

## **ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ЗМІННОГО СТРУМУ**

**Д. О. Босий**

*Проаналізовано зростання несиметрії напруги на тягових підстанціях змінного струму. Висвітлено причину її виникнення, показано можливість симетрування за допомогою пристроїв регульованої компенсації реактивної потужності. Отримано аналітичну залежність для визначення оптимальних струмів компенсації та показано її практичну реалізацію в системі керування.*

*Ключові слова: тягові підстанції, змінний струм, несиметрія, компенсація реактивної потужності, оптимальні струми компенсації.*

*Проанализировано увеличение несимметрии напряжения на тяговых подстанциях переменного тока. Показано причину ее возникновения и возможность симметрирования с помощью устройств регулируемой компенсации реактивной мощности. Получена аналитическая зависимость для определения оптимальных токов компенсации и показана ее практическая реализация в системе управления.*

*Ключевые слова: тяговые подстанции, переменный ток, несимметрия, компенсация реактивной мощности, оптимальные токи компенсации.*

*This article represents analyzing of voltage unbalance increasing at AC traction substation. Reason of voltage unbalance and ability of balancing using reactive power compensation are showed. Analytical function to calculate optimal compensation currents are received and its practical usage in control systems are showed.*

*Key words: traction substation, AC current, voltage unbalance, reactive power compensation, optimal compensation current.*

### **Вступ**

Електрифікованими залізницями України щорічно споживається близько 10 млрд. кВт·год електричної енергії, при чому більша її частина використовується на тягу поїздів та потреби для її забезпечення, інша частина електроенергії віддається транзитом та постачається районним споживачам [1].

Постачання електричної енергії відбувається на основі договірних відносин, які регламентуються «Правилами користування електричною енергією», відповідно до яких постачальник зобов'язується дотримуватись граничних показників якості електроенергії, а у разі їх невідповідності споживач має право на відшкодування збитків, пов'язаних з порушенням якості електроенергії за їх умови доведення незалежною стороною [2].

Норми якості електричної енергії встановлюються діючим в Україні стандартом ГОСТ 13109-97 [3], стосовно залізниць змінного струму вказується,

що вони безпосередньо є джерелами порушення наступних показників якості: відхилення, несинусоїдності та несиметрії напруги.

З початку електрифікації ділянок, унаслідок невеликої потужності тяги, несиметрія напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму не перевищувала гранично допустимого значення. Найбільше значення 1970 року складало 1,7 %; 1982 року – 2,3 % [4].

Унаслідок розвитку електричної тяги протягом останніх десятиріч, максимальне значення коефіцієнта несиметрії напруги вже перевищує гранично допустиме значення і складає за даними 2008 року – 4,7 % [5].

Окрім порушення показників якості електроенергії, електрифіковані залізниці є потужними джерелами виникнення перетікань реактивної потужності. Середньорічні коефіцієнти реактивної потужності для електрифікованих залізниць змінного струму змінюються в межах 0,63...0,74. Таке високе значення коефіцієнта реактивної потужності свідчить про наявність значних перетікань реактивної потужності та зниженні ефективності споживання електричної енергії в системах тягового електропостачання змінного струму.

Крім низької ефективності споживання електроенергії та відповідних втрат активної потужності унаслідок наявності реактивних струмів, постійно зростає плата за послуги з перетікань реактивної потужності. За останній рік вона досягла найбільшого за 6 років значення – майже 1,4 % від плати за активну електроенергію.

З самого початку впровадження системи тягового електропостачання змінного струму були зрозумілі її недоліки стосовно якості напруги та наявності перетікань реактивної потужності, тому розроблювались та застосовувались різноманітні заходи щодо симетрування та компенсації реактивної потужності. Найбільше поширення на залізницях змінного струму отримали схеми поздовжньої та поперечної компенсації [6], оскільки вони дозволяють заощаджувати, окрім іншого, кошти за послуги з перетікання реактивної енергії, що є суттєвим в нинішніх умовах ринкових відносин суб'єктів господарювання.

З розвитком технологій вдосконалювались і засоби компенсації реактивної потужності, їх застосування дозволяє значно поліпшувати показники якості електричної енергії.

Впровадження сучасних пристроїв з великими регульовальними можливостями висвітлює питання необхідності удосконалення їх роботи, оскільки алгоритми керування ними базуються на старих підходах і не дають ефекту в поліпшенні якості напруги [5].

Так, наприклад, при повній компенсації реактивної потужності в плечах живлення тягової підстанції залишається несиметрія первинних струмів, яка викликає несиметричну напругу на приєднаннях тягової підстанції.

**Метою роботи** є розробка методики розрахунку струмів компенсації для оптимізації керування пристроями регульованої компенсації реактивної потужності.

## Висвітлення проблеми

Кількісне визначення ступеню несиметрії навантаження в трифазних системах змінного струму прийнято визначати методом симетричних складових.

Несиметрія струмів тягової підстанції визначається загальноновживаною схемою підключення тягового трансформатора до первинної та тягової мережі [7].

В загальному випадку складові нульової, прямої та зворотної послідовностей первинних струмів тягової підстанції визначаються системою рівнянь

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{A0} \\ \underline{I}_{A1} \\ \underline{I}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  – струми в первинних обмотках тягового трансформатора;

$a = -0,5 + j0,5\sqrt{3}$  – оператор повороту.

Система первинних струмів визначається за відомими формулами розкладання струмів в тягових обмотках в залежності від струмів плечей живлення підстанції, які досить зручно представляються у матричному вигляді

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3 \cdot K_{ВН}} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_Л \\ \underline{I}_П \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $\underline{I}_Л, \underline{I}_П$  – струми лівого та правого плечей живлення;

$K_{ВН}$  – коефіцієнт трансформації між обмотками високої та низької напруги.

Система первинних струмів тягової підстанції, навіть при рівних навантаженнях в плечах живлення та при відсутності реактивної потужності (струми лівого та правого плечей живлення співпадають з відповідними напругами), є несиметричною, як це видно з рис. 1.

Найменш завантаженою для прийнятої схеми підключення виявляється середня фаза трансформатора, і, відповідно, та фаза ЛЕП, до якої вона приєднана (в нашому випадку фаза «В»). Первинний струм у фазі «А» відстає від напруги з фазою «А», тому ця фаза називається відстаючою, а фаза «С», відповідно – випереджаючою [7].

Унаслідок відставання та випереджання первинних струмів, у фазі «А» виникає режим недокомпенсації, у фазі «С» – перекомпенсація, проте за рахунок рівності відповідних кутів сумарне перетікання реактивної енергії відсутнє.

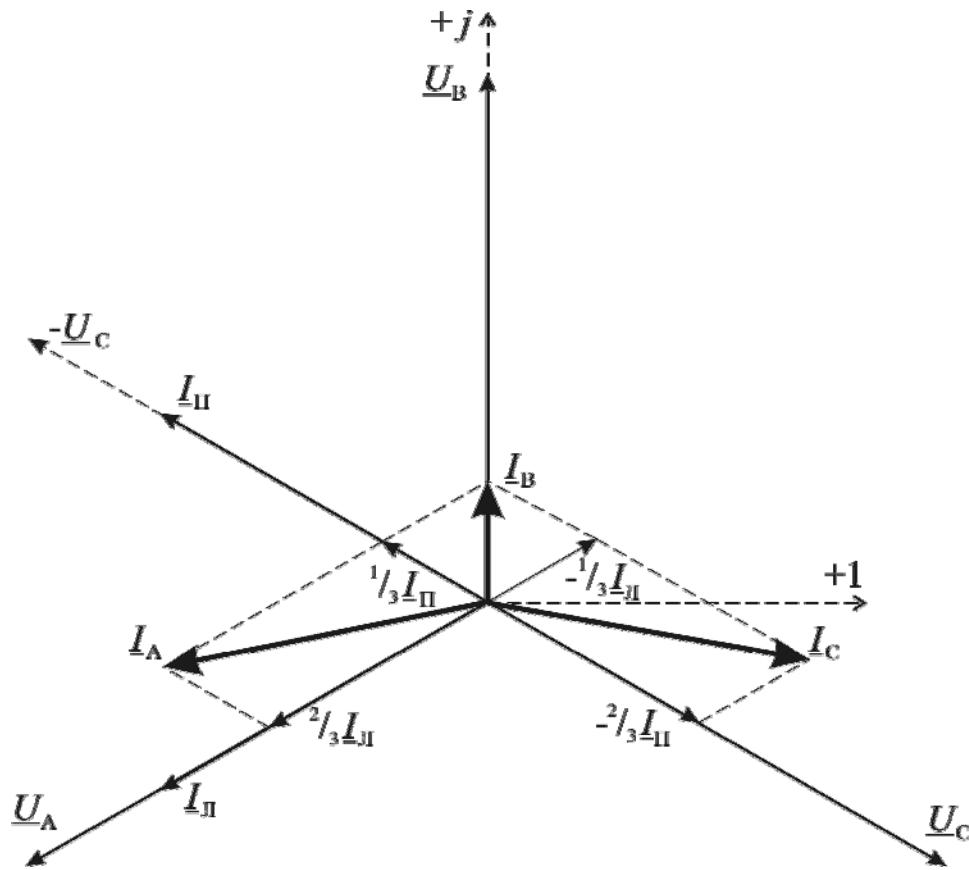


Рис. 1. Векторна діаграма несиметричних первинних струмів трансформатора тягової підстанції

Розкриваючи рівняння (2) та підставляючи у рівняння (1) для визначення струму зворотної послідовності, після спрощення отримаємо

$$\underline{I}_{A2} = \frac{1}{3 \cdot K_{ВН}} (\underline{I}_Л - a \cdot \underline{I}_\Pi). \quad (3)$$

З виразу (3) випливає, що струм зворотної послідовності тягової підстанції визначається різницею векторів струму лівого плеча живлення та зсунутого на кут  $120^\circ$  струму правого плеча живлення.

Також з виразу (3) випливає умова симетрування для прийнятої схеми підключення тягових підстанцій до тягової мережі в загальному виді, тобто

$$\underline{I}_Л = a \cdot \underline{I}_\Pi. \quad (4)$$

Перепишуючи вираз (4), орієнтуючи вектори струмів плечей живлення відносно прийнятого розташування векторів первинних напруг на комплексній площині та розписуючи комплекси векторів із застосуванням полярної форми, після спрощень отримаємо наступне співвідношення для кутів зсуву фаз лівого та правого плечей живлення

$$\varphi_\Pi = \varphi_\Л + \frac{\pi}{3} + j \cdot \ln \left( \frac{I_\Л}{I_\Pi} \right). \quad (5)$$

Рівняння симетрування (5) при рівних по величині струмах плечей живлення має однозначний розв'язок. При різних по величині струмах плечей

живлення, розв'язок рівняння (5) відносно  $\varphi_L$  та  $\varphi_{II}$  виходить за межі дійсних значень кутів навантажень.

З виразів (4)-(5) випливає, що система первинних струмів тягової підстанції змінного струму може бути симетричною, за умови якщо кути зсуву в плечах живлення підстанції будуть різними.

Так, на векторній діаграмі (рис. 2) видно, що при дотриманні умови (5) за рівних по величині струмів плечей живлення, система первинних струмів тягової підстанції виходить симетричною, при чому первинні струми по фазі співпадають з первинними напругами, що свідчить про відсутність перетікання реактивної потужності у кожній фазі.

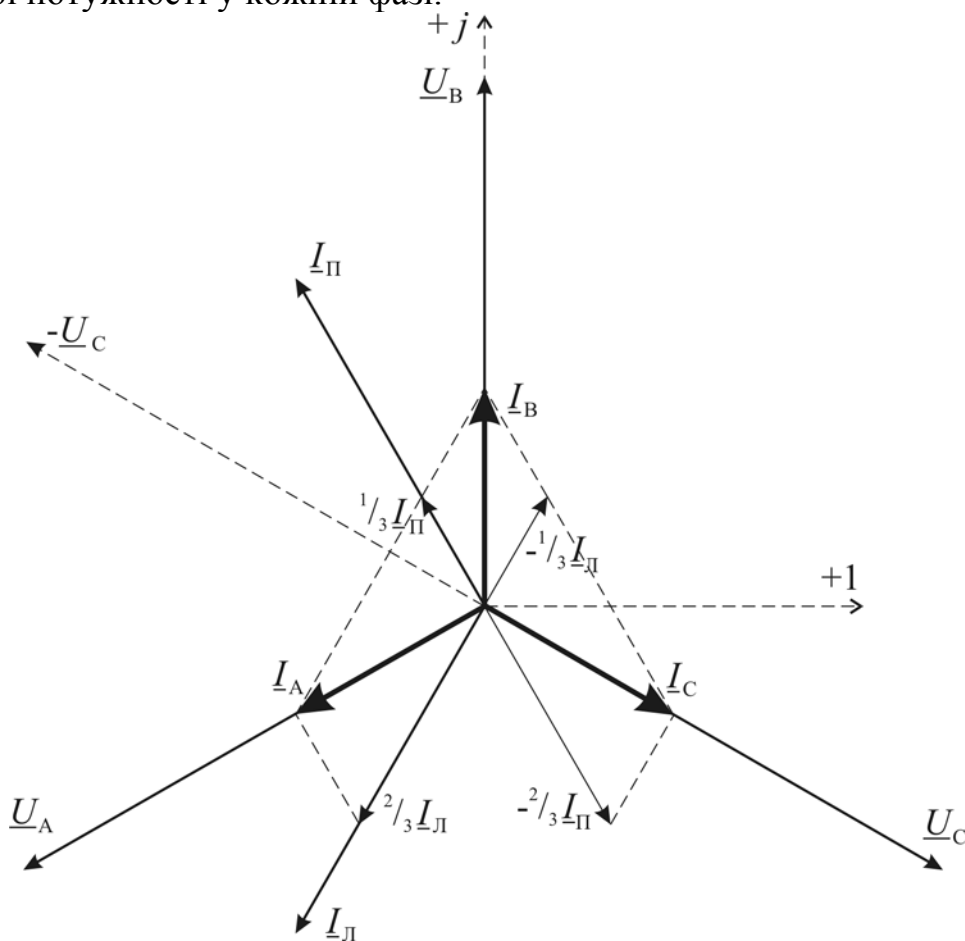


Рис. 2. Векторна діаграма симетричних первинних струмів трансформатора тягової підстанції

З практичної точки зору неможливо реалізувати комплексний кут зсуву фаз між напругою та струмом навантаження, проте різні по величині кути навантаження в плечах живлення тягової підстанції досить просто можуть бути реалізовані регульованими пристроями компенсації реактивної потужності.

Для розробки методу симетрування навантаження тягової підстанції, дослідимо можливість відсутності струмів зворотної послідовності при компенсації реактивної потужності в обох плечах живлення тягової підстанції.

Використовуючи умову (4), та розглядаючи окремо струми плечей живлення та струми компенсації, матимемо

$$\underline{I}_M + \underline{I}_{C1} = a(\underline{I}_M + \underline{I}_{C2}).$$

Після орієнтації кожного вектора струму відносно прийнятої орієнтації векторів напруги на комплексній площині та спрощення, отримаємо

$$I_L \cdot e^{j(7\pi/6 - \varphi_L)} - I_{C1} \cdot e^{j2\pi/3} + I_{II} \cdot e^{j(\pi/2 - \varphi_{II})} - I_{C2} = 0. \quad (6)$$

Отримане рівняння має два невідомих  $I_{C1}$  та  $I_{C2}$ , які необхідно однозначно визначити через інші змінні. Застосуємо до виразу (6) формулу Ейлера та прирівняємо нулю окремо дійсну та уявну складові. Отримаємо систему двох рівнянь

$$\begin{cases} I_L \cdot \cos(7\pi/6 - \varphi_L) - I_{C1} \cdot \cos(2\pi/3) + I_{II} \cdot \cos(\pi/2 - \varphi_{II}) - I_{C2} = 0; \\ I_L \cdot \sin(7\pi/6 - \varphi_L) - I_{C1} \cdot \sin(2\pi/3) + I_{II} \cdot \sin(\pi/2 - \varphi_{II}) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Вирішуючи систему рівнянь (7), отримаємо співвідношення для визначення струмів компенсації

$$\begin{cases} I_{C1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ I_L \cdot \sin\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) + I_{II} \cdot \cos\varphi_{II} \right]; \\ I_{C2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ I_L \cdot (-\cos\varphi_L) + I_{II} \cdot \sin\left(\varphi_{II} + \frac{\pi}{6}\right) \right]. \end{cases} \quad (8)$$

Отримані результати для компактності перепишемо в матричній формі

$$\begin{bmatrix} I_{C1} \\ I_{C2} \end{bmatrix}^T = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} I_L \\ I_{II} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) & -\cos\varphi_{II} \\ \cos\varphi_{II} & \sin\left(\varphi_{II} + \frac{\pi}{6}\right) \end{bmatrix},$$

або в загальному вигляді

$$|I_C|^T = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot |I|^T \cdot |M_\varphi|, \quad (9)$$

де  $|I_C|$  – вектор шуканих значень струмів компенсації в плечах живлення;

$|I|$  – вектор діючих значень струмів плечей живлення,  $|I| = \begin{bmatrix} I_L \\ I_{II} \end{bmatrix}$ ;

$|M_\varphi|$  – квадратна матриця коефіцієнтів, які визначаються кутами навантажень в плечах живлення тягової підстанції,

$$|M_\varphi| = \begin{bmatrix} \sin\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) & -\cos\varphi_{II} \\ \cos\varphi_{II} & \sin\left(\varphi_{II} + \frac{\pi}{6}\right) \end{bmatrix}.$$

Таким чином, визначені на основі отриманої залежності (9) струми компенсації будуть повністю симетрувати систему первинних струмів тягової підстанції як за рівних так і різних навантажень в плечах живлення, що показано на рис. 3.

З векторної діаграми (рис. 3) також видно, що всі первинні струми зсунуті відносно первинних напруг, що вказує на перетікання реактивної потужності між системою зовнішнього та тягового електропостачання.

В наведеному випадку має місце «перекомпенсація» реактивної потужності. Якщо співвідношення між величинами струмів плечей живлення зміниться на протилежне, виникне режим «недокомпенсації» реактивної потужності.

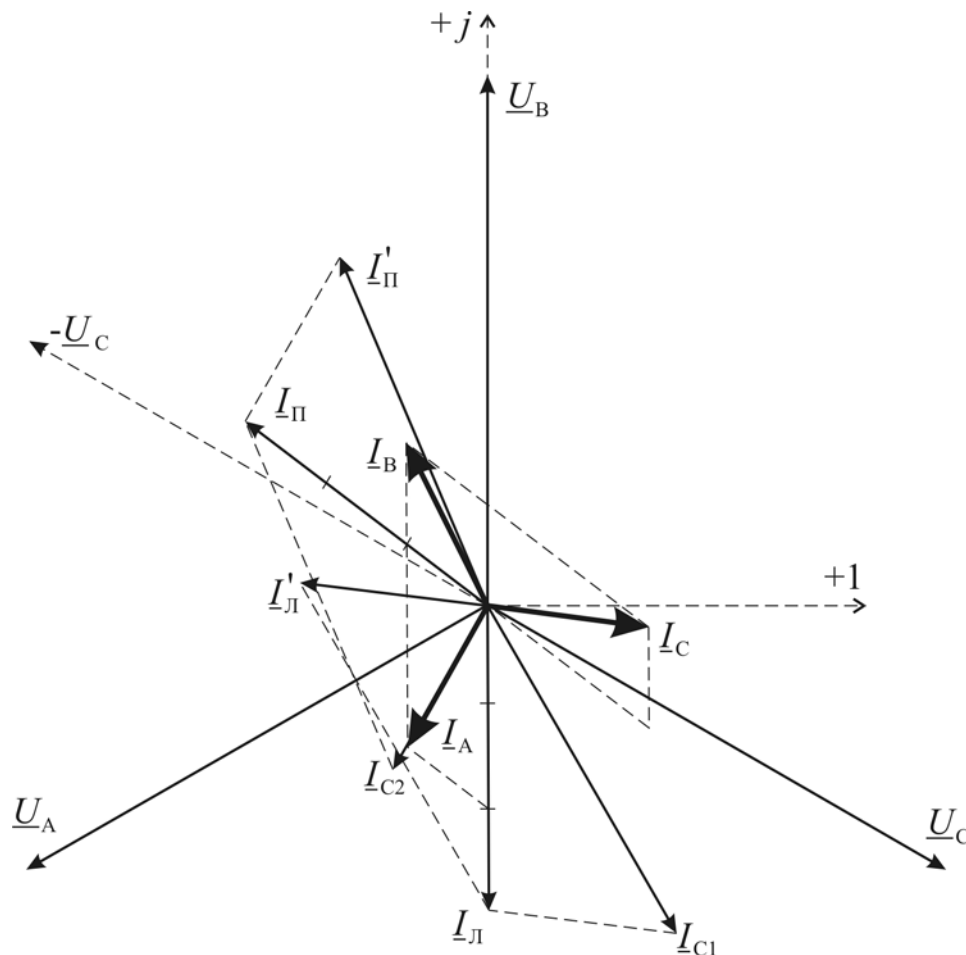


Рис. 3. Векторна діаграма симетричних первинних струмів за умови несиметричної компенсації реактивної потужності та різних струмів в плечах живлення

### Визначення оптимальних струмів компенсації

Досить суттєвим недоліком закону керування компенсацією реактивної потужності на основі залежності (9) буде наявність перетікань реактивної потужності за умови різних струмів в плечах живлення.

Уникнути перетікання реактивної потужності можливо за рахунок не повного, а часткового зниження струмів зворотної послідовності до деякого критичного рівня, який відповідає нормованому значенню коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в районній мережі [3].

Експериментальним шляхом встановлено, що для дотримання нормованого рівня несиметрії напруги (2 %) достатньо мати рівень струмів зворотної послідовності тягової підстанції не більше 10-40 % відносно струмів прямої послідовності.

Беручи за основу рівняння (3), виведемо залежність, яка буде визначати співвідношення між струмами компенсації  $I_{C1}$ ,  $I_{C2}$ , за яких рівень несиметрії струмів зворотної послідовності не буде перевищувати критичного значення  $I_{2кр}$ .

Підносячи до квадрату дійсну та уявну складові лівої частини рівняння (3), прирівнюючи її квадрату струму зворотної послідовності та спрощуючи, матимемо

$$\begin{aligned} & \left[ -I_L \cdot \cos\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) + I_\Pi \cdot \sin \varphi_\Pi + \frac{1}{2} I_{C1} - I_{C2} \right]^2 + \\ & \left[ I_L \cdot \sin\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) + I_\Pi \cdot \cos \varphi_\Pi - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{C1} \right]^2 = 9 \cdot I_{2кр}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

За допомогою бінома Ньютона розкриємо дужки в (10), згрупуємо окремо невідомі та відомі величини, отримаємо

$$\begin{aligned} & I_{C1}^2 + I_{C2}^2 - I_{C1} \cdot I_{C2} + 2 \cdot I_{C1} \left( -I_L \cdot \sin \varphi_L - I_\Pi \cdot \cos\left(\varphi_\Pi + \frac{\pi}{6}\right) \right) + \\ & 2 \cdot I_{C2} \left( I_L \cdot \cos\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) - I_\Pi \cdot \sin \varphi_\Pi \right) + \\ & I_L^2 + I_\Pi^2 + 2 \cdot I_L \cdot I_\Pi \cdot \sin\left(\varphi_L - \varphi_\Pi - \frac{\pi}{6}\right) - 9 \cdot I_{2кр}^2 = 0. \end{aligned}$$

Виділивши складову, що не містить невідомих та позначаючи її  $K^2$ , матимемо

$$I_{C1}^2 + I_{C2}(I_{C2} - I_{C1}) + 2 \cdot \begin{vmatrix} I_L \\ I_\Pi \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} -\sin \varphi_L & \cos\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) \\ -\cos\left(\varphi_\Pi + \frac{\pi}{6}\right) & -\sin \varphi_\Pi \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} I_{C1} \\ I_{C2} \end{vmatrix} + K^2 = 0, \quad (11)$$

де  $K^2 = I_L^2 + I_\Pi^2 + 2 \cdot I_L \cdot I_\Pi \cdot \sin\left(\varphi_L - \varphi_\Pi - \frac{\pi}{6}\right) - 9 \cdot I_{2кр}^2$ .

Отримане рівняння (11) в неявному вигляді визначає співвідношення між струмами компенсації  $F(I_{C1}, I_{C2}) = 0$ , дотримання яких, дозволяє не перевищити критичний струм зворотної послідовності, який задається константою  $I_{2кр}$ .

Аналітичне представлення залежності (11) для однозначного визначення струмів компенсації неможливе, тому скористаємось чисельним методом з використанням частинних похідних, які відносно просто визначаються формулами

$$\frac{\partial F(I_{C1}, I_{C2})}{\partial I_{C1}} = 2I_{C1} - I_{C2} + 2 \left( -I_L \cdot \sin \varphi_L - I_\Pi \cdot \cos\left(\varphi_\Pi + \frac{\pi}{6}\right) \right); \quad (12)$$



$$\frac{\partial F(I_{C1}, I_{C2})}{\partial I_{C2}} = 2I_{C2} - I_{C1} + 2 \left( I_L \cdot \cos \left( \varphi_L - \frac{\pi}{6} \right) - I_{\Pi} \cdot \sin \varphi_{\Pi} \right). \quad (13)$$

Для отримання залежності  $F(I_{C1}, I_{C2}) = 0$  на кожному кроці ітерації визначаються співвідношення між двома частинними похідними (12) та (13) і порівнюються їх співвідношення. Обирається невідома змінна, яка найменше змінюється на кроці ітерації, та до неї додається крок ітерації  $\Delta$ . Приріст іншої змінної визначається добутком кроку ітерації та співвідношення частинних похідних з відповідним правилом знаків.

Наприклад, при найменшому прирості першої змінної  $I_{C1}$ , формули для послідовних ітерацій матимуть вигляд

$$I_{C1(i+1)} = I_{C1(i)} \pm \Delta; \quad I_{C2(i+1)} = I_{C2(i)} \pm \Delta \cdot \frac{\left| \frac{\partial F(I_{C1}, I_{C2})}{\partial I_{C1}} \right|}{\left| \frac{\partial F(I_{C1}, I_{C2})}{\partial I_{C2}} \right|}. \quad (14)$$

Графічно залежність (11) на фазовій площині  $I_{C2} = f(I_{C1})$  являє собою еліпс (рис. 4), математичний центр якого визначається струмами компенсації за формулою (9), тобто при значенні  $I_{2кр} = 0$  ( $K_{2I} = 0$ ), значення струмів компенсації за формулами (11) та (9) будуть рівними.

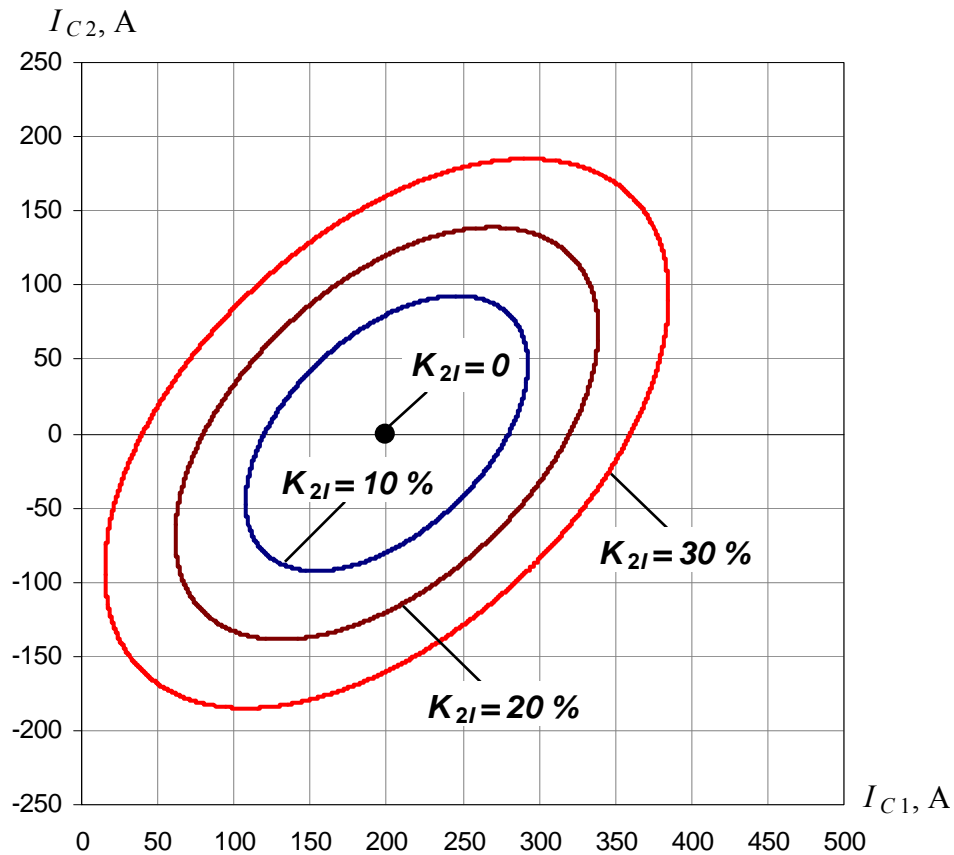


Рис. 4. Співвідношення струмів компенсації при різних рівнях несиметрії струмів та постійних струмах в плечах живлення

Як видно з рис. 4, зі збільшенням величини  $K_{2I}$ , за постійних струмів плечей живлення, розкид значень відносно математичного центра еліпса збільшується, що свідчить про розширення області струмів компенсації та можливість пошуку оптимального значення, за якого перетікання реактивної потужності будуть мінімальними та система первинних струмів тягової підстанції буде квазісиметричною.

В загальному випадку величина реактивної потужності тягової підстанції визначається сумою потужностей в кожному плечі живлення

$$Q = Q_L + Q_{\Pi}, \quad (15)$$

де  $Q_L$ ,  $Q_{\Pi}$  – відповідні реактивні потужності в плечах живлення.

В свою чергу, реактивна потужність плеча живлення визначається режимом напруги, величиною та кутом навантаження і струмом компенсації реактивної потужності, тобто

$$Q_L = U(I_L \cdot \sin \varphi_L - I_{C1}), \quad Q_{\Pi} = U(I_{\Pi} \cdot \sin \varphi_{\Pi} - I_{C2}).$$

Підставляючи  $Q_L$  та  $Q_{\Pi}$  у (17) та вирішуючи рівняння за умови рівності результуючого реактивного струму підстанції нулю, матимемо

$$I_{C2} = -I_{C1} + I_L \cdot \sin \varphi_L + I_{\Pi} \cdot \sin \varphi_{\Pi},$$

або в матричному виді

$$I_{C2} = -I_{C1} + \begin{vmatrix} I_L \\ I_{\Pi} \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} \sin \varphi_L \\ \sin \varphi_{\Pi} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Залежність (16) між струмами компенсації на фазовій площині  $I_{C2} = f(I_{C1})$  є лінійною функцією. Користуючись нормованим значенням коефіцієнта реактивної потужності, визначимо як зміниться залежність (16) за умови, що  $\tan \varphi \leq 0,25$ .

Критичне значення  $Q_{кр}$ , за якого виконується умова  $\tan \varphi = 0,25$  визначається як

$$Q_{кр} = 0,25 \cdot U(I_L \cdot \cos \varphi_L + I_{\Pi} \cdot \cos \varphi_{\Pi}). \quad (17)$$

Переходячи до струмів, з рівності (17) визначимо критичний струм

$$I_{Q_{кр}} = 0,25 \cdot (I_L \cdot \cos \varphi_L + I_{\Pi} \cdot \cos \varphi_{\Pi}). \quad (18)$$

Підставляючи реактивний струм за виразом (18) у (16) та вирішуючи останнє відносно струмів компенсації, отримаємо

$$I_{C2} = -I_{C1} + I_L(\sin \varphi_L - 0,25 \cdot \cos \varphi_L) + I_{\Pi} \cdot (\sin \varphi_{\Pi} - 0,25 \cdot \cos \varphi_{\Pi}),$$

що теж саме в матричному вигляді

$$I_{C2} = -I_{C1} + \begin{vmatrix} I_L \\ I_{\Pi} \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} \sin \varphi_L - 0,25 \cdot \cos \varphi_L \\ \sin \varphi_{\Pi} - 0,25 \cdot \cos \varphi_{\Pi} \end{vmatrix}. \quad (19)$$

Графічно залежності (16) та (19) являють собою дві паралельні прямі лінії (рис. 5), область між якими визначає струми компенсації в плечах живлення, за яких коефіцієнт реактивної потужності тягової підстанції  $\tan \varphi \leq 0,25$ .

Розглянемо дві отримані залежності, які описуються рівняннями (11) та (16) одночасно на прийнятій фазовій площині за деяких фіксованих значень струмів та кутів навантаження плечей живлення.

В загальному випадку ці залежності можуть перетинатись у двох точках, мати одну спільну точку та не перетинатись взагалі.

Якщо залежності (11) та (16) матимуть одну спільну точку, то її координати відповідатимуть оптимальним значенням струмів компенсації за яких сумарне значення коефіцієнта реактивної потужності дорівнює нулю та досягається заданий рівень несиметрії струмів.

Якщо залежності на фазовій площині не перетинаються, оптимального значення струмів компенсації не існує, і для досягнення критичного рівня несиметрії струмів необхідно передбачити наявність перетікань реактивної потужності деякої величини, при чому як її споживання з мережі, так і генерацію в мережу.

Дослідимо найбільш характерний випадок, за якого залежності перетинаються у двох точках (рис. 5) з використанням наступних позначень:

$\Xi$  – точка з координатами, визначеними за формулою (9), яка відповідає струмам компенсації, за яких система первинних струмів тягової підстанції є повністю симетричною;

$\Phi$  – точка, координати якої відповідають струмам компенсації за формулою (16), та за яких перетікання реактивної потужності в кожному плечі живлення відсутнє;

$\Theta$  – точка оптимального режиму, за якого сумарне перетікання реактивної потужності дорівнює нулю та коефіцієнт несиметрії струмів по зворотній послідовності є мінімально можливим і не перевищує критичного значення  $I_{2кр}$ .

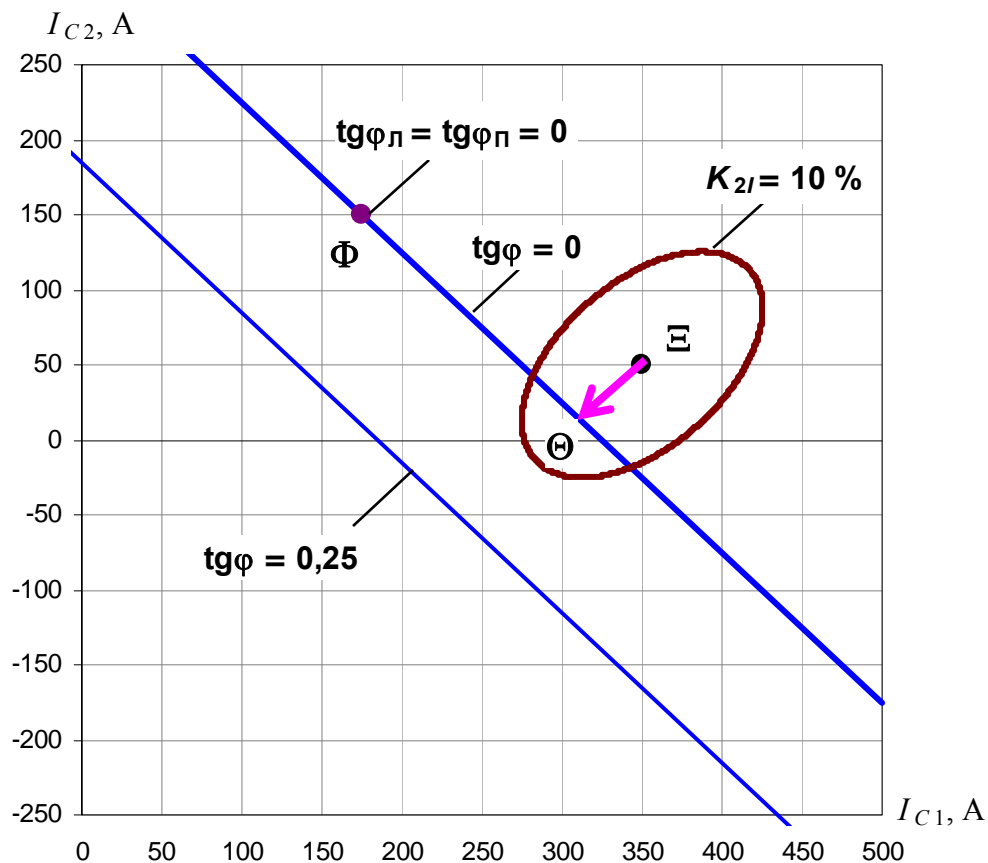


Рис. 5. Оптимізація струмів компенсації на фазовій площині

Для знаходження координат точки оптимального режиму  $\Theta$  в загальному вигляді необхідно вирішити систему двох рівнянь:

– перше рівняння системи графічно являє собою лінійну залежність струмів компенсації, за яких сумарне перетікання реактивної потужності дорівнює нулю.

– друге рівняння системи описує перпендикуляр до цієї лінії, який проходить через точку  $\Xi$ . Вирішуючи систему рівнянь відносно  $I_{C1}$  та  $I_{C2}$ , отримаємо координати точки оптимального режиму  $\Theta$ .

Система рівнянь базується на формулах (8), (18) та має наступний вигляд

$$\begin{cases} I_{C2} = -I_{C1} + I_L \cdot \sin \varphi_L + I_{\Pi} \cdot \sin \varphi_{\Pi}; \\ I_{C2} = I_{C1} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ I_L \cdot \sin \left( \varphi_L - \frac{\pi}{6} \right) + I_{\Pi} \cdot \varphi_{\Pi} + I_L \cdot \cos \varphi_L - I_{\Pi} \cdot \cos \left( \varphi_{\Pi} - \frac{\pi}{6} \right) \right]. \end{cases} \quad (20)$$

Вирішуючи систему (22), в загальному вигляді отримаємо координати точки  $\Theta$

$$\begin{aligned} I_{C1} &= \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[ I_L (2\sqrt{3} \sin \varphi_L + \cos \varphi_L) + I_{\Pi} \cdot \cos \varphi_{\Pi} \right], \\ I_{C2} &= \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[ -I_L \cdot \cos \varphi_L + I_{\Pi} (2\sqrt{3} \sin \varphi_{\Pi} - \cos \varphi_{\Pi}) \right]. \end{aligned}$$

Отримані рівняння однозначно визначають положення точки  $\Theta$  на фазовій площині. Струми компенсації, визначені цими формулами в загальному випадку визначають оптимальний режим компенсації реактивної потужності. В матричному вигляді рівняння мають вигляд

$$|I_C|^T = \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{vmatrix} I_L \\ I_{\Pi} \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} 2\sqrt{3} \sin \varphi_L + \cos \varphi_L & -\cos \varphi_{\Pi} \\ \cos \varphi_L & 2\sqrt{3} \sin \varphi_{\Pi} - \cos \varphi_{\Pi} \end{vmatrix}. \quad (21)$$

### Практична реалізація

Сучасні пристрої регульованої компенсації реактивної потужності складаються з двох основних елементів (рис. 6):

1) джерела реактивної потужності у вигляді батареї конденсаторів  $C_1$ , з'єднаної послідовно з реактором  $L_1$ ;

2) декомпенсуючого контуру, який складається з реактора  $L_{д1}$  та регулятора змінного струму.

В якості вхідних величин в системі керування виступають миттєві значення струмів та напруги плечей живлення  $i_L(t)$ ,  $i_{\Pi}(t)$  та  $u_L(t)$ ,  $u_{\Pi}(t)$  відповідно.

Вихідними величинами є кути управління  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  регуляторами змінного струму в колах декомпенсуючих реакторів.

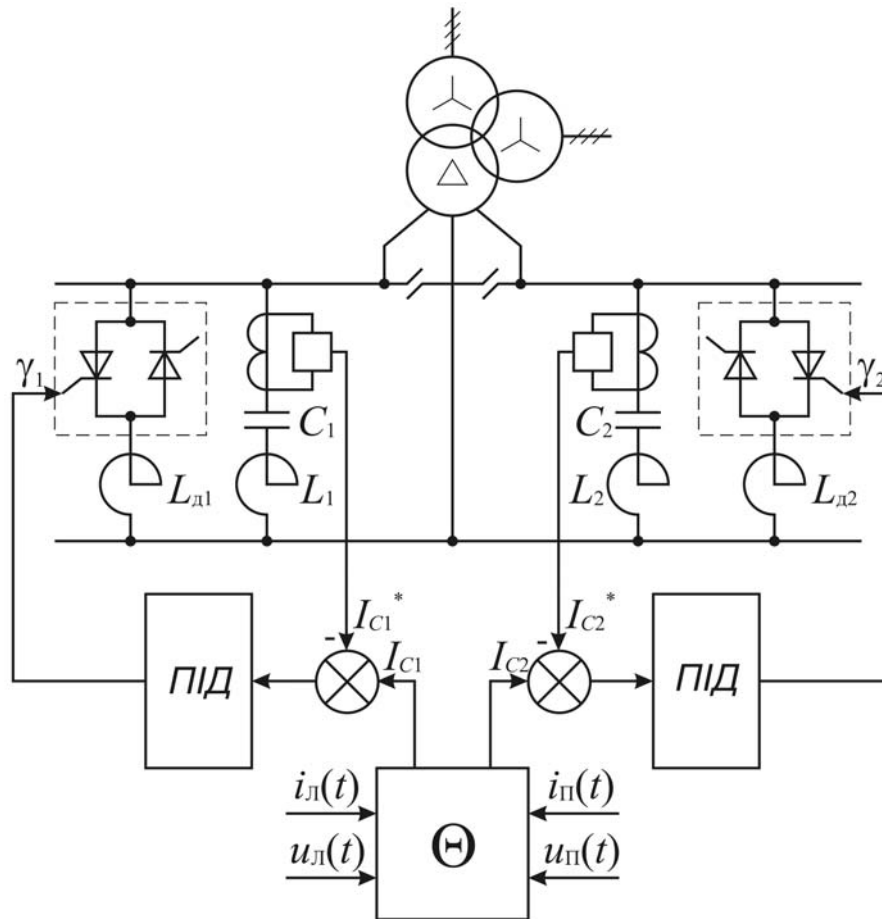


Рис. 6. Структурна схема системи керування компенсацією реактивної потужності на тяговій підстанції змінного струму

Пропонується удосконалити систему керування, а саме завдання ПІД-регуляторам  $I_{C1}$  та  $I_{C2}$  визначати підсистемою  $\Theta$  на основі залежності (21), яка однозначно визначає оптимальні струми компенсації.

На вхід підсистеми  $\Theta$  подаються миттєві значення струмів і напруг плечей живлення. Блоки формування (БФ) накопичують дані на одному періоді основної частоти, виділяють основні гармоніки струму і напруги, визначають діюче значення струмів лівого та правого плечей живлення та відповідні кути зсуву фаз. Діючі значення струмів плечей живлення формують транспонований вектор струмів  $|I|^T$ . Кути плечей живлення відповідним чином формують квадратну матрицю  $|M_\phi|$ . Після виконання матричної операції множення  $|I|^T \times |M_\phi|$  та масштабування добутку коефіцієнтом, на виході системи отримуємо необхідні значення струмів компенсації (рис. 7).

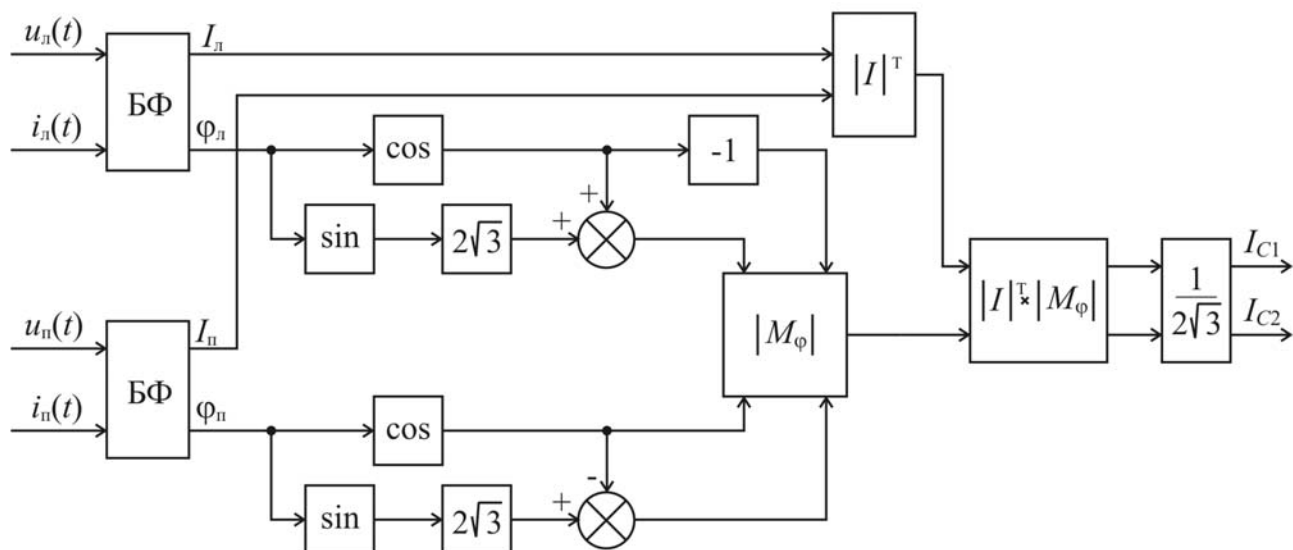


Рис. 7. Функціональна схема підсистеми визначення струмів компенсації  $\Theta$

Встановлення оптимальних струмів компенсації на основі залежності (21) в кожному плечі живлення дозволяє отримати квазісиметричну систему первинних струмів тягової підстанції за будь-яких співвідношень між струмами в плечах живлення та уникнути перетікань реактивної потужності.

### Висновки

1. Проблему несиметрії тягових підстанцій змінного струму необхідно вирішувати у взаємозв'язку з проблемою реактивної потужності.
2. Виведено аналітичну залежність для визначення струмів компенсації, застосування якої у алгоритмі керування регульованою компенсацією дозволить забезпечити відсутність перетікання реактивної потужності та зниження несиметрії напруги до нормованих значень.
3. Повне симетрування тягового навантаження можливе за умови здійснення компенсації реактивної потужності в обох плечах живлення тягової підстанції з реалізацією удосконаленого алгоритму керування.

### Література

1. Карпенко, С. Я. Опыт работы Укрзализныци по модернизации коммерческого учета электроэнергии. Стимулирование потребителей на оптовом рынке электроэнергии к модернизации учета и регулирования собственного графика потребления [Текст] / С. Я. Карпенко. – Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. – 2006. – Вип. 13. – С. 28-33.
2. Правила користування електричною енергією: зі змінами, внесеними Постановою НКРЕ від 25.12.2008, № 1449 та зареєстрованими Мін'юстом України 05.02.2009 р. № 106/16122 [Текст] / Національна комісія регулювання електроенергетики України. – К., 2009. – 159 с.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.

4. Разработка однофазной системы электроснабжения электрической тяги с применением независимых инверторов [Текст] / Промежуточный отчет по научно-исследовательской работе. – Днепропетр. инст. инж. ж-д. трансп. – Днепропетровск. – 1984. – 35 с.

5. Дослідження забезпечення пропускної спроможності пристроями електропостачання при електрифікації ділянок К–Б, З–Д [Текст] / Звіт з науково-дослідної роботи № 23.57.08.09, № держреєстрації 0108U10671. – Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. – Дніпропетровськ. – 2009.

6. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983.

7. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. – Учебн. для вузов ж.д. трансп. – М.: Транспорт, 1982.

### ***ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ***

Босий Дмитро Олексійович

Аспірант кафедри «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна

м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, к. 334

Коло наукових інтересів: Поліпшення показників якості електроенергії.

Контактний тел.: (050) 698-23-95, e-mail: [Dmitry.Bosiy@i.ua](mailto:Dmitry.Bosiy@i.ua)