

*В. Г. Сиченко, канд. техн. наук,*

*Д. О. Босий, аспірант*

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)*

## **КРИТЕРІЇ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗМІННОГО СТРУМУ**

### **Вступ**

Компенсація реактивної потужності в будь-якій електроенергетичній системі здійснюється для зменшення втрат енергії та поліпшення режиму напруги. У системах тягового електропостачання змінного струму широко застосовуються конденсаторні установки поздовжньої та поперечної компенсації [1].

Головним недоліком цих установок є дискретний характер функціонування, обумовлений кінцевою ємністю ступенів компенсації. В реальних умовах функціонування системи тягового електропостачання змінного струму це призводить до явища перекомпенсації (при низькому навантаженні) або до недокомпенсації (при великому навантаженні), які зменшують ефективність їх застосування.

Для усунення цих негативних факторів застосовуються пристрої регульованої компенсації: ступеневі або з плавним регулюванням.

Сучасний стан розвитку силової електроніки дозволяє створити пристрої керованої компенсації у реальному часі.

Вперше на залізницях України з липня 2008 р. розпочато експлуатацію пристрою керованої компенсації на тяговій підстанції Одеської залізниці чеського виробництва у вигляді одноланкового фільтрокомпенсуючого пристрою. Батарею конденсаторів увімкнено у випереджаючу фазу тягової підстанції послідовно з реактором. Для декомпенсації надлишку реактивної потужності на приєднанні 10 кВ тягового трансформатора встановлено декомпенсуючий реактор послідовно з бітиристорним регулятором.

На іншій тяговій підстанції для забезпечення пропускної спроможності електрифікованої ділянки з 2009 р. встановлено подібний компенсуючий пристрій, тільки у двофазному виконанні (у відстаючу та випереджаючу фази) та з декомпенсуючим контуром безпосередньо на приєднанні 27,5 кВ тягового трансформатора.

Розробка і розпочате впровадження таких пристроїв обумовлює необхідність формування критеріїв якості їх функціонування.

Для дискретних пристроїв компенсації реактивної потужності прийнятий закон регулювання по мінімуму втрат потужності в елементах системи тягового електропостачання з урахуванням несиметрії струмів в тягових трансформаторах та рівня напруги (при встановленні на підстанції) або визначенням вищих гармонійних складових (при встановленні в тяговій мережі) [1].

Досвід експлуатації пристроїв компенсації реактивної потужності свідчить про неоптимальність їх використання в умовах нестаціонарного характеру тягового навантаження.

Окремо необхідно звернути увагу на проблему якості електричної енергії на районній обмотці тягового трансформатора, від якої отримують живлення нетягові споживачі.

Метою цієї статті є розробка критеріїв оцінки якості функціонування пристроїв регульованої компенсації реактивної потужності та визначення в загальному виді оптимального закону керування.

### ***Постановка задачі***

Впровадження пристроїв регульованої компенсації реактивної потужності дозволяє в режимі реального часу вирішити низку оптимізаційних задач використання електричної енергії: створення заданого режиму напруги в тяговій мережі, фільтрація вищих гармонійних складових, поліпшення показників якості електричної енергії, забезпечення відсутності перекомпенсації (недокомпенсації) реактивної потужності.

Реалізація цих завдань вимагає розробки системи управління регульованою компенсацією реактивної потужності, яка забезпечує оптимальність функціонування в умовах впливу випадкових факторів.

Зазначимо, що за цих умов найкращі умови функціонування можуть бути досягнуті тільки «в середньому» [2].

Саме в цьому сенсі необхідно розглядати оптимальність роботи регульованої компенсації реактивної потужності, за якої досягаються екстремуми показників якості роботи [3].

Критерії оптимальності повинні задовольняти наступним умовам [4]:

- 1) наявність фізичного змісту;
- 2) зведення до математичних співвідношень, які піддаються рішенню;
- 3) наслідки застосування отриманих рішень єдині та однозначні.

### ***Критерій керування компенсацією реактивної потужності***

В загальному випадку критерій оптимальності сформулюємо у вигляді деякої цільової функції

$$\Theta(I_{c1}, I_{c2}) = f(\Phi, \Xi, \Upsilon, K, \Lambda) \rightarrow \min, \quad (1)$$

при обмеженні плати за перетікання реактивної потужності [5]

$$\Pi \rightarrow \min. \quad (2)$$

В результаті виконаних на кафедрі «Електропостачання залізниць» експериментальних та теоретичних досліджень ефективності функціонування ком-

пенсуючих пристроїв на ділянках змінного струму встановлено, що оптимальне управління регульованою компенсацією реактивної потужності повинне базуватись на таких складових функції (1):

1.  $\Phi = f[\operatorname{tg}\varphi, Ex(\operatorname{tg}\varphi), As(\operatorname{tg}\varphi)]$  – рівень коефіцієнта реактивної потужності з врахуванням зміни ексцесу та асиметрії розподілу;
2.  $\Xi = f(I_L, I_{II}, \varphi_L, \varphi_{II})$  – рівень несиметрії струмів тягової підстанції;
3.  $\Upsilon = \{v_{1p}, v_{2p}, \dots, v_{kp}\}$  – величина несинусоїдності напруги;
4.  $K = f(\Xi, U_{2(l)})$  – величина несиметрії напруги тягової підстанції;
5.  $\Lambda = f(U_{1(l)}, \lambda, Q_{\text{комп}})$  – рівень напруги на приєднаннях.

Визначимо детальніше кожну зі складових критерію оптимальності.

### *Підтримання коефіцієнта реактивної потужності на заданому рівні*

Застосування пристроїв регульованої компенсації реактивної потужності теоретично дозволяє в будь-який момент часу досягти відсутності перетікань реактивної потужності. На практиці коефіцієнт реактивної потужності  $\operatorname{tg}\varphi$  на тяговій підстанції з пристроєм регульованої компенсації підтримується на деякому рівні. Відмінність від нуля  $\operatorname{tg}\varphi$  обумовлюється неможливістю компенсувати миттєві стрибки значень реактивної потужності унаслідок обмеженості потужності конденсаторних батарей.

Сумарна тривалість таких стрибків вище встановленої потужності конденсаторів на інтервалі спостереження не значна і не призводить до значного погіршення коефіцієнта реактивної потужності  $\operatorname{tg}\varphi$  (рис. 1).

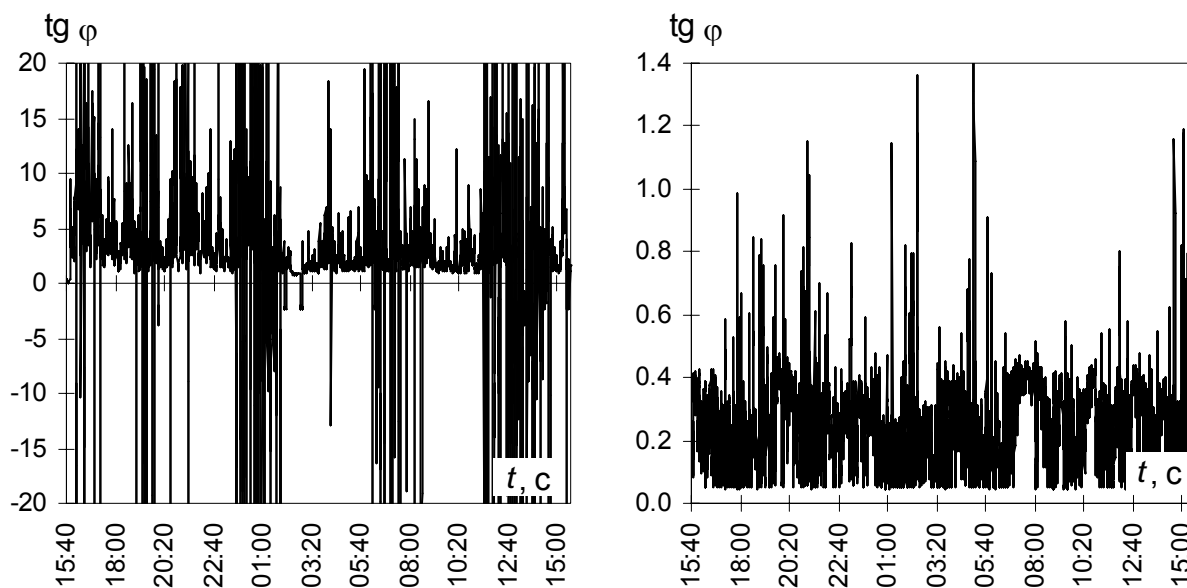


Рис.1. Коефіцієнт реактивної потужності плеча тягової підстанції:  
а) без компенсації; б) з регульованою компенсацією

Як видно з рис. 1 (а), коефіцієнт реактивної потужності в плечі живлення без компенсації реактивної потужності має досить велике значення та характеризується миттєвими стрибкоподібними змінами як в області додатних так і в області від'ємних значень. Пристрій регульованої компенсації реактивної потужності в цілому значно покращує ситуацію з перетіканнями реактивної потужності, рис. 1 (б).

Фізична суть регульованої компенсації реактивної потужності полягає у звуженні діапазоні зміни значень  $\text{tg}\varphi$  (рис. 2, табл. 1) та усуненні від'ємних значень, які виникають унаслідок генерації реактивної потужності зі сторони споживача. В показаному на рис. 1 (а) випадку, генерація реактивної потужності з боку тягової мережі викликана проблемою вирівнювальних струмів в тяговій мережі.

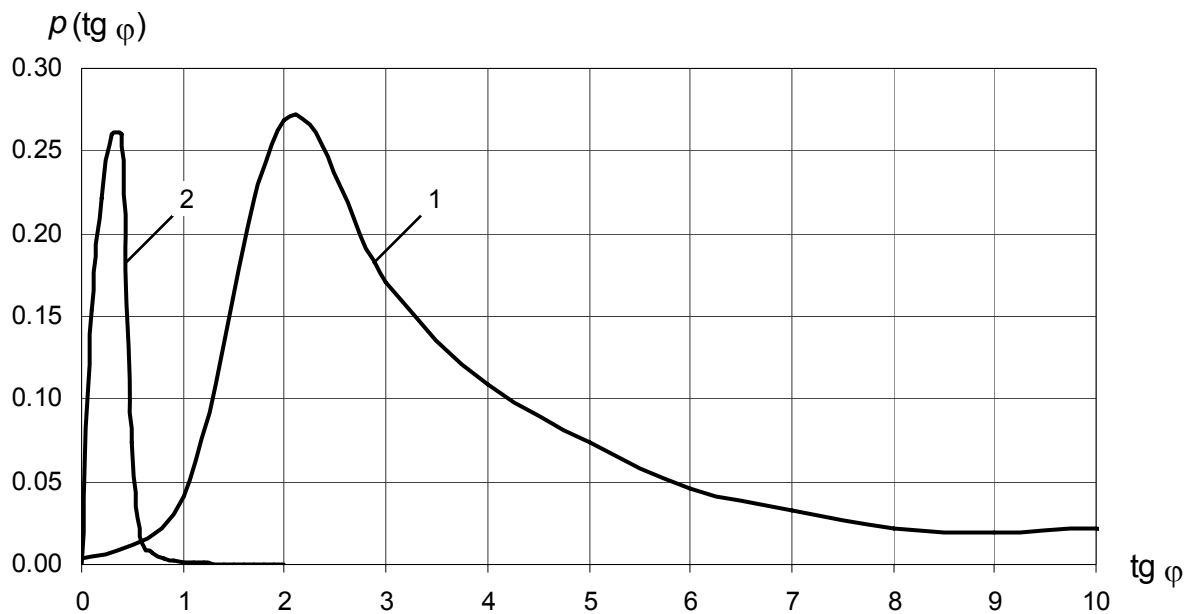


Рис. 2. Емпіричні функції розподілів густини ймовірностей коефіцієнта реактивної потужності: 1 – без компенсації; 2 – з регульованою компенсацією

Таблиця 1

**Числові характеристики коефіцієнта реактивної потужності**

№ пор.	Параметр	Плече живлення підстанції	
		без компенсації	з регульованою компенсацією
1	Математичне очікування $M(\text{tg}\varphi)$	5,056	0,253
2	Мода $Mo(\text{tg}\varphi)$	3,820	0,049
3	Медіана $Me(\text{tg}\varphi)$	2,432	0,249
4	Дисперсія $D(\text{tg}\varphi)$	0,083	0,021
5	Середньоквадратичне відхилення $\sigma(\text{tg}\varphi)$	0,287	0,144
6	Асиметрія $As(\text{tg}\varphi)$	56,824	1,873
7	Ексцес $Ex(\text{tg}\varphi)$	3229,0	13,62

Для розширення інформативності даного критерію управління пропонується додатково окрім коефіцієнта  $\operatorname{tg}\varphi$  використати числові характеристики розподілу значень  $\operatorname{tg}\varphi$ , які найбільше змінюються при зміні режиму роботи компенсуючого пристрою. Як видно з табл. 1., додатковими аргументами першої складової функції (1) можна використати асиметрію та ексцес розподілу.

Визначальний вплив даних критеріїв матиме на вибір оптимальних параметрів пристроїв регульованої компенсації реактивної потужності.

Як видно з рис. 1 (а), 2, пристрої регульованої компенсації реактивної потужності з контуром надлишкової декомпенсації частково зменшують і негативний вплив вирівнювальних струмів в системах тягового електропостачання, за рахунок декомпенсації реактивної складової цього струму.

### *Рівень несиметрії струмів тягової підстанції*

В існуючій теорії прийнято визначати коефіцієнт несиметрії струмів тягової підстанції з припущенням рівності кутів навантаження в плечах живлення, тобто  $\varphi_{\text{Л}} = \varphi_{\text{П}}$ , та замінюючи струми плечей живлення їх співвідношенням  $n = I_{\text{Л}}/I_{\text{П}}$ . В результаті для традиційної схеми живлення отримують наступне рівняння

$$K_{2I} = \frac{\sqrt{n^2 - n + 1}}{n + 1} \cdot 100. \quad (3)$$

Виконані дослідження показують відсутність кореляції між струмами в плечах живлення та кутами навантажень, що вказує на неприпустимість прийнятих припущень та некоректність застосування формули (3) у якості вихідної для визначення симетруючих струмів компенсації.

Відкидаючи прийняті припущення, отримано теоретичне співвідношення для струмів компенсації, за яких струми зворотної послідовності тягової підстанції відсутні, а саме

$$\Xi = \begin{vmatrix} I_{C1} \\ I_{C2} \end{vmatrix}^T = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \begin{vmatrix} I_{\text{Л}} \\ I_{\text{П}} \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} \sin\left(\varphi_{\text{Л}} - \frac{\pi}{6}\right) & -\cos\varphi_{\text{Л}} \\ \cos\varphi_{\text{П}} & \sin\left(\varphi_{\text{П}} + \frac{\pi}{6}\right) \end{vmatrix}. \quad (4)$$

### *Зниження несинусоїдності напруги*

Джерелом виникнення несинусоїдних спотворень для тягових підстанцій змінного струму є перетворювальні пристрої електрорухомого складу.

Зниження несинусоїдності напруги в мережі досягається установкою індуктивного реактора послідовно з ємностями компенсуючого пристрою, налаштованого з ними на квазірезонансну частоту. За необхідності можна встанов-

лювати декілька паралельних фільтрів. Тому наступним критерієм є варіаційний ряд квазірезонансних частот, налаштування на які резонансних фільтрів дозволить знизити коефіцієнт несинусоїдності напруги

$$\Upsilon = \{v_{1p}, v_{3p}, v_{5p}, \dots, v_{kp}\}, \quad (5)$$

де  $v_{1p}, v_{3p}, v_{5p}, \dots, v_{kp}$  – квазірезонансні частоти, які визначаються частотами непарного порядку дискретного спектру напруги.

На практиці, як правило, достатньо застосування одного фільтру на резонансній частоті, близькій до частоти третьої гармонійної складової (147–153 Гц).

#### *Величина несиметрії напруги тягової підстанції*

Несиметрія напруги на приєднаннях тягової підстанції в загальному випадку обумовлюється двома факторами: несиметрією струмів тягового навантаження та власною несиметрією живлячої мережі, яка в свою чергу може бути обумовлена іншими тяговими підстанціями. Для врахування цих факторів методом кореляційного аналізу виділяється кожна з цих складових, а функціональний вигляд залежності  $K = f(\Xi, U_{2(1)})$  набуває вигляд рівнянь нелінійної апроксимації

$$K_{2U} = \begin{cases} 0,248 \cdot \ln(K_{2I}) + 1,378, \\ 0,815 \cdot (K_{2I})^{0,249}, \\ 0,657 \cdot \ln(K_{2I}) - 0,453. \end{cases} \quad (6)$$

#### *Рівень напруги на приєднаннях тягової підстанції*

На даному етапі дослідження практично неможливо формалізувати залежність  $\Lambda = f(U_{1(1)}, \lambda, Q_K)$ , оскільки в загальному випадку для кожної тягової підстанції режим напруги є складним. Проте на даний момент очевидно є можливість ідентифікації цієї залежності за умови накопичення більшого обсягу статистичних даних, щонайменше для місячного чи річного періоду часу. В якості аргументів функції передбачається використання напруги прямої послідовності основної частоти  $U_{1(1)}$  первинної мережі, коефіцієнта  $\lambda$ , який визначає положення пристрою регулювання напруги під навантаженням та встановленої потужності компенсуючого пристрою  $Q_K$ .

З урахуванням цього можливе отримання співвідношення для струмів компенсації реактивної потужності, щоб необхідним чином впливати на рівень напруги на приєднаннях тягової підстанції.

### Обмеження плати за перетікання реактивної потужності

Всі розрахунки між суб'єктами господарювання, а саме між енергопостачальними компаніями та споживачами за перетікання реактивної потужності здійснюються відповідно до Методики обчислення плати за послуги з перетікання реактивної потужності [5].

Основна формула обчислення плати має три складові

$$P = P_1 + P_2 - P_3, \quad (7)$$

де  $P_1$  – основна плата за послуги,

$$P_1 = (WQ_{\text{сп}} + 3 \cdot WQ_{\text{ген}}) \cdot C_e \cdot D \cdot T, \quad (8)$$

де  $WQ_{\text{сп}}$  – величина спожитої реактивної потужності за розрахунковий період;  
 $WQ_{\text{ген}}$  – величина генерованої реактивної потужності за розрахунковий період з мережі споживача в мережу енергопостачальної компанії;  
 $C_e$  – середньозакупівельний тариф на активну електроенергію;  
 $D$  – економічний еквівалент реактивної потужності;  
 $T$  – тривалість періоду між розрахунками за електроенергію;  
 $P_2$  – надбавка за низьке значення коефіцієнта потужності,

$$P_2 = P_1 \cdot C_{\text{баз}} (K_{\text{ф}} - 1),$$

де  $C_{\text{баз}}$  – базове значення коефіцієнта стимулювання капітальних вкладень в пристрої компенсації реактивної потужності;  
 $K_{\text{ф}}$  – коефіцієнт, який визначається коефіцієнтом реактивної потужності;  
 $P_3$  – знижка за дотримання заданого енергопостачальною компанією коефіцієнта реактивної потужності. В умовах експлуатації тягових підстанцій знижка  $P_3$  не застосовується.

З аналізу залежностей складових  $P_1$  та  $P_2$  (рис. 3) впливають економічні критерії управління компенсацією.

Так з рис. 3, (а) видно, що при наявності нерегульованого (або ступінчастого) пристрою економічно доцільним є відключення (або зменшення кількості ступенів) за умови зниження реактивної потужності споживача  $Q_{\text{сп}}$  нижче деякого критичного рівня  $Q_{\text{кр}}$ , тобто  $Q_{\text{сп}} < Q_{\text{кр}}$ . У випадку, якщо  $Q_{\text{сп}} > Q_{\text{кр}}$ , то доцільно вмикати компенсуючий пристрій (або збільшувати кількість ступенів).

Величина критичної реактивної потужності  $Q_{\text{кр}}$  пов'язана з встановленою потужністю компенсуючого пристрою, та визначається з виразу (9).

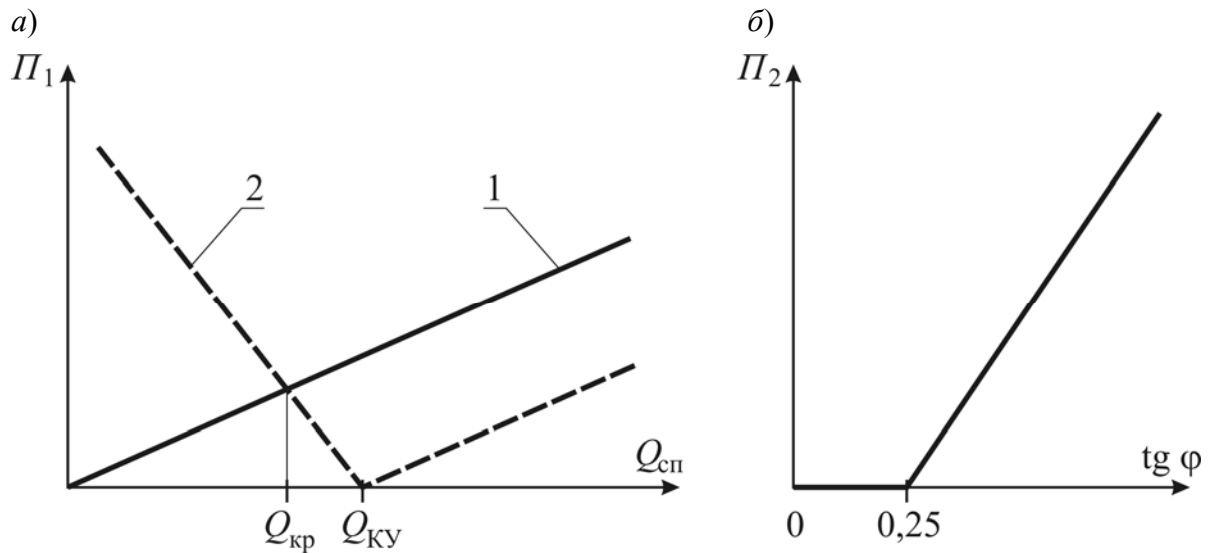


Рис. 3. Залежності плати за послуги з перетікання реактивної потужності від реактивної потужності споживача (а) та коефіцієнта реактивної потужності (б):  
1 – без компенсації; 2 – з компенсацією

Нехай потужність споживача дорівнює  $Q_{сп}^*$ . Запишемо вирази для визначення плати  $\Pi_1$  без компенсуючого пристрою, та з ним

$$\Pi_1^{(1)} = (WQ_{сп}^*) \cdot C_e \cdot D \cdot T, \quad \Pi_1^{(2)} = 3(WQ_k - WQ_{сп}^*) \cdot C_e \cdot D \cdot T.$$

Прирівнюючи останні два вирази для  $\Pi_1^{(1)} = \Pi_1^{(2)}$ , та спрощуючи, отримаємо

$$Q_{сп}^* = 3Q_k - 3Q_{сп}^*.$$

Оскільки  $\Pi_1^{(1)} = \Pi_1^{(2)}$ , та  $Q_{кр} = Q_{сп}^*$ , а значить

$$Q_{кр} = \frac{3}{4}Q_k. \quad (9)$$

Тобто при досягненні реактивної потужності споживача критичного значення, що дорівнює трьом чвертям потужності компенсуючого пристрою, величина плати за послуги з перетікання реактивної потужності без компенсуючого пристрою дорівнює величині плати з компенсуючим пристроєм.

З аналізу залежності  $\Pi_2 = f(tg \varphi)$  (рис. 3, б), видно що мінімум  $\Pi_2$  досягається при  $tg \varphi \leq 0,25$ .

Остаточна система економічних критеріїв має вигляд

$$\Pi = \begin{cases} \Pi_1^{(1)} \rightarrow \min, & Q_{сп} \leq \frac{3}{4}Q_k; \\ \Pi_1^{(2)} \rightarrow \min, & Q_{сп} > \frac{3}{4}Q_k; \\ \Pi_2 \rightarrow \min, & tg \varphi \leq 0,25. \end{cases} \quad (10)$$

В результаті аналітичного розкриття складових цільової функції (1) є можливим визначення оптимального закону керування регульованими пристроями компенсації реактивної потужності. З огляду на її багатовимірність застосо-



вується метод простору станів. Так на рис. 4 приведено простори станів, локальні мінімуми яких визначають струми компенсації в плечах тягової підстанції, за яких можливе зниження коефіцієнта несиметрії струмів ( $K_{2I}$ ) та коефіцієнта реактивної потужності ( $\text{tg}\varphi$ ).

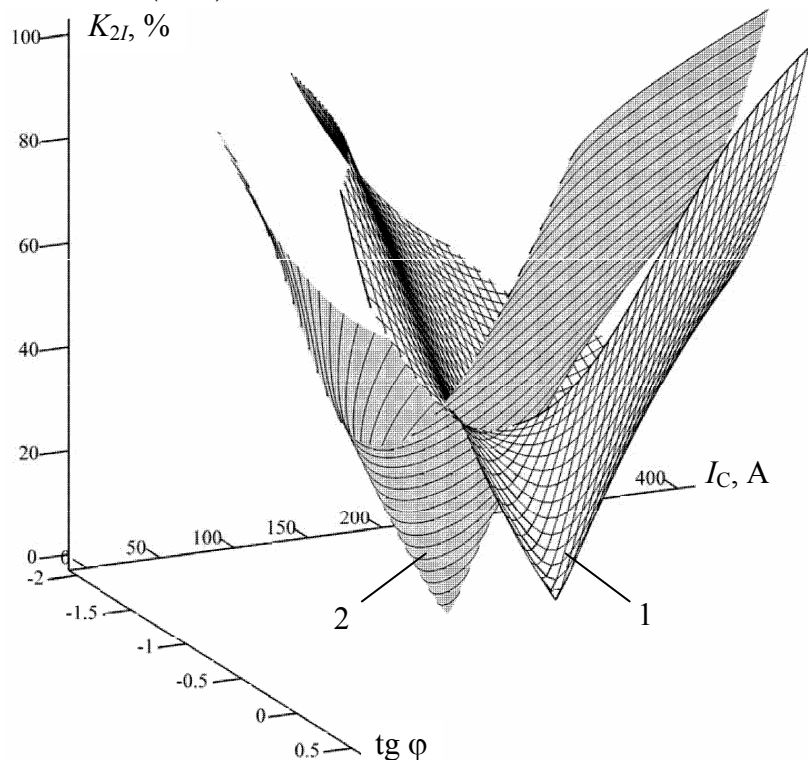


Рис. 4. Простори станів для визначення струмів компенсації в лівому (1) та правому (2) плечах живлення тягової підстанції

## Висновки

1. Проаналізовано застосування пристроїв компенсації реактивної потужності в системах тягового електропостачання змінного струму.
2. Запропоновано критерії керування пристроями компенсації реактивної потужності з плавним та ступінчастим регулюванням.
3. Отримано простори станів для визначення оптимальних законів керування пристроями компенсації реактивної потужності.

## Список літератури

1. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
2. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования [Текст] / Г. Ф. Зайцев. – К.: Выща шк., 1989. – 431 с.
3. Попович, М. Г. Теорія автоматичного керування [Текст] / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1977. – 544 с.
4. Купер, Дж. Вероятностные методы анализа сигналов и систем [Текст] / Дж. Купер, К. Макгиллем. – М.: Мир, 1989. – 376 с.
5. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затв.: Наказ Міністерства палива та енергетики України 17.01.2002, № 19 [Текст] / Мін-во палива та енергетики України. – К., 2002. – 14 с.