

УДК 621.311

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ПОТУЖНОСТІ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ

Л.М. Лук'яненко, канд. техн. наук, І.С. Гончаренко, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: [okjraa@gmail.com](mailto:okjraa@gmail.com)

*Постійне зростання частки джерел розосередженого генерування в структурі генерування енергосистем несе не лише позитивні зміни. Встановлення джерел розосередженого генерування в невідповідних місцях та невідповідної потужності може погіршити параметри усталеного режиму електричних мереж, наприклад, рівні напруги у вузлах мережі. У роботах [1, 4, 5, 10, 11] розроблено метод для розв'язання задачі оптимального розміщення джерел розосередженого генерування, у якому застосовуються статистичні випробування Монте-Карло в поєднанні з багатокритеріальною постановкою задачі. Метою цієї статті є аналіз роботи методу на різних електричних мережах. Для досліджень використовувалися відомі дослідні електричні мережі IEEE. Результати аналізу показали, що розроблений метод у представленому вигляді має обмежену сферу використання, а тому постає необхідність розробки нового методу без визначених у ході дослідження недоліків. Також у ході дослідження встановлено, що для будь-якої електричної мережі існує власний оптимальний рівень впровадження джерел розосередженого генерування, який хоч і зростає при збільшенні кількості цих джерел у мережі, проте не залежить від її розмірності та є невідомим без попередніх досліджень. Бібл. 11, рис. 8, табл. 4.*

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, метод Монте-Карло, оптимальний рівень впровадження, оптимізація, розосереджене генерування.

**Вступ.** Невпинне зростання частки розосередженого генерування (РГ), у тому числі й відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі генерування електроенергії розвинених країн світу зумовлено перевагами РГ над традиційною «великою» енергетикою. Так, у деяких країнах частка ВДЕ сягає 50 % (без врахування гідроелектростанцій) від загального обсягу виробленої електроенергії [9]. Та деякі переваги РГ, як наприклад, зменшення втрат електроенергії в електричних мережах (ЕМ), досягаються при визначенні оптимальних місць встановлення та потужності джерел розосередженого генерування, інакше підключення РГ до ЕМ в неоптимальному місці може викликати, зокрема, й переобтяження елементів цієї мережі та погіршення профілю напруги [2, 3].

Відома ціла низка методів розв'язання цієї задачі [4, 8, 11], але незважаючи на величезну кількість досліджень у цій сфері проблема оптимального розміщення РГ не є повністю вирішеною навіть у розвинених країнах. Особливості ЕМ України [4] потребують дещо інших підходів до визначення оптимального розміщення РГ. Тому для розв'язання задачі оптимального розміщення джерел РГ розроблено новий метод [4], в якому застосовуються статистичні випробування Монте-Карло у поєднанні з багатокритеріальною постановкою задачі, а в роботах [1, 10, 11] були проведені дослідження, спрямовані на вдосконалення методу. Основні принципи його роботи з врахуванням усіх вдосконалень представлено на рис. 1.

На етапі підготовки до розрахунків виконуються формування набору шин, до яких допускається підключення джерел РГ, та визначення діапазонів потужності джерел РГ для кожної шини з набору. До набору допустимих шин не потрапляють шини ЕМ, підключення джерел РГ до яких очевидно буде неефективним або з тих чи інших причин є недопустимим, зокрема, генераторні СШ. Можливі діапазони потужності джерел РГ визначаються, аби заздалегідь відкинути абсолютно недопустимі значення потужності. Наприклад, недоцільно встановлювати в одному вузлі ЕМ джерело РГ такої потужності, що за величиною наближається до сумарної потужності навантаження цієї мережі. Обмеження діапазонів потужності здійснюється за критерієм  $K_2$  [5], який дає змогу з технічної точки зору визначати таку потужність джерела РГ, яку можна підключити до шини ЕМ без застосування додаткових засобів компенсації.

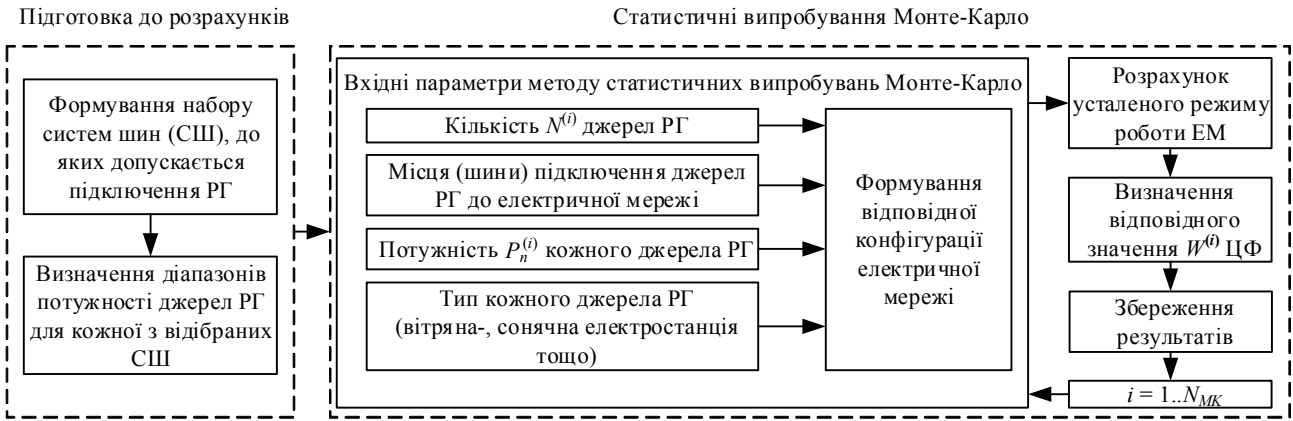


Рис. 1

Таким чином, після підготовчого етапу буде сформовано певний набір шин, які розглядатимуться як можливі кандидати на підключення джерел РГ, та певні діапазони потужності, в середині яких відбуватиметься пошук оптимальної потужності джерел РГ. На основі набору шин та діапазонів потужності виконується серія  $N_{МК}$  статистичних випробувань Монте-Карло. Кожне окреме  $i$  випробування починається з формування випадкової конфігурації ЕМ. Зокрема, визначаються такі величини:

1. Кількість джерел РГ, що будуть підключені до мережі, обирається випадково ( $N^{(i)}$ ) або може задаватися дослідником ( $N^{(i)} = N$ ). Наприклад, у роботі в основному досліджувалося встановлення одного та двох джерел РГ у дослідні мережі. До однієї шини ЕМ може підключатися лише одне джерело РГ одночасно;

2. Випадково обираються шини, до яких будуть підключені джерела РГ. Обираються шини з набору, що був сформований на етапі підготовки, а кількість шин встановлюється відповідно до п. 1.

3. Випадково обирається потужність  $P_n^{(i)}$  кожного джерела РГ таким чином, аби задовольняти діапазону потужності для відповідної  $i$ -ї шини. Діапазони потужності були також отримані на етапі підготовки. Щоб не розглядати майже однакові розв'язки задачі та скоротити кількість розрахунків, діапазони потужності розділяються на  $R = 10$  [1] кроків (рис. 2). Отже, потужність  $P_n^{(i)}$  джерела РГ може набувати одного з десяти можливих значень у діапазоні від  $P_{n.min}$  до  $P_{n.max}$  для відповідної шини.

4. Випадковим чином обирається тип джерела РГ (сонячна (СЕС) або вітряна електростанція (ВЕС) тощо).

Таким чином, у результаті проведення наведених (п. 1-4) процедур буде сформована відповідна конфігурація ЕМ. Для вказаної конфігурації ЕМ виконується розрахунок усталеного режиму ЕМ та відповідного значення  $W^{(i)}$  цільової функції. Далі виконуються збереження поточного результату та перехід до наступної ітерації.

Оскільки задача оптимального розміщення джерел РГ є багатокритеріальною, оптимізаційною і в сучасних умовах ще більше ускладнюється через необхідність врахування не лише економічних інтересів постачальників та споживачів електричної енергії, а й можливих проблем на рівні системного оператора, які можуть виникнути через встановлення значних потужностей РГ, то, як наслідок, виникає доцільність врахування наявності запасу пропускної спроможності ліній, якості електричної енергії тощо [4].

З врахуванням зазначеного було сформовано набір технічних та економічних критері-

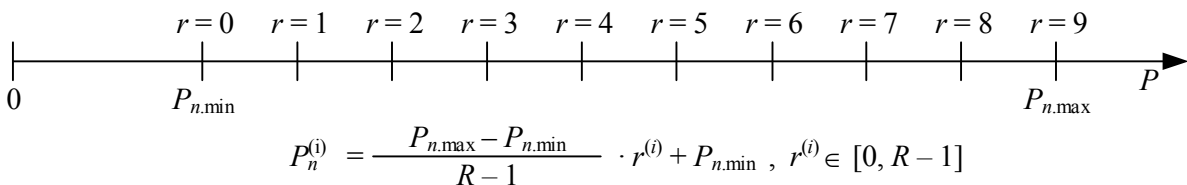


Рис. 2

їв і обмежень, за якими можна оцінити місця встановлення та потужності джерел РГ, а також визначити вплив встановлених джерел РГ на режимні параметри ЕМ. На основі набору критеріїв та обмежень сформовано цільову функцію  $W^{(i)}$ , яка в загальному випадку має такий вигляд:

$$W^{(i)} = (\alpha_1 \cdot C_1^{(i)} + \alpha_2 \cdot C_2^{(i)}) \cdot D^{(i)}, \quad (1)$$

де  $(i)$  –  $i$ -й варіант розв'язання задачі оптимального розміщення джерел РГ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – вагові коефіцієнти;  $C_1^{(i)}, C_2^{(i)}$  – технічна та економічна складові цільової функції;  $D^{(i)}$  – штрафна функція.

Технічна складова  $C_1^{(i)}$  цільової функції характеризує зменшення втрат потужності в мережі у результаті застосування  $i$ -го варіанту розв'язання задачі:

$$C_1^{(i)} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}^{(i)}}{\Delta P_{\Sigma}^0}, \quad (2)$$

де  $\Delta P_{\Sigma}^{(i)}$  – втрати потужності в ЕМ при  $i$  варіанті розміщення джерел РГ;  $\Delta P_{\Sigma}^0$  – втрати потужності у початковій схемі ЕМ до встановлення джерел РГ.

Економічна складова  $C_2^{(i)}$  цільової функції характеризує економічну ефективність  $i$ -го варіанта встановлення джерел РГ:

$$C_2^{(i)} = \frac{\sum_{n=1}^{N^{(i)}} k_{n.вук}^{(i)*} \cdot T_n^{(i)*}}{N^{(i)} \cdot c_n^{(i)*} \cdot k_{n.пр}^{(i)}} \cdot k_m^{(i)}, \quad (3)$$

де  $*$  – нормовані значення відповідних величин;  $k_{n.вук}^{(i)}$  – коефіцієнт використання встановленої потужності  $n$ -го джерела РГ;  $T_n^{(i)}$  – тариф на електроенергію, вироблену  $n$ -м джерелом РГ;  $c_n^{(i)}$  – питома вартість  $n$ -го джерела РГ, що залежить, наприклад, від конструктивних особливостей, фірми-виробника електротехнічного обладнання, одиничної потужності агрегату тощо;  $k_{n.пр}^{(i)}$  – коефіцієнт підключення, який характеризує вартість підключення до ЕМ  $n$ -го джерела РГ. Вказаний коефіцієнт залежить, як правило, від встановленої потужності джерела РГ, класу напруги, на якій виконується підключення джерела РГ;  $k_m^{(i)}$  – коефіцієнт ефективності підключення РГ до ЕМ, завдяки якому здійснюється мінімізація сумарної потужності встановлюваних джерел РГ.

Штрафна функція  $D^{(i)}$  дає змогу врахувати порушення режимних обмежень в  $i$ -му варіанті:

$$D^{(i)} = d_U^{(i)} \cdot d_I^{(i)}, \quad (4)$$

де  $d_U, d_I$  – змінні, що характеризують порушення заданих робочих діапазонів за напругою у вузлах мережі та переобтяження елементів ЕМ (ліній, трансформаторів тощо) за струмом.

Штрафна функція має ступінчатий вигляд та розділяє варіанти розміщення джерел РГ в ЕМ на три групи [4] (рис. 3). До першої групи відносяться розв'язки, режимні параметри яких знаходяться в допустимих межах; до другої групи – розв'язки, в яких є некритичні (мається на увазі, що для цих варіантів розв'язання задачі немає необхідності у застосуванні додаткового компенсуючого обладнання) порушення заданих обмежень режимних параметрів; до третьої – розв'язки, в яких є недопустимі порушення обмежень режимних параметрів.

Отже, проведення серії  $N_{МК}$  статистичних випробувань Монте-Карло дасть змогу отримати відповідну кількість різних варіантів розміщення джерел РГ в ЕМ з відповідною оцінкою  $W^{(i)}$ . Найоптимальнішим розв'язком (глобальним оптимумом) задачі оптимального розміщення джерел РГ вважається розв'язок з найбільшим значенням  $W^{(i)}$  цільової функції:

$$W_{\max} = \max[W^{(1)}, W^{(2)}, \dots, W^{(N_{ALL})}], \quad (5)$$

де  $N_{ALL}$  – кількість існуючих варіантів розв'язання задачі.

Попередньо [4] роботу методу було досліджено на відомій 14-шинній тестовій ЕМ Ін-

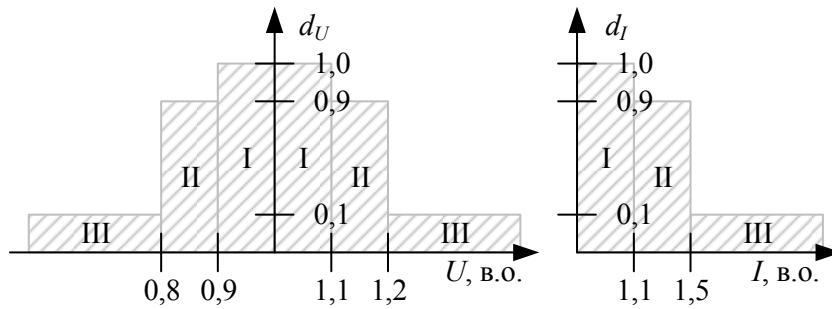


Рис. 3

ституту інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ). Результати дослідження показали, що метод дає змогу досить швидко знайти оптимальний розв'язок задачі. Проте за результатами дослідження роботи методу лише на одній ЕМ неможливо зро-

бити однозначний висновок про його ефективність.

Тому метою цієї статті є всебічний аналіз роботи запропонованого методу на різних ЕМ: 9-, 39-, 57-шинні ЕМ ІЕЕЕ.

**Ефективність роботи методу.** Як відомо [7], ефективність методів із застосуванням статистичних випробувань Монте-Карло пропорційна кількості проведених випробувань. Для кількісної оцінки ефективності роботи методу запропоновано порівняти кількість  $N_{МК}$  випробувань, які необхідно виконати для знаходження оптимального розв'язку задачі, з кількістю  $N_{ALL}$  існуючих варіантів розв'язання задачі, тобто з кількістю випробувань, які необхідно виконати для знаходження оптимального розв'язку задачі повним перебором варіантів:

$$k_{eff} = \frac{N_{МК}}{N_{ALL}} \times 100\% . \quad (6)$$

Варто зазначити, що стохастичні методи не гарантують отримання оптимального розв'язку зі 100 %-вою достовірністю. Тому, коли йдеться про необхідну кількість випробувань, зокрема, методом статистичних випробувань Монте-Карло, мається на увазі необхідна кількість випробувань, яка гарантуватиме отримання оптимального розв'язку з певною достовірністю, наприклад, у роботі прийнята досить висока достовірність – 95 %.

У ході проведення досліджень [4] встановлено, що поряд з глобальним оптимумом є безліч схожих квазіоптимальних розв'язків. Тому оптимальними розв'язками пропонується вважати такі, значення  $W^{(i)}$  цільової функції яких менше від значення  $W_{max}$  цільової функції глобального оптимуму не більше, ніж на деяке значення  $\Delta W$  [1]. Нехай  $\Delta W = 0,03 \cdot W_{max}$ . Таким чином, можна сказати, що  $i$  розв'язок є оптимальним лише тоді, коли

$$W^{(i)} \geq 0,97 \cdot W_{max} . \quad (7)$$

У табл. 1 наведено ефективність роботи методу для різних дослідних ЕМ. З таблиці видно, що пошук оптимального розміщення для одного джерела РГ запропонованим мето-

Таблиця 1

Електрична мережа	Кількість джерел РГ	Кількість можливих розв'язків*	Розв'язки з $W^{(i)} \geq 0,97 \cdot W_{max}^{**}$		Ефективність $k_{eff}$ роботи методу, %
			кількість	у % від кількості можливих	
ІЕЕЕ 9	1	160	2	1,25	150
	2	11 200	5	0,04	60,7
	3	448 000	13	0,003	23,2
ІЕЕЕ14	1	240	3	1,25	100
	2	26 400	62	0,23	4,92
ІЕЕЕ 39	1	760	2	0,26	158
	2	281 200	4	0,001	75,0
ІЕЕЕ 57	1	1 120	2	0,18	152
	2	616 000	2	< 0,001	150

**Примітка.** \*Кількість можливих розв'язків розраховується з врахуванням кількості типів джерел РГ (СЕС, ВЕС) та кількості  $R$  кроків потужності в діапазоні від  $P_{n.min}$  до  $P_{n.max}$  ( $R = 10$ ).

\*\*Під  $W_{max}$  мається на увазі максимальне значення цільової функції, яке може бути досягнутим за заданих умов: ЕМ, кількість джерел РГ тощо.

дом є недоцільним. Та варто зазначити, що задача оптимального розміщення одного джерела РГ в ЕМ є доволі простою на відміну від задачі оптимального розміщення більшого числа джерел РГ та не завжди потребує спеціальних методів. Пошук оптимального розміщення більше ніж одного джерела РГ запропонованим методом, як виявилось, також не завжди є ефективним. Наприклад, пошук оптимальних розв'язків задачі розміщення двох джерел РГ в 57-шинній дослідній мережі (IEEE 57) вимагає виконати десь у півтора рази більше випробувань Монте-Карло, ніж існує всього розв'язків задачі. Тоді як аналогічна задача в 14-шинній дослідній ЕМ (IEEE 14) вимагає проведення кількості випробувань, яка в 20 разів менша за кількість існуючих розв'язків задачі.

Існують різні шляхи підвищення ефективності роботи методу [1]. Зокрема, в цій роботі досліджено: сумарну потужність джерел РГ в ЕМ; зміну кількості  $R$  кроків потужності в діапазоні від  $P_{n.min}$  до  $P_{n.max}$ .

Аналіз статистичних випробувань показав, що при встановленні декількох джерел РГ сумарна потужність їх може перевищувати сумарну потужність навантаження мережі. Такі розв'язки задачі не можуть бути ефективними апріорі, тому мають бути виключені з розгляду. Для цього введено додаткове обмеження максимальної потужності  $P_{n.max}$  джерел РГ:

$$P_{n.max} = \min \left[ f(K_2); \frac{P_l}{N^{(i)}} \right], \quad (8)$$

де  $P_l$  – сумарне навантаження мережі;  $N^{(i)}$  – кількість джерел РГ в ЕМ.

Для прикладу на рис. 4 показано як змінився рівень впровадження (відношення сумарної потужності джерел РГ до сумарного навантаження мережі) серед розв'язків для трьох джерел РГ в ЕМ IEEE 9: 1. Обмеження максимальної потужності джерел РГ за критерієм  $K_2$ :  $P_{n.max} = f(K_2)$ ; 2. Обмеження максимальної потужності джерел РГ за критерієм  $K_2$  та за рівнем впровадження (8).

Завдяки додатковому обмеженню максимальної потужності  $P_{n.max}$  джерел РГ ефективність роботи методу покращилася (табл. 2).

Таблиця 2

Електрична мережа	Кількість джерел РГ	Кількість можливих розв'язків	Розв'язки з $W^{(i)} \geq 0,97 \cdot W_{max}$		Ефективність $k_{eff}$ роботи методу, %
			кількість	у % від кількості можливих	
IEEE 9	1	160	2	1,25	150
	2	11 200	5	0,04	60,7
	<b>3</b>	<b>448 000</b>	<b>64</b>	<b>0,01</b>	<b>4,69</b>
IEEE 14	1	240	2	0,83	100
	2	26 400	76	0,29	4,17
IEEE 39	1	760	2	0,26	158
	<b>2</b>	<b>281 200</b>	<b>4</b>	<b>0,001</b>	<b>75,0</b>
IEEE 57	1	1 120	2	0,18	152
	<b>2</b>	<b>616 000</b>	<b>3</b>	<b>&lt; 0,001</b>	<b>100</b>

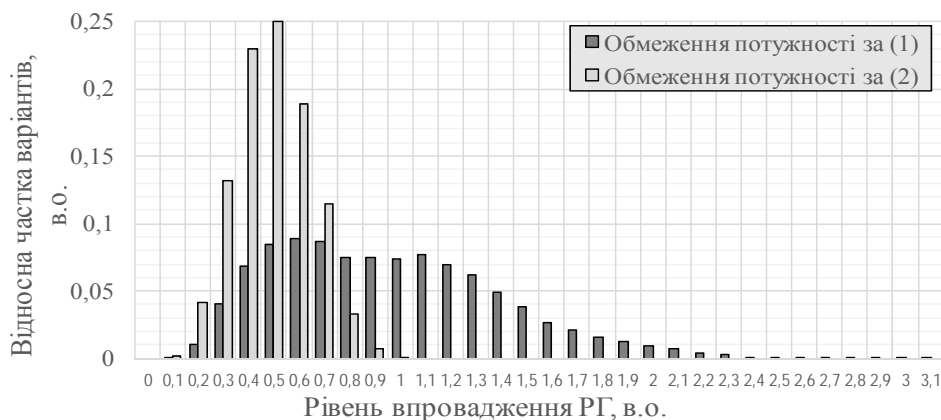


Рис. 4

З табл. 2 видно, що ефективність методу в деяких випадках покращилася, а в деяких залишилася незмінною. Зокрема, ефективність роботи методу при розв'язанні задачі для трьох джерел РГ в ЕМ IEEE 9 значно зросла –  $k_{eff}$  зменшився з 23,2 до 4,69 %. Розміщення двох джерел РГ в ЕМ IEEE 39 вимагає проведення такої ж кількості випробувань, як і раніше. А для розв'язання задачі встановлення двох джерел РГ в 57-шинній ЕМ треба виконати стільки ж випробувань, скільки існує розв'язків цієї задачі, хоча це менше, ніж раніше (табл. 1). Таким чином, обмеження рівня впровадження джерел РГ в електричні мережі подекуди покращило ефективність роботи методу, проте існує необхідність більш детального дослідження впливу рівня впровадження джерел РГ в ЕМ на розв'язки задачі.

Далі наведемо розподіли відносних значень  $W^*$  (стосовно відповідного  $W_{max}$ ) цільової функції розв'язків для різних ЕМ. Встановлено, що при різній кількості джерел РГ в ЕМ розподіл дещо змінюється, але на вигляд вони дуже схожі. На рис. 5 а-в зображено розподіли при розміщенні одного, двох та трьох джерел РГ відповідно в ЕМ IEEE 9. Варто зазначити, що кожна мережа має власний розподіл, який не схожий на розподіли інших мереж. На рис. 5 г наведено розподіл при розміщенні двох джерел РГ в ЕМ IEEE 39. З рис. 5 г видно, що розв'язків для двох джерел РГ з рівнем впровадження понад 0,4 в.о. немає. Аналіз статистичних випробувань показав, що у розв'язків з рівнем впровадження понад 0,4 в.о. не збігається ітераційний розрахунок усталеного режиму. З цього можна зробити висновок, що у різних мережах можна розмістити різну потужність джерел РГ, проте попередньо невідомо яку саме.

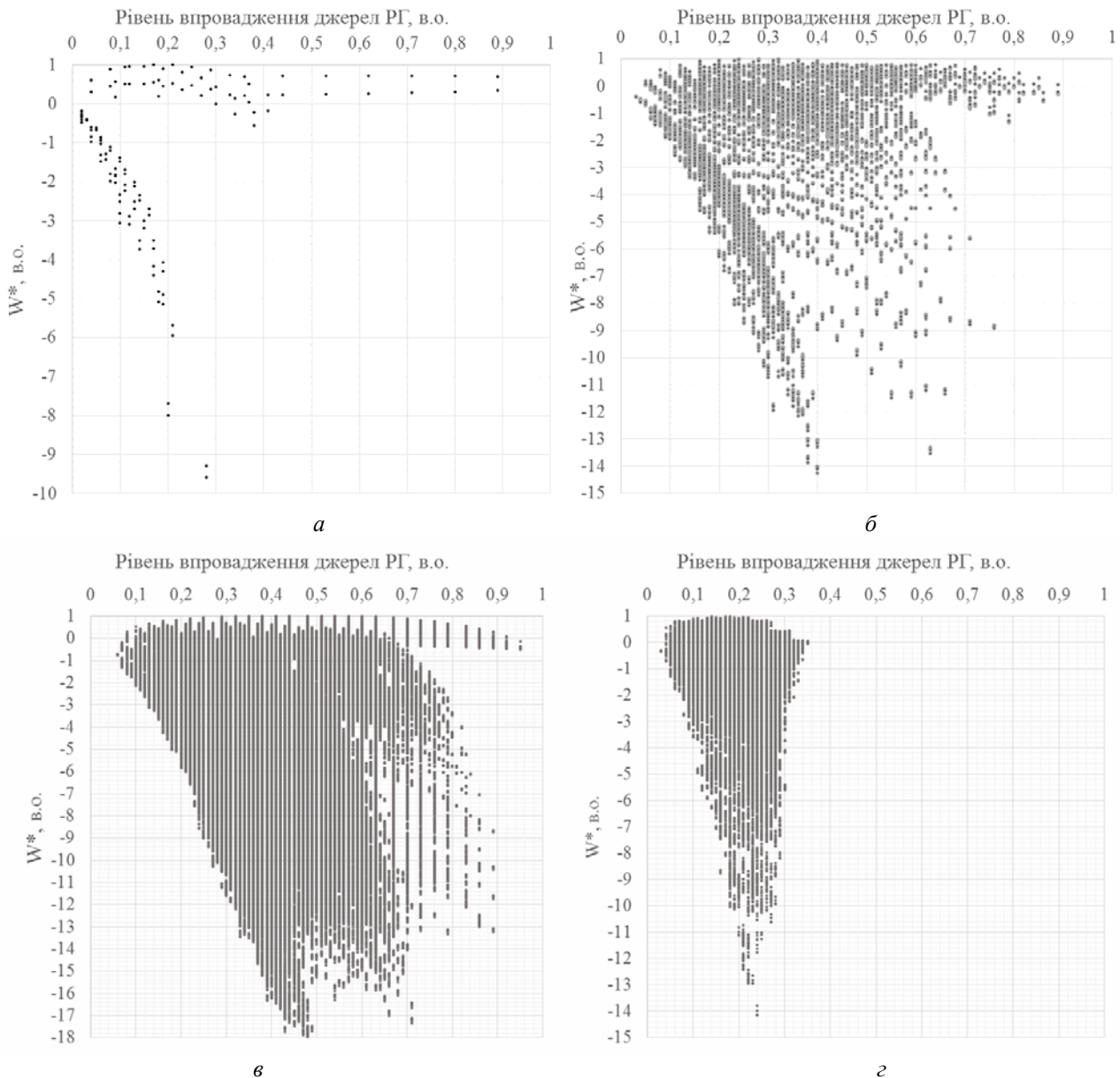


Рис. 5

Перевірка впливу кількості  $R$  кроків потужності в діапазоні від  $P_{n.min}$  до  $P_{n.max}$  показала, що структура розподілу розв'язків не змінюється, а лише стає більш детальною. На рис. 6 наведено розподіли значень  $W^{(i)}$  цільової функції розв'язків при розміщенні двох джерел РГ в ЕМ IEEE 14 при  $R = 10$  (а) та  $R = 100$  (б). Варто зазначити, що частка оптимальних розв'язків при збільшенні  $R$  залишилася майже незмінною. Кількість необхідних випробувань також залишилася майже незмінною, проте загальна кількість варіантів, як і ефективність роботи методу, зростає у 100 разів.

Дослідження оптимального рівня впровадження джерел РГ в ЕМ показало наскільки важливим є питання вибору місць встановлення джерел РГ. На рис. 7 показано розподіл відносних значень цільової функції за різних рівнів впровадження двох джерел РГ в дослідних ЕМ IEEE 9 (а) та IEEE 14 (б). Вертикальними чорними лініями обмежено оптимальні рівні впровадження РГ у цих мережах. Маленька чорна область — це область з оптимальними розв'язками. Як можна побачити з графіків, у деяких мережах можуть бути надзвичайно важливими місця підключення джерел РГ. Наприклад, оптимальний рівень впровадження РГ у дослідну ЕМ IEEE 9 складає від 0,21 до 0,35 в.о. від навантаження мережі. Та разом з тим неправильне розміщення в мережі такої потужності може значно погіршити режимні параметри. Як видно з цього графіка, значення цільової функції  $W^{*(i)}$  окремих розв'язків за такого ж рівня впровадження може бути дуже низьким. Тоді як у дослідній мережі IEEE 14 таких низьких значень не спостерігається.

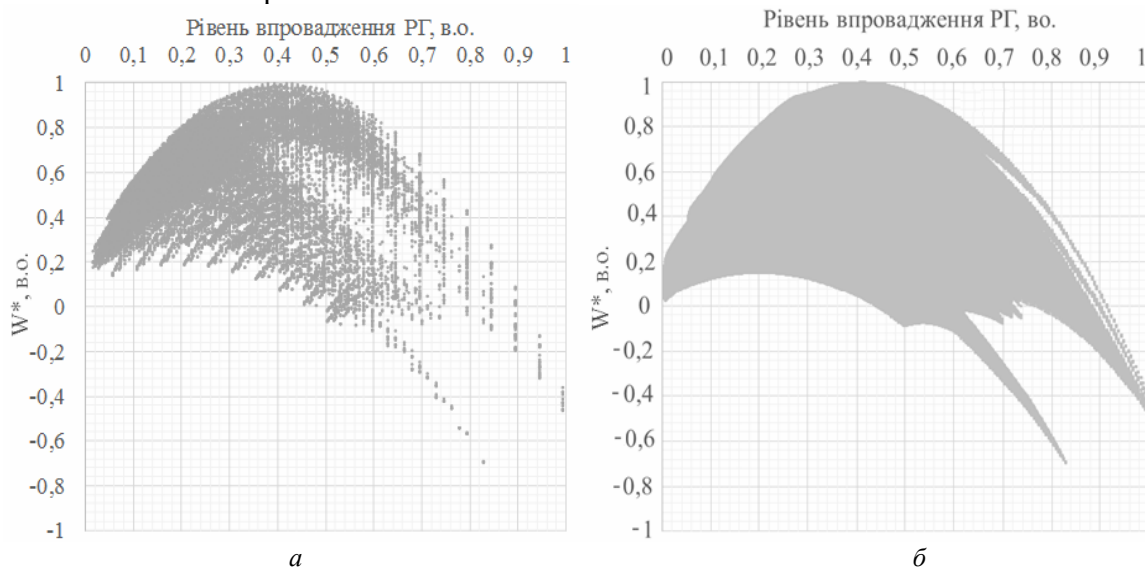


Рис. 6

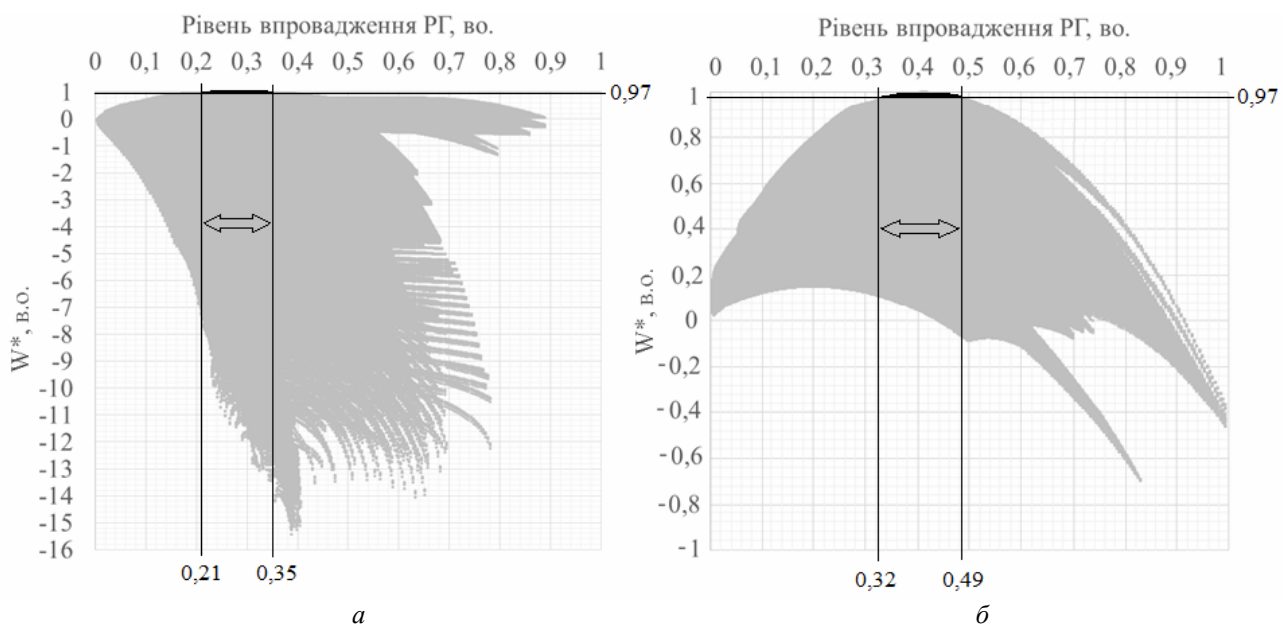


Рис. 7

Для різних дослідних мереж та різної кількості джерел РГ було визначено оптимальні рівні впровадження (табл. 3). З'ясовано, що оптимальний рівень впровадження джерел РГ зростає при збільшенні кількості джерел РГ в ЕМ та не залежить від розмірності мережі. При цьому частка оптимальних варіантів розміщення джерел РГ в ЕМ зменшується при збільшенні кількості джерел РГ та також не залежить від розмірності електричної мережі (табл. 4).

Таблиця 3

Електрична мережа		IEEE 9	IEEE 14	IEEE 39	IEEE 57
Кількість джерел РГ	1	0,17 – 0,21	0,35 – 0,41	0,10 – 0,14	0,19 – 0,20
	2	0,24 – 0,32	0,33 – 0,49	0,14 – 0,21	
	3	0,29 – 0,65			

Таблиця 4

Електрична мережа		IEEE 9	IEEE 14	IEEE 39	IEEE 57
Кількість джерел РГ	1	1,25%	0,83%	0,26%	0,18%
	2	0,04%	0,29%	< 0,01%	
	3	0,01%			

Таким чином, попередньо не дослідивши мережу, неможливо зробити висновок щодо оптимального рівня впровадження джерел РГ в ЕМ, що в свою чергу не дає можливості звужити область пошуку оптимальних розв'язків і підвищити ефективність роботи методу.

Ще одним важливим питанням, що також впливає на ефективність роботи методу, є власне визначення достатності кількості статистичних випробувань Монте-Карло [6], оскільки недостатнє число випробувань не даватиме бажаної достовірності результатів, а надмірне число випробувань знижуватиме ефективність роботи методу. Досі кількість необхідних випробувань визначалася при відомому глобальному максимумі, проте така інформація недоступна без попереднього розв'язання задачі.

З метою визначення достатності кількості випробувань можуть контролюватися такі параметри сукупності розв'язків: максимальне та середнє значення, медіана, середньоквадратичне відхилення тощо. Проте спостереження за цими параметрами не дає підстав стверджувати, що ті чи інші параметри збігаються. Для прикладу на рис. 8 наведено залежність середньоквадратичного відхилення значень цільової функції від кількості випробувань для випадку розміщення двох джерел РГ у мережі IEEE 14. Кількість необхідних випробувань у такому випадку становить близько 1100, але, як видно

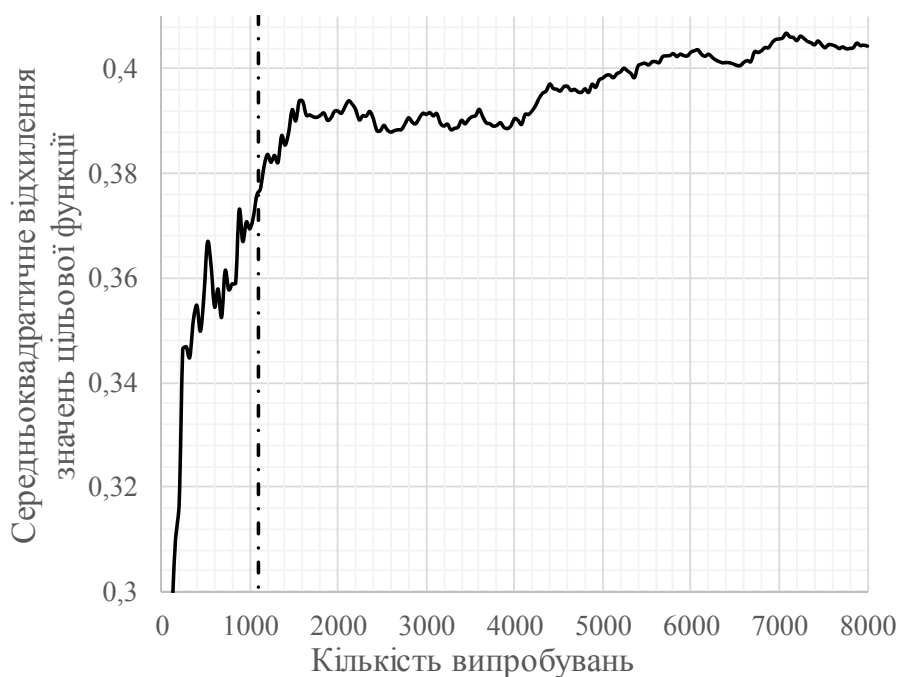


Рис. 8

на рис. 8, збіжності графіка не спостерігається. Окрім того, розрахунок власне середньоквадратичного відхилення вимагає доволі багато обчислень, що значно збільшує тривалість розрахунків.

Таким чином, можна зробити висновок, що розроблений метод у представленому вигляді має обмежену сферу використання. Хоча при порівнянні з повним перебором всіх можливих розв'язків у окремих випадках цей метод показує вищу швидкість, проте заздалегідь невідомо чи буде метод ефективним у тому чи іншому випадку,



не кажучи вже про проблему невизначеності достатньої кількості випробувань. Отже, необхідно розробити новий метод, який би не мав таких недоліків.

**Висновки.** Проведено комплексне дослідження роботи методу на різних дослідних ЕМ. Визначено, що недоцільно виконувати пошук оптимальних місць встановлення та потужності джерел РГ в ЕМ при рівнях впровадження понад 100 %. Тому розроблено додаткові обмеження потужності джерел РГ. З'ясовано, що оптимальний рівень впровадження джерел РГ зростає при збільшенні кількості джерел РГ в ЕМ та не залежить від розмірності мережі. При цьому частка оптимальних варіантів встановлення РГ в ЕМ зменшується при збільшенні кількості джерел РГ і також не залежить від розмірності електричної мережі. Дослідження ефективності роботи методу з використанням статистичних випробувань Монте-Карло у порівнянні з повним перебором варіантів показало, що кількість необхідних випробувань для отримання оптимального розв'язку не залежить від загальної кількості можливих варіантів, а залежить від частоти появи оптимальних розв'язків. Таким чином, ефективність запропонованого методу збільшується при зростанні кількості можливих варіантів встановлення РГ в ЕМ, тобто при більш точному визначенні оптимальної потужності, але для цього необхідно проводити пошук в області оптимальних розв'язків. Проте питання визначення необхідної кількості випробувань так і не було вирішеним. Отже, розроблений метод у представленому вигляді не може бути використаний для розв'язання поставленої задачі, і тому постає необхідність розробки нового методу без зазначених недоліків.

1. Гончаренко І.С. Окремі питання підвищення ефективності методу розв'язання задачі визначення оптимальних місць встановлення та потужності розосередженої генерації // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 42. – С. 47–51.
2. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46–53.
3. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Основні проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» мережі // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 25–26.
4. Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С., Блонська О.В. Визначення оптимальних місць встановлення та величин потужності відновлюваних джерел енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 37. – С. 26–33.
5. Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С., Захаров А.М. Обмеження потужності відновлюваних джерел енергії за умовами приєднання до електричної мережі // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 43. – С. 18–23.
6. Черненко П.А. К вопросу об определении необходимого числа испытаний для оценки влияния погрешности исходных данных на результаты расчета режимов энергосистем с помощью метода Монте-Карло // Проблемы технической электродинамки. – 1972. – № 36. – С. 70–71.
7. *Электрические системы*. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики: Под. ред. В.А. Веникова. Учебн. пособие для электроэнерг. вузов. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.
8. Akorede M.F., Hizam H., Aris I., Ab Kadir M.Z.A. A Review of Strategies for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems // Research Journal of Applied Sciences. – 2010. – No. 5 (2). – P. 137–145.
9. *Energy from renewable sources*. Eurostat. Режим доступу: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_from\\_renewable\\_sources](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_from_renewable_sources).
10. Goncharenko I.S. Distributed generation optimal placement. Climatic pattern consideration // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016). – 2016. – P. 93–96.
11. Lukianenko L.M., Goncharenko I.S., Blonska O.V. Determination of the Optimal Placement and Capacity of Distributed Generation // Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014). – 2014. – P. 159–162.

**Л.Н. Лук'яненко**, канд. техн. наук, **І.С. Гончаренко**, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

**Анализ эффективности использования метода Монте-Карло для решения задачи определения оптимальных мест установки и мощности источников распределенной генерации**

*Постоянный рост доли источников распределенной генерации в структуре генерации энергосистем несет не только положительные изменения. Установка источников распределенной генерации в неподходящих местах и несоответствующей мощности может ухудшить параметры установившегося режима электрических сетей, например, уровни напряжения в узлах сети. В работах [1, 4, 5, 10, 11] разработан метод для решения задачи оптимального размещения источников распределенной генерации. В разработанном методе применяются статистические испытания Монте-Карло в сочетании с многокритериальной постановкой задачи. Целью настоящей работы является анализ работы метода на различных электрических сетях. Для исследова-*

ний використовувались відомі дослідницькі електричні мережі IEEE. Результати аналізу показали, що розроблений метод в представленої формі має обмежену область застосування і тому виникає необхідність розробки нового методу без визначених в ході дослідження недоліків. Також в ході дослідження встановлено, що для будь-якої електричної мережі існує власний оптимальний рівень введення джерел розподіленої генерації, який хоч і зростає при збільшенні кількості цих джерел в мережі, однак не залежить від розмірності мережі і невідомий без попередніх досліджень. Бібл. 11, рис. 8, табл. 4.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, метод Монте-Карло, оптимальний рівень введення, оптимізація, розподілена генерація.

**L. Lukianenko, I. Goncharenko**

Institute of electrodynamics of the National academy of sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

**Critical examination of the previously developed Monte-Carlo method for distributed generation optimal placement**

*Constant growth of distributed generation (DG) in power systems has not only positive changes. Incorrect placement of DG can worsen steady-state parameters of a power grid, for example, voltage profile. Method for optimal DG placement had been developed previously [1, 4, 5, 10, 11]. The object of this paper was to critically examine the proposed method performance on different power grids. Examination of the method has been carried out on the IEEE 9-, 14-, 39- and 57-bus test systems. The results of simulation tests show that this method has limited usage. Performance of the method greatly depends on power grid. In particular, method extremely fast finds optimal DG placement in 14-bus test system; however, optimal DG placement in 57-bus test system requires to perform the amount of calculations, which is comparable to the amount of possible solutions. Besides, simulation data analysis shows that there is some optimal penetration of DG in the power grid, which rises with the number of DG sources in the power grid, but does not depend on the power grid size and is unknown without previous examination. References 11, figures 8, tables 4.*

**Key words:** distributed generation, Monte-Carlo method, optimal penetration, optimization, renewable energy sources.

Надійшла 06.12.2016

Received 06.12.2016

УДК 621.316

## СПОСІБ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ СТРУМУ СИСТЕМИ МЕРЕЖА – ТИРИСТОРНИЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

**О.І. Чиженко**, докт. техн. наук, **І.В. Трач**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: trachi@ied.org.ua

*Запропоновано спосіб регулювання реактивної потужності, що генерується тиристорним регульованим компенсатором (ТРК) у мережу, який полягає у тому, що у процесі плавного регулювання здійснюється перемикання під навантаженням відпайок обмоток індуктивних реакторів  $Rk_3$ , чим забезпечується суттєве покращення якості вхідного струму ТРК (він же струм мережі) шляхом зменшення місткості у ньому вищих гармонік. Бібл. 3, рис. 4, табл. 2.*

**Ключові слова:** електрична мережа, ТРК, регулювання реактивної потужності, якість струму, коефіцієнт гармонік струму.

При розробці тиристорних компенсаторів (ТРК) для компенсації реактивної потужності в електричних мережах одним з важливіших питань є якість вхідного струму приладу, місткість у ньому вищих гармонік. Не менш важливе питання – якими матеріальними затратами досягається бажаний результат, зокрема, представляє вагомий інтерес яка встановлена потужність пристрою та елементів, з яких він складається, які їх масогабаритні показники. З'ясування кореляції між цими питаннями у конкретному ТРК є метою цієї роботи. Цей аналіз проводиться з урахуванням впливу параметрів електричної мережі.