journal*. 2017. vol. 2017, no. 1, pp. 1787-1791.

4. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. Москва: ENAS, 2009. 456 с.

5. Лежнюк П. Д., Демов О. Д., Півнюк Ю. Ю. Поетапний розрахунок компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах із використанням відносних спадів напруги. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. Вип. 30. Т. 2. С.108-115.

6. Jizhong Zhu. Optimization of Power System Operation. *Reactive Power Optimization / Zhu Jizhong*. Wiley-IEEE Press, 2009. P. 409-454.

7. Narayan S. Rau. Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry. *Solved Nonlinear Optimization Problems / S. Rau, Narayan*. Wiley-IEEE Press, 2003. P. 245-295.

8. Kulyk V., Burykin O., Pirnyak V. Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes. *Technology audit and production reserves*, 2018, vol. 1, no. 2(40). pp. 59-65.

9. Лежнюк П. Д., Комар В. О. Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 108 с.

10. Burykin O., Lezhniuk P., Kulyk V., Malogulko Yu. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph. Vinnytsya: VNTU, 2018. 124 p.

voltage grids. *CIREC - Open Access Proceedings Journal*. 2017. vol. 2017, no. 1, pp. 1787-1791.

4. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov (*Loss of electricity. Reactive power. Quality of electricity: a guide for practical calculations*). Moscow: ENAS, 2009. 456 p. (in Russian)

5. Lezhniuk P. D., Demov O. D., Pivniuk Yu.Yu. Poetapnyi rozrakhunok kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh iz vykorystanniam vidnosnykh spadiv napruhy (*Phased calculation of reactive power compensation in distribution networks using relative voltage drops*). *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2015. no. 30. vol. 2. pp.108-115. (in Ukrainian)

6. Jizhong Zhu. Optimization of Power System Operation. *Reactive Power Optimization / Zhu Jizhong*. Wiley-IEEE Press, 2009. pp. 409-454.

Narayan S. Rau. Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry. *Solved Nonlinear Optimization Problems / S. Rau, Narayan*. Wiley-IEEE Press, 2003. pp. 245-295.

8. V. Kulyk, O. Burykin, V. Pirnyak. Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes. *Technology audit and production reserves*, 2018, vol. 1, no. 2(40). pp. 59-65.

9. Lezhniuk P. D., Komar V. O. Otsinka yakosti optymalnoho keruvannia kryterialnym metodom (*Evaluation of the quality of optimal control by the criterion method*): monohraf. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. 108 p. (in Ukrainian)

10. Burykin O., Lezhniuk P., Kulyk V., Malogulko Yu. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph. Vinnytsya: VNTU, 2018. 124 p.

**KULYK VOLODYMYR**

volodymyrvkulyk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7594-5661

Researcher ID: R-1122-2018

Department of Electrical Stations and Systems  
Vinnytsya National Technical University

**BURYKIN OLEKSANDR**

mr.burykin@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0067-3630

Researcher ID: A-9478-2014

Department of Electrical Stations and Systems  
Vinnytsya National Technical University

**PIRNYAK VIKTOR**

vpirnyak@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4550-6411

Head of the Internal Audit Department of the enterprise  
LLC «Podilskiy Energoconsulting»



**КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ  
ДОДАТКОВИХ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

**КУЛИК В. В.<sup>\*</sup>, БУРИКІН О. Б.<sup>\*</sup>, ПІРНЯК В. М.<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>Вінницький національний технічний університет,

<sup>\*\*</sup>ТОВ «Подільський енергоконсалтинг»

**Цель.** Разработка метода комплексной оценки эффективности расстановки источников реактивной мощности (ИРМ) в электрических сетях.

**Методика.** Показатель эффективности получен путем объединения метода оценки качества функционирования электрических сетей на основе сетей Маркова и метода интервального анализа потерь электроэнергии.

**Результаты.** Полученный показатель позволяет усовершенствовать постановку задачи оптимизации размещения ИРМ в электрических сетях и повысить качество ее решения.

**Научная новизна.** Предложен метод формирования показателя гарантированной эффективности расстановки ИРМ, который обеспечивает ее однозначную комплексную оценку с учетом надежности электрической сети, качества напряжения в ее узлах, а также точности определения отпуски и потерь электроэнергии.

**Практическая значимость.** Алгоритмы оптимизации размещения ИРМ, построенные на основе разработанного метода позволяют без вмешательства специалиста в вычислительный процесс исключить из области поиска оптимальных решений фрагменты сети, для которых оценивание реального эффекта затруднено или невозможно из-за частых отказов или отсутствия средств мониторинга режимов. Это повышает обоснованность технических решений.

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети, компенсация реактивной мощности, оценивание эффективности, комплексный показатель, качество функционирования, интервальный анализ.

**COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF INSTALLING THE  
REACTIVE POWER SOURCES IN DISTRIBUTION ELECTRIC GRIDS**

**KULYK V.<sup>\*</sup>, BURYKIN O.<sup>\*</sup>, PIRNYAK V.<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>Vinnytsya National Technical University,

<sup>\*\*</sup>Podilsky Energoconsulting Ltd.

**Goal.** To develop a method for assessing the effectiveness of reactive power sources (RPS) in electrical grids.

**Methodology.** The efficiency indicator was obtained as a result of combining the method of assessing the quality of the functioning of electrical grids on the basis of Markov networks and the method of interval analysis of energy losses.

**Findings.** The efficiency index improves the formulation of the problem of optimizing the connection of the RPS to electrical networks. It improves the quality of this task.

**Originality.** A new method of forming an indicator of the guaranteed effectiveness of the installing the RPS is obtained. It provides an unambiguous comprehensive evaluation of efficiency, takes into account the reliability of the electrical network, the quality of the voltage in its nodes, the accuracy of calculating the released and lost electricity.

**Practical value.** The method makes it possible to construct more efficient algorithms for optimizing the connection of RPS. They allow excluding from the search area optimal solutions "indefinite" fragments of the network without the help of an analyst. Estimation of the real effect is difficult or impossible for such fragments due to frequent failures or lack of monitoring devices. This correction of the search area improves the quality of the solution.

**Key words:** distribution electric grids, reactive power compensation, effectiveness estimation, complex indicator, quality of functioning, interval analysis.