

УДК 621.331.3.025.1

Д. О. Босий, канд. техн. наук, доцент  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЗМІННОГО СТРУМУ В УМОВАХ ТРАНЗИТНИХ ПЕРЕТІКАНЬ ПОТУЖНОСТІ

*В статті розглядається явище виникнення вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму при відхиленнях кута зсуву фаз однойменних напруг суміжних тягових підстанцій, що паралельно живлять міжпідстанційну зону. На підставі результатів експериментальних досліджень тягової підстанції Одеської залізниці досліджується вплив пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності на характеристики вирівнювальних струмів. Запропонована методика визначення параметрів поздовжньої компенсації реактивної потужності у відсмоктуючому фідері для переведення проблеми транзитних перетікань у реактивну площину з подальшим застосуванням пристроїв поперечної компенсації.*

**Ключові слова:** електрична тяга, змінний струм, тягова підстанція, паралельна робота, транзит потужності, вирівнювальний струм.

### Вступ

Електрифіковані залізниці змінного струму є досить специфічним споживачем електричної енергії. Окрім того, що електротягове навантаження є несиметричним та нелінійним споживачем зі змінним у часі та просторі навантаженням, мають місце істотні відмінності від інших споживачів. Ці відмінності полягають у тому, що електрифікована залізниця є розосередженим приймачем електроенергії та її живлення априорі неможливе від одного вузла енергосистеми.

---

© Босий Д. О., 2015

У загальному випадку тягові підстанції отримують живлення від різних вузлів однієї або навіть декількох енергосистем. Це призводить до того, що тягові підстанції мають різні приведені зовнішні характеристики та замикаючись через тягову мережу спостерігається відмінність у модулях та кутах зсуву фаз напруг в точках приєднання до вузлів енергосистем. Наявність вказаних чинників призводить до виникнення транзитних перетікань потужності між вузлами живлення, які більш за все проявляються при відсутності чи відносно низьких навантаженнях в тяговій мережі.

В умовах лібералізації ринкових відносин, коли залізниці України стали ліцензіатами оптового ринку, разом з іншими суб'єктами ринку формуються відносини, які не передбачають оплати послуг за будь-які транзитні перетікання активної та реактивної потужностей.

Системі тягового електропостачання змінного струму для забезпечення заданих розмірів руху та пропускної спроможності технологічно необхідне одночасне живлення ділянок тягової мережі від двох суміжних тягових підстанцій, бо інакше спроектовані параметри ділянок електрифікованих залізниць не забезпечать нормований рівень на лімітуючих блок-ділянках. В нормальному режимі роботи пристроїв електропостачання для системи змінного струму не характерні проблеми з рівнем напруги в контактній мережі, навіть при впровадженні швидкісного та великовантажного руху.

### Методика вимірювань

У випадках порушення нормальної схеми живлення в системі зовнішнього електропостачання між векторами однойменних первинних напруг виникає кут зсуву фаз, який викликає відповідну векторну різницю напруг на шинах тягового навантаження підстанцій. Під дією різниці напруг, зумовленою саме кутом зсуву фаз тяговою мережею, яка має активно-індуктивний характер, протікає майже активний вирівнювальний струм. Внаслідок того, що тягові підстанції можуть у схемі зовнішнього електропостачання живитись від різних енергосистем, в системі тягового електропостачання виникають транзитні перетоки потужності, які будуть однозначно визначатись кутом зсуву фаз між векторами напруги, що паралельно живлять міжпідстанційну зону.

Для чисельного визначення та фіксації цього кута зсуву фаз, застосовувалась схема (рис. 1), яка додатково вимагає консольного живлення дослідної ділянки тягової мережі від суміжної підстанції. В такому випадку за допомогою наявного аналізатора потужності, відповідно зі схемою, можна виміряти різницю між напругами суміжних тягових підстанцій за величиною та кутом зміщення фаз. Саме кут зміщення векторів напруги, що живлять міжпідстанційну зону, визначатиме можливість протікання та активний характер перетоків електроенергії.

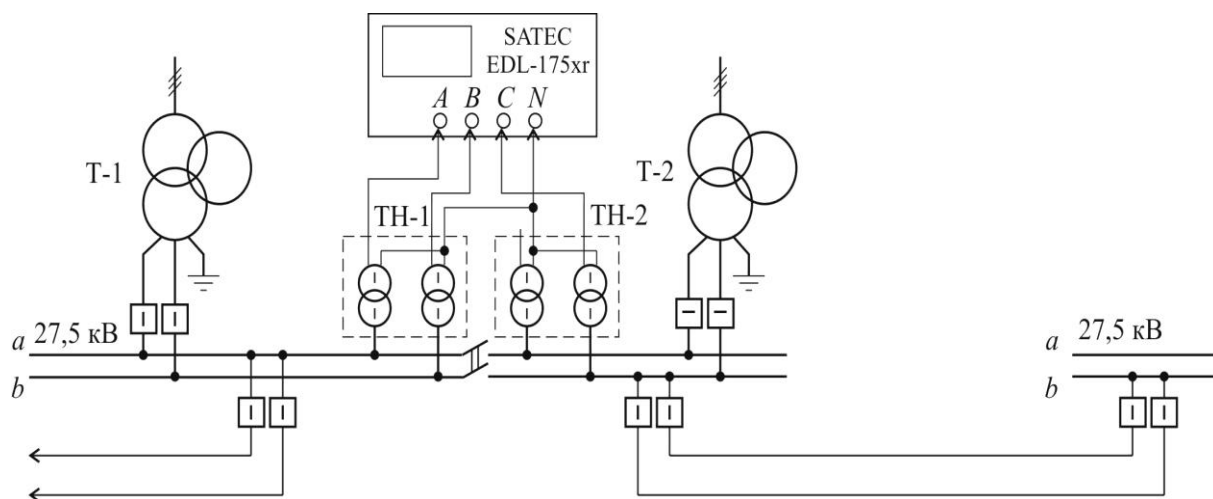


Рис. 1. Схема проведення вимірювань на тяговій підстанції для вимірювання кута зсуву фаз між однойменними векторами напруги

### Аналіз отриманих результатів

Керування режимом роботи системи змінного струму повинне керуватись кутом зсуву фаз векторів напруги суміжних тягових підстанцій. Вимірювання цього параметру режиму в умовах експлуатації дещо ускладнюється, оскільки необхідно мати джерело опорної напруги або вимушено застосовувати ненормальні схеми живлення. Так, для отримання приведеної на рис. 2 реєстрограми застосовувалось консольне живлення ділянки між суміжними підстанціями та розділення секцій шин 27,5 кВ з підключенням до трансформаторів напруги кожної секції вимірювальної апаратури.

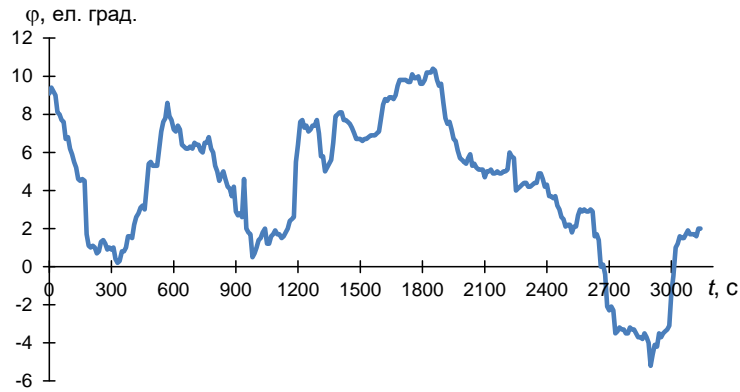


Рис. 2. Зміна кута зсуву фаз між однойменними фазами у часі

Активний характер вирівнювальних струмів в такому випадку ускладнює технічну реалізацію заходів протидії транзитним перетіканням. Тому застосування поперечної компенсації реактивної потужності впливатиме лише на реактивну складову вирівнювального струму. Перемикання положень апацф трансформатора внесе певні корективи (рис. 3) але без остаточного їх уникнення. Вирішення можливе застосуванням фазозсуваючих силових трансформаторів з інтелектуальною системою управління. Вимірювальними органами такої системи можуть бути пристрої комплексних вимірювань електричних параметрів мережі, а виконавчими – пристрої перемикання обмоток трансформаторів, які зібрані за схемою зигзагу [1]. Проте, як показав досвід експлуатації, використання фазозсуваючих трансформаторів виправдане в мережах напругою 150 кВ та вище. Тому, очевидно, що для узгодження тягових підстанцій змінного струму, які отримують живлення в основному напругою 110 кВ, та в окремих випадках в якості винятку – 154 кВ, застосування фазозсуваючих трансформаторів не буде виправданим, ще й тому, що узгодження відбуватиметься лише за однією фазою трифазної системи.

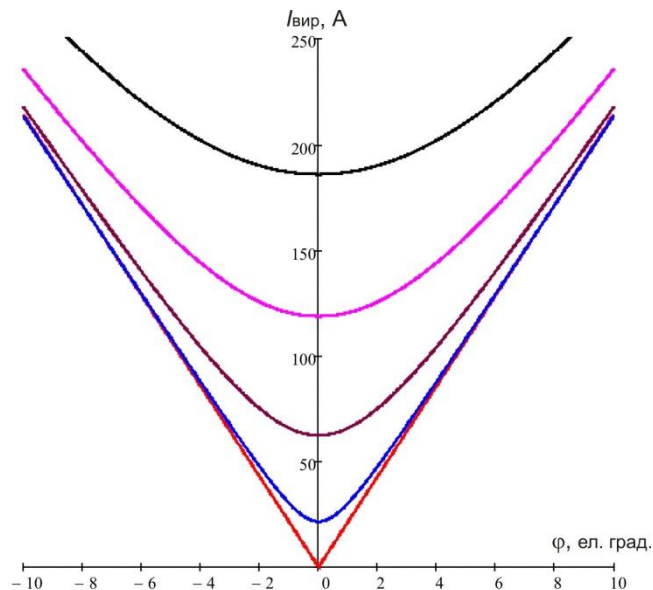


Рис. 3. Залежності вирівнювальних струмів в тяговій мережі на фазовій площині від положень перемикачів апацф трансформаторів

#### Застосування поздовжньої та поперечної ємнісної компенсації

На тягових підстанціях електрифікованих залізниць з трифазними трансформаторами можливе встановлення установок поздовжньої компенсації у відсмоктуючий фідер [2]. Доцільність цього рішення полягає в тому, що, по-перше, при підвищених навантаженнях і в лівому, і в правому плечах живлення компенсація у відсмоктуючому фідері приймає участь у підвищенні напруги. Необхідно відмітити, що при ввімкненні поздовжньої компенсації у плечі живлення для досягнення таких умов знадобилося вмикання двох установок.

По-друге, при ввімкненні поздовжньої компенсації у відсмоктуючий фідер напруга на плечі живлення не буде залежати від навантаження іншого плеча, тобто усувається ефект випереджуючої та відстаючої фаз. При цьому досягається симетрія напруги при рівних струмах плечах живлення. Та, нарешті, підключення компенсації у відсмоктуючий фідер знижує клас напруги застосовуваного обладнання та спрощує конструктивне виконання установки.

На тягових підстанціях змінного струму встановлюють, як правило, два силових трансформатори. Зазвичай у роботі знаходиться лише один трансформатор, але при відключенні сусідньої підстанції, а також при значному підвищенні розмірів руху та ваги вантажних поїздів з різних причин вмикають другий трансформатор. Таким чином, за рахунок включення другого трансформатора зменшується опір тягової підстанції. Через це при зміні числа ввімкнених трансформаторів необхідно передбачити зміну параметрів пристрою поздовжньої компенсації. Досвід застосування поздовжньої компенсації у тяговому електропостачанні виявив переваги їх підключення до відсмоктуючого фідера підстанції з трифазними трансформаторами.

Для дослідження впливу поздовжньої компенсації на характер вирівнювальних струмів задамося схемою заміщення тягової мережі в загальному виді (рис. 4).

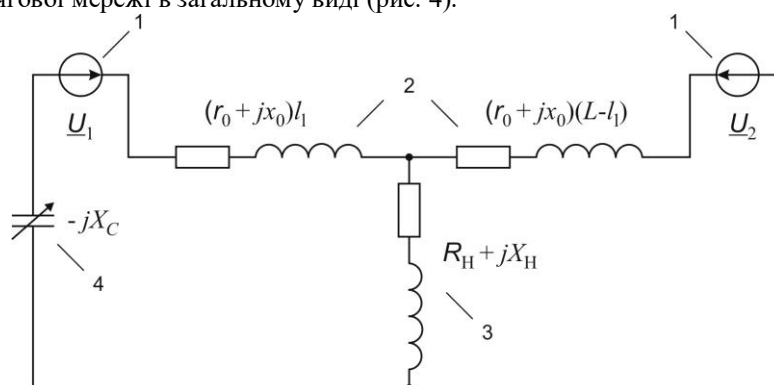


Рис. 4. Схема заміщення міжпідстанційної зони при застосуванні поздовжньої компенсації  
1 - фаза трансформатора; 2 - контактна мережа; 3 - навантаження; 4 - поздовжня компенсація

Отримаємо вираз для знаходження вирівнювального струму в тяговій мережі в загальному виді

$$I_{\text{вир}} = \frac{U_1 - U_2}{(r_0 + jx_0) \cdot L - jX_C}, \quad (1)$$

де  $\underline{U}_1, \underline{U}_2$  – вектори напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, В;

$r_0 + jx_0$  – питомий опір тягової мережі, в подальших розрахунках прийнято  $0,2 + j0,4$  Ом/км;

$L$  – довжина міжпідстанційної зони, приймається рівною 50 км;

$X_C$  – опір пристрою поздовжньої компенсації, Ом.

В такому випадку, залежність модулю вирівнювального струму та його кута зсуву від значення опору поздовжньої компенсації матиме вигляд, приведений на рис. 5, 6.

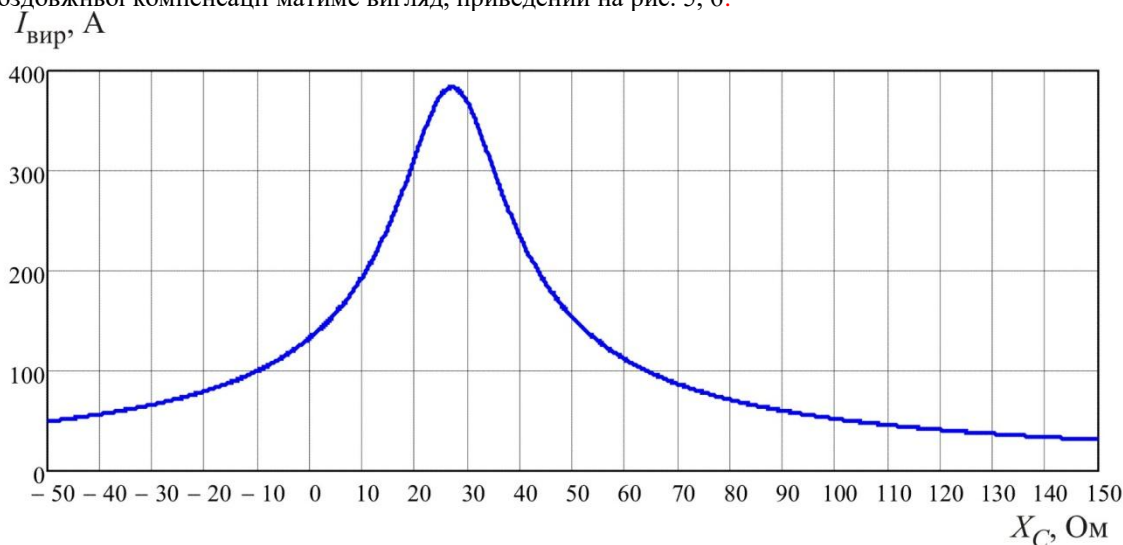


Рис. 5. Залежність модулю вирівнювального струму від опору поздовжньої компенсації

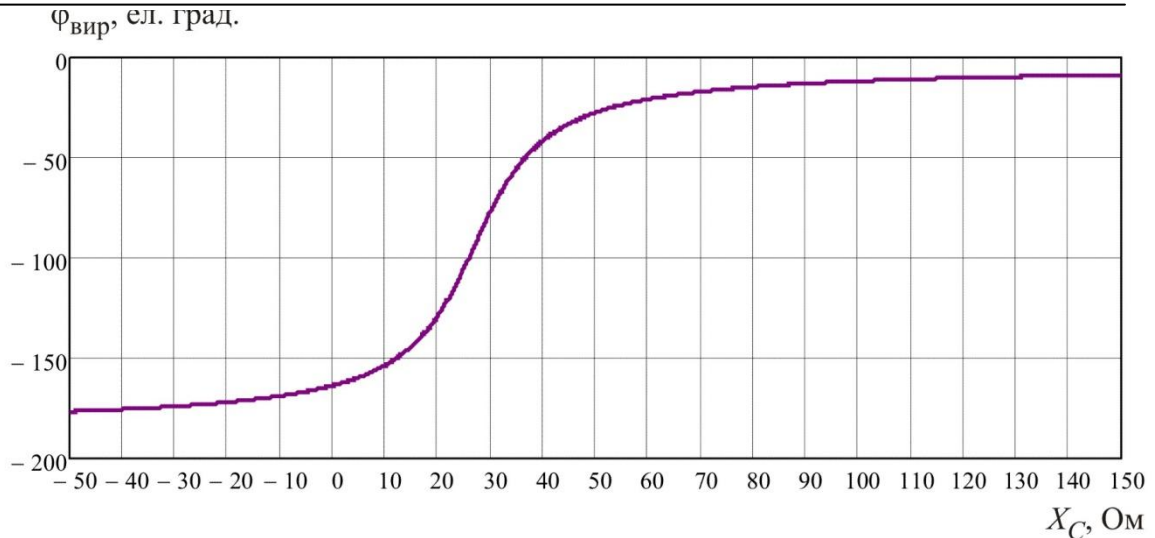


Рис. 6. Залежність кута вирівнювального струму від опору поздовжньої компенсації

Приведені вище розрахунки виконані для максимального значення кута зсуву напруги у фазі А на тяговій підстанції «Шевченка» Одеської залізниці, а саме для 10 ел. градусів.

Для дослідження характеристик вирівнювального струму при застосуванні поперечної компенсації використано схему заміщення, яка приведена на рис. 7.

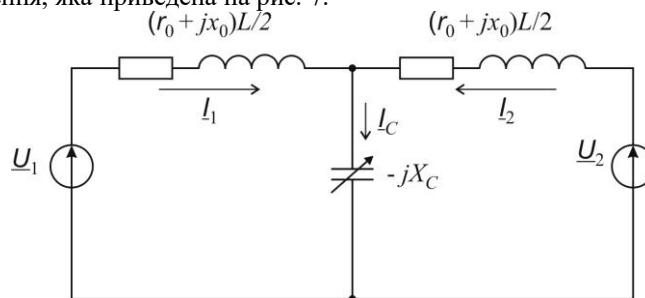


Рис. 7. Схема заміщення міжпідстанційної зони при поперечній компенсації

Виразимо математично значення струмів навантаження та струму компенсації. Для цього складемо систему рівнянь за законами Кірхгофа:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_C = 0; \\ I_1 (r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot I_C = U_1; \\ I_2 (r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot I_C = U_2. \end{cases} \quad (2)$$

Виконуючи перетворення в загальному виді отримаємо вирази для знаходження струмів:

$$I_1 = \frac{LU_1 r_0 + LU_2 r_0 - jLU_1 x_0 - jLU_2 x_0 + 4jU_1 X_C + 4jU_2 X_C}{L^2 r_0^2 + L^2 x_0^2 - 8LX_C x_0 + 16X_C^2} + \frac{16U_1 X_C^2 r_0 - 16U_2 X_C^2 r_0 - j16U_1 X_C^2 x_0 + j16U_2 X_C^2 x_0}{16LX_C^2 (r_0^2 + x_0^2)}; \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{LU_1 r_0 + LU_2 r_0 - jLU_1 x_0 - jLU_2 x_0 + 4jU_1 X_C + 4jU_2 X_C}{L^2 r_0^2 + L^2 x_0^2 - 8LX_C x_0 + 16X_C^2} + \frac{16U_1 X_C^2 r_0 - 16U_2 X_C^2 r_0 - j16U_1 X_C^2 x_0 + j16U_2 X_C^2 x_0}{16LX_C^2 (r_0^2 + x_0^2)}; \quad (4)$$

$$I_C = \frac{2(U_1 + U_2)(Lr_0 - jLx_0 + 4jX_C)}{L^2 r_0^2 + L^2 x_0^2 - 8LX_C x_0 + 16X_C^2}. \quad (5)$$

Графічно отримані залежності струмів плечей живлення від значення ємнісного опору поперечної компенсації представлені на рис. 8, 9.

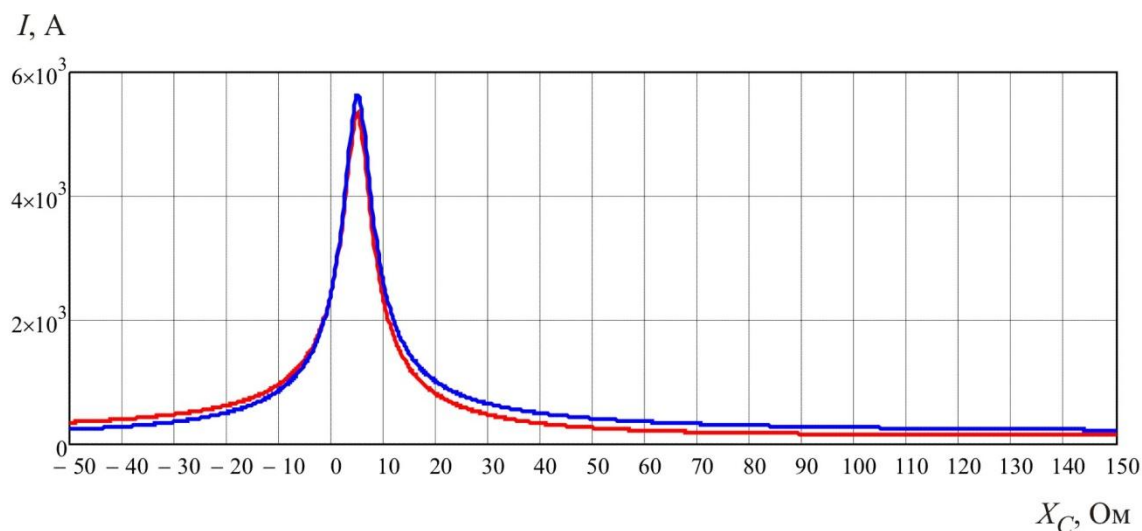


Рис. 8. Залежності струмів плечей живлення від опору поперечної компенсації

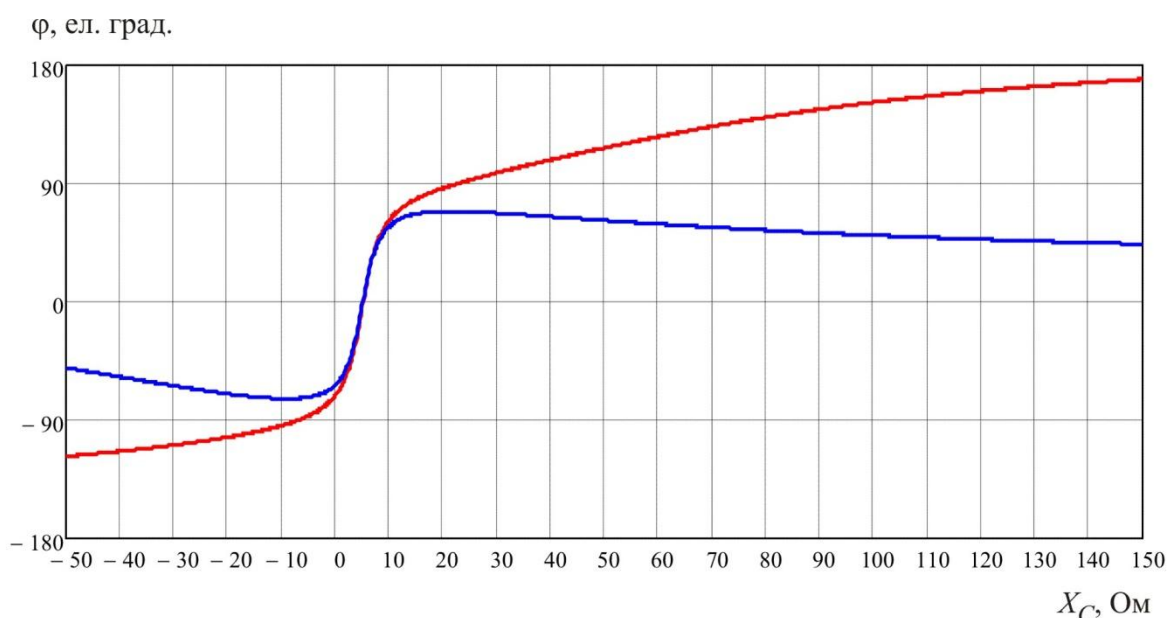


Рис. 9. Залежності кутів навантаження струмів від опору поперечної компенсації

Узагальнюючи проведені дослідження, отримаємо залежності кута навантаження вирівнювального струму від параметрів пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації використовуючи вираз

$$\varphi_{\text{вир}} = \psi(\underline{U}_1) - \psi(\underline{I}_{\text{вир}}).$$

Отримаємо залежності, приведені на рис. 10, з яких видно, що кута навантаження у  $90^\circ$  можна досягти при застосуванні поздовжньої компенсації з опором  $X_C = 26,5$  Ом, а при застосуванні поперечної компенсації – з опором  $X_C = -12,2$  Ом. Тобто, для отримання кута зсуву фаз у  $90^\circ$  при поперечній компенсації необхідно вмикати у коло додаткове індуктивне навантаження, що на практиці не є доцільним. Таким чином, маємо відмовитись від використання поперечної компенсації для впливу на характер вирівнювальних струмів.

У подальшому прийемо поздовжню компенсацію у відсмоктуючому фідері з параметром, який змінить кут зсуву вирівнювального струму якомога ближче до  $90^\circ$ , тим самим переведе проблему вирівнювальних струмів у реактивну площину.

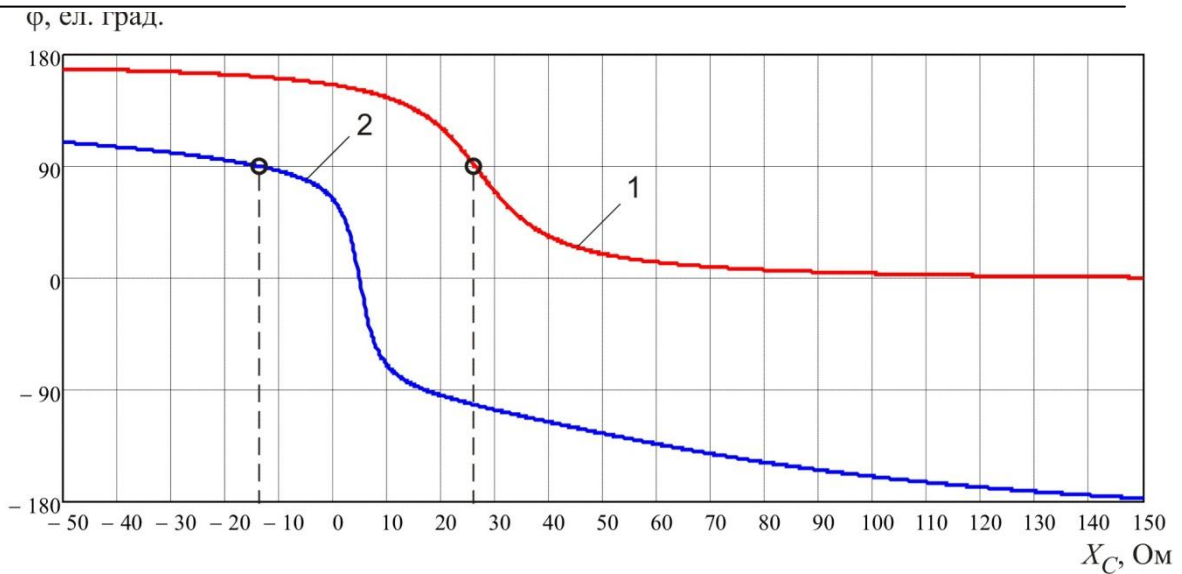


Рис. 10. Залежності кута навантаження вирівнювального струму для різних видів компенсації:  
1 – поздовжньої; 2 – поперечної

### Визначення раціонального кута навантаження вирівнювального струму

Вирівнювальний струм під дією різних кутів зсуву фаз напруг суміжних тягових підстанцій з урахуванням превалюючого індуктивного опору тягової мережі виявляється майже активним відносно напруг плечей живлення. Використовуючи поздовжню компенсацію у відсмоктуючому фідері існує можливість формування кута зсуву вирівнювального струму відносно напруг плечей живлення. Тим самим стає можливим переведення проблеми активних перетоків у реактивні.

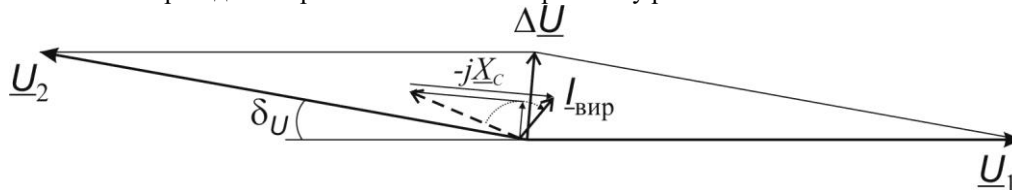


Рис. 11. Векторна діаграма зміни вирівнювального струму при застосуванні поздовжньої компенсації

Прийmemo у якості раціонального кута навантаження вирівнювального струму відносно напруг плеч живлення максимально близьке до  $90^\circ$ . З урахуванням того, що вирівнювальний струм для однієї тягової підстанції буде активним, а для іншої – емнісним, результуючий кут визначимо з виразу

$$\varphi_{\text{вир}} = \frac{180 - \psi(U_1)}{2}. \quad (6)$$

Проведені дослідження показали, що емнісний опір пристрою поздовжньої компенсації для досягнення вимоги (6) не буде змінюватись в залежності від кута зсуву фаз однойменних напруг первинної мережі, що дозволяє визначити його значення за приведеною методикою.

### Висновки

Транзитні перетікання потужності тяговою мережею змінного струму на сьогодні залишаються актуальним питанням, особливо в умовах лібералізації ринкових відносин в сфері електроенергетики. Уникнути явища вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму при відхиленні кута зсуву фаз однойменних напруг суміжних тягових підстанцій залишаючи їх у паралельній роботі достатньо складно.

Проведені дослідження показали, що найбільший вплив на характер вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму має поздовжня компенсація реактивної потужності, яку на практиці найбільш доцільно виконувати у відсмоктуючому фідері тягової підстанції.

Запропонована методика визначення параметрів поздовжньої компенсації дозволяє перевести проблему транзитних перетікань до 90 % у реактивну площину з подальшим застосуванням сучасних пристроїв поперечної компенсації, тим самим покращуючи електрифікованим залізницям умови закупівлі електроенергії.



**Список літератури**

1. Добрусин Л. А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России [Текст]: информационно-аналитический обзор. Ч. 3. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике / Л. А. Добрусин // Силовая электроника. – 2012. – № 4. – С. 60-66.
2. Герман Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – М.: МИИТ, 2012. – 211 с.
3. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саенко, Д. О. Босий. – Дн-вськ: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. – 344 с.
4. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
5. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
6. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.
7. Кондратьев Ю. В. Совершенствование условий согласования систем внешнего и тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока [Текст]: дис. канд. техн. наук. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 164 с.
8. Bosiy, D. O. Power quality complex estimation at alternating current traction substations / D. O. Bosiy // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – № 4(46). – С. 30-37.
9. Босий Д.О. Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму / Д.О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1. – С. 24-32.

**D. O. Bosiy**

**Dnipropetrovsk National University of Railway Transport  
named after academician V. Lazaryan**

**PROVIDING THE PARALLEL OPERATION OF THE ALTERNATING CURRENT TRACTION  
SUBSTATIONS UNDER CONDITIONS OF TRANSIT POWER FLOWS**

*The phenomenon of transit power flows in the alternating current traction network that parallel operating caused by the shift of the same name voltage phases is described in the article. Using the results of the experimental researches at traction substation of the Odeska Railway the influence of the series and the parallel compensation routines on the characteristics of the circulating currents is researched. The methodic of the evaluating of the series compensation routine parameters which connected in the reverse feeder is proposed. The methodic which proposed in the article allow to transfer the problem of the transit power flows in the reactive power field where might be used the modern parallel compensator routines.*

**Keywords:** electric traction, alternating current, traction substation, parallel operation, transit power, circulating current.

1. Dobrusin L. A. *The problems of energy efficiency and energy conservation in Russia: informational and analytical review. Part 3. Trends in the use of phase-shifting power transformers*, Silovaya elektronika, 2012, No. 4, pp. 60-66.
2. German L. A., Serebryakov A. S. *Adjustable capacitive compensation systems in the traction power supply of railways*, Moscow, MIIT publ., 2012, 211 p.
3. Sichenko V. G., Saenko Yu. L., Bosiy D. O. *The power quality in the traction network of electrified railways*, Dnipropetrovsk, Standart Service Publ., 2015, 344 p.
4. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. *Capacitor routines of the electrified railways*, Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p.
5. Markvardt K. G. *Power supply of electrified railways*, Moscow, Transport Publ., 1982, 528 p.
6. Miroshnichenko R. I. *Modes of electrified railways section operation*, Moscow, Transport Publ., 1982, 207 p.
7. Kondratiev Yu. V. *Improving conditions for coordination external systems and traction power supply of alternating current electrified railways*, Ph. D. Dissertation, Omsk, OmSURT, 2006, 164 p.
8. Bosiy D. O. *Power quality complex estimation at alternating current traction substations*, Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2013, No. 4 (46), pp. 30-37.
9. Bosiy D. O. *Optimization of controlling the variable reactive power compensation at the alternating current traction substations*, Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti, 2010, No. 1, pp. 24-32.



Д. А. Босый, канд. техн. наук, доцент  
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО  
ТОКА В УСЛОВИЯХ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ**

*В статье рассматривается явление возникновения уравнильных токов в тяговой сети переменного тока при отклонениях угла сдвига фаз одноименных напряжений смежных тяговых подстанций, которые параллельно питают межподстанционную зону. На основании результатов экспериментальных исследований тяговой подстанции Одесской железной дороги исследуется влияние устройств продольной и поперечной компенсации на характеристики уравнильных токов. Предложена методика определения параметров продольной компенсации реактивной мощности в отсасывающем фидере для перевода проблемы транзитных перетоков в реактивную плоскость с последующим применением устройств поперечной компенсации.*

**Ключевые слова:** электрическая тяга, переменный ток, тяговая подстанция, параллельная работа, транзит мощности, уравнильный ток.

Надійшла 23.04.2015  
Received 23.04.2015