

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

К-т техн. наук О.І. Семененко, аспірант Ю.О. Семененко

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

К-т техн. наук А.И. Семененко, аспирант Ю.А. Семененко

**INCREASING THE EFFECIENCY OF DC TRACTION POWER SUPPLY**

Ph.D., O.I. Semenenko, postgraduate Y.O. Semenenko

*В статті розглянуто питання підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму шляхом застосування перетворювальних пунктів, які розташовані в середній частині міжпідстанційної зони для забезпечення підживлення контактної мережі. Перетворювальні пункти пропонується створювати на основі чотирифазних понижувальних ШПП, що надає цілий ряд переваг, основні з яких полягають у зниженні втрат енергії в процесі її передачі та підвищенні якості енергії живлення електрорухомого складу постійного струму.*

**Ключові слова:** перетворювальний пункт, багатофазний широтно-імпульсний перетворювач, пульсації струму і напруги.

*В статье рассмотрен вопрос повышения эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока путем применения преобразовательных пунктов, которые расположены в средней части межподстанционной зоны для обеспечения подпитки контактной сети. Преобразовательные пункты предлагается создавать на основе четырехфазных понижающих ШПП, что предоставляет целый ряд преимуществ, основные из которых заключаются в снижении потерь энергии в процессе ее передачи и повышении качества энергии питания электроподвижного состава постоянного тока.*

**Ключевые слова:** преобразовательный пункт, многофазный широтно-импульсный преобразователь, пульсации тока и напряжения.

*The article deals with the issue of increasing the effectiveness of the traction power supply DC converter through the use of items that are located in the middle of the area between substations to ensure the replenishment of contact network. Such items must be powered from traction substations in order to reduce energy loss along the lines of high voltage. It is shown that for EMC power line items with the means of communication, signaling and automatic lock is advisable to use DC power. At the present level of development of transformational technology converting paragraphs proposed to be created on the basis of reducing pulse-width converters IGCT - advanced Lockable thyristors, which have a relatively high speed. In addition, through a comparative analysis found that the pulse width must be four-phase inverter, and its control keys must work alternately, creating a continuous process from the source of current consumption. This solution provides a number of advantages, the main of which are to reduce energy loss during transmission and improve the quality of power supply DC electric rolling stock.*

**Keywords:** conversion point, polyphase pulse width, converter ripple current and voltage.

**Вступ.** Система тягового відносно низький рівень напруги 3,3 кВ, що електропостачання постійного струму має не дозволяє суттєво збільшувати

навантаження на контактну мережу залізниць. Традиційні методи зниження втрат при передачі енергії до електричного рухомого складу (ЕРС), які підвищують електропровідність мережі, не достатньо ефективні. При великих навантаженнях застосування в контактній мережі постійного струму указаних заходів не забезпечує необхідного рівня напруги у середній частині зони між тяговими підстанціями згідно вимог [1], що заважає подальшій інтенсифікації руху поїздів та впровадженню швидкісного руху.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Радикальним рішенням проблеми є перехід до системи тягового електропостачання постійного струму напругою 6-24 кВ і технічна реалізація цього кроку не викликає особливих труднощів, але не вирішеним залишається питання побудови ефективного ЕРС постійного струму на таку напругу [2-4]. Тому поки що залишається лише можливість удосконалення існуючої системи.

Одним із таких рішень є підвищення рівня напруги по всій міжпідстанційній зоні за допомогою регульованих вольтододавальних пристроїв, які розміщують на тягових підстанціях і виконують, наприклад, на базі керованих випрямлячів [5]. Щоправда, уже при відстані між підстанціями 25-30 км застосування цих пристроїв виявляється недостатньо ефективним, бо в такому випадку для забезпечення необхідного рівня напруги на струмоприймачі швидкісного ЕРС вихідна напруга підстанцій в деякі моменти повинна бути навіть вище 3,7 кВ, що призводить до прискореного старіння ізоляції тягових двигунів.

Перспективнішим шляхом вирішення вказаної вище проблеми є передача електроенергії при підвищеній напрузі до віддалених від тягових підстанцій ділянок контактної мережі. Реалізувати такий варіант можливо застосуванням перетворювальних пунктів (ПП), які потрібно розташувати в середній частині міжпідстанційних зон [6-9]. До ПП електрична енергія подаватиметься від тягових підстанцій по лініях підвищеної напруги, а в контактну мережу від цих пунктів поступатиме напруга 3,3 кВ постійного струму. В результаті будемо мати значно

менші сумарні втрати енергії і необхідний для якісного живлення ЕРС рівень напруги по всій довжині міжпідстанційної зони.

Один із варіантів реалізації ПП має трансформаторно-випрямну структуру і передбачає живлення від мережі трифазного змінного струму 35 або 10 кВ, яка проходить вздовж залізниці від тягових підстанцій [6]. При великій потужності ПП, що складає 6-10 МВт, робота лінії змінного струму може призводити до створення електромагнітних перешкод функціонуванню засобів СЦБ та погіршувати якість енергії живлення ЕРС. Тому така лінія повинна виконуватись на окремих опорах, розташованих на необхідній відстані від тягової мережі постійного струму, ліній зв'язку та СЦБ.

Щоб уникнути додаткових витрат на спорудження лінії та покращити якісні показники напруги живлення ЕРС, можна виконати ПП на базі понижувального широтно-імпульсного перетворювача (ШПП) з живленням від джерела постійного струму підвищеної напруги [7-9]. За цим варіантом у якості лінії живлення можуть бути використані підвишені на опорах контактної мережі алюмінієві проводи 2А-185, які зазвичай застосовують як підсилюючі в контактній мережі, зворотним провідником буде рейкова мережа.

**Визначення мети та задачі досліджень.** Для прийняття рішення щодо вибору найефективнішого варіанта реалізації ПП потрібно проаналізувати основні показники роботи ШПП з різною структурою та напругою живлення, розглянути можливість застосування таких ПП в умовах існуючих ділянок контактної мережі постійного струму та при спорудженні нових.

**Основна частина.** Як сказано було вище, для тягової мережі постійного струму при відстані між підстанціями більше 25 км і значних навантаженнях з метою зменшення втрат енергії та забезпечення необхідного рівня напруги пропонується обладнати ПП в середній частині міжпідстанційної зони. При підвищеній напрузі живлення ПП для мінімізації втрат доцільно використати одноступеневе перетворення енергії шляхом застосування багатофазного понижувального ШПП (рис. 1).

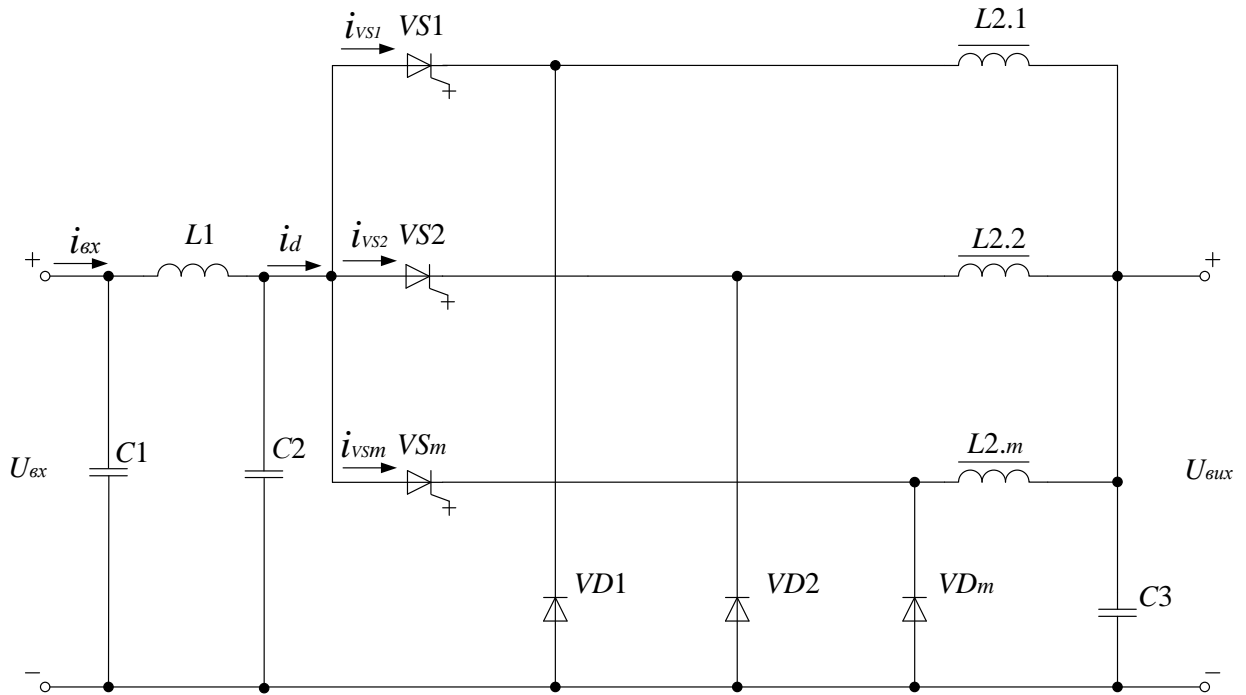


Рис. 1. Схема багатофазного широтно-імпульсного перетворювача

Крім загального входного фільтра кожна із фаз перетворювача має свій керований ключ  $VS1-VSm$ , зворотний діод  $VD1-VDm$  та дросель вихідного фільтра  $L2.1-L2.m$ , який реалізовано як багатофазний зрівняльний реактор на загальному осерді. З урахуванням розміщення ШПІ в умовах стаціонарного ПП, тобто коли немає особливих обмежень за масою та розмірами конструкції перетворювача, у якості

керуваних ключів краще застосувати високовольтні  $IGCT$  – сучасні двоопераційні тиристори, які мають відносно високу швидкодію при невисокій у порівнянні з  $IGBT$  вартості. На виході ШПІ встановлено загальний для всіх фаз конденсатор фільтра  $C3$ , де виділяється вихідна напруга  $U_{вих}$  як середнє арифметичне з вихідних напруг фаз [8]:

$$U_{вих} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{вих.i} , \quad (1)$$

де  $U_{вих.i}$  – вихідна напруга  $i$ -ї фази;  
 $m$  – число фаз перетворювача.

При жорстко фіксованому співвідношенні між напругами на виході та вході ШПІ, що означає і незмінний коефіцієнт заповнення імпульсів  $\tau$  (для понижувального ШПІ  $\tau = U_{вих}/U_{вх}$ ), можна

значно зменшити пульсації вхідного струму, використавши переваги багатофазного перетворювача. Для цього тривалість ввімкненого стану ключів різних фаз повинна дорівнювати  $m$ -ій частині періоду  $T$ , їх часовий зсув повинен мати таке ж значення (рис.2).

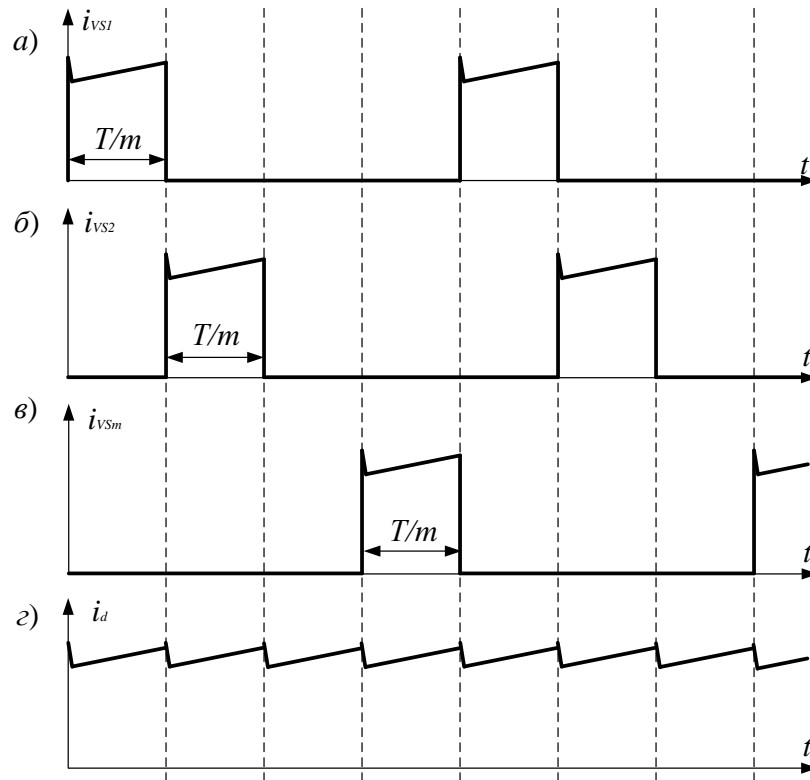


Рис. 2. Діаграми струмів понижувального ШПП

Оскільки кожна з фаз ШПП при такому керуванні працює почергово, створюється безперервний процес споживання струму від джерела енергії. В результаті струм  $i_d$ , який є сумою струмів керованих ключів фаз  $i_{vs}$  (рис. 1), має невеликий рівень пульсацій, бо вони спричинені лише комутаційними сплесками та струмами намагнічування фаз реактора (рис.2, а-г).

В сталому режимі струми намагнічування невеликі, що є наслідком використання багатофазного зрівняльного реактора  $L2$  на загальному осерді, особливості застосування якого забезпечують високу еквівалентну індуктивність при відносно невеликих розмірах його конструкції [8]. Крім цього частота пульсацій зростає у  $m$  разів у порівнянні з частотою перемикання ключів, тому застосування легкого  $LC$  фільтра (на рис. 1 це  $L1C2$ ) може забезпечити зниження пульсацій вхідного струму  $i_{ex}$  багатофазного ШПП до необхідного рівня. Щоправда, на вході перетворювача (рис. 1) необхідно встановити додатковий конденсатор фільтра  $C1$ , що потрібно для зниження рівня

комутаційних перенапруг при вимиканнях струму в лінії.

Перевагою багатофазної схеми є також те, що не потрібна велика ємність конденсатора вихідного фільтра  $C3$ , адже згідно рівняння (1) при вказаному алгоритмі роботи ШПП вихідна напруга не залежить від часу, а залежить від стабільності та рівня пульсацій вхідної напруги. Отже при досить якісній вхідній напрузі будемо мати мінімальні пульсації вихідної напруги, які спричинені лише комутаційними сплесками.

Що стосується напруги живлення та кількості фаз схеми понижувального ШПП, то для правильного вибору потрібно врахувати не тільки переваги передачі електричної енергії при підвищеній напрузі та більш високу якість електричної енергії живлення ЕРС, а й необхідні витрати на виготовлення, монтаж та експлуатацію перетворювача на базі високовольтних  $IGCT$ , а також установлених на сусідніх тягових підстанціях джерел постійного струму та лінії живлення ПП. До речі, коли достатньо лише одного ПП, то для зменшення витрат на спорудження та під'єднання до

контактної мережі він може бути суміщений із постом секціонування.

Якщо застосувати двофазний понижувальний перетворювач, який працює за алгоритмом почергового вмикання ключів різних фаз, то він повинен мати коефіцієнт заповнення імпульсів  $\tau = 1/2$ , тобто ШПП буде понижувати напругу вдвічі і для його живлення потрібна вхідна напруга 6,6 кВ. Сподівання на значну економію енергії при такому зростанні напруги в лінії електричної передачі не підтверджуються на практиці. У Росії розроблено ПП на базі понижувального ШПП 6,6/3,3 кВ, виконаного на *IGCT* за трифазною шестиканальною схемою [7], та згідно результатів порівняльних досліджень вигіднішою від нього є трансформаторно-випрямна структура ПП при живленні від мережі трифазного струму 10 кВ.

Розглянемо інші варіанти ПП на базі понижувальних ШПП з більш високою напругою живлення та більшою кількістю фаз. Слід врахувати, що при збільшенні напруги живлення потрібно буде зменшити коефіцієнт заповнення  $\tau$ , а використання відносно вузької ширини імпульсів у ШПП призводить до збільшення втрат в процесі перетворення енергії. Відомо, що тривале використання для потужних понижувальних ШПП режиму роботи, при якому  $\tau < 1/6$ , є недоцільним і у такому випадку навіть краще переходити до трансформаторних схем [10]. Щодо збільшення кількості фаз в структурі перетворювача, то воно потрібне для збереження алгоритму почергового вмикання ключів різних фаз з безперервним споживанням струму із джерела. Зростання  $m$  потребує збільшення кількості ключів, але це не завжди слід розцінювати як ускладнення конструкції ШПП, адже для

потужних перетворювачів і без цього досить часто силові тиристори необхідно вмикати паралельно, щоб знизити струмове навантаження.

Отже, для створення ефективного ПП слід застосовувати понижувальний ШПП, у якого кількість фаз  $m = 3-5$  і який буде працювати при одному із фіксованих значень коефіцієнта заповнення 1/3, 1/4 або 1/5. Оскільки ПП повинен забезпечувати напругу 3,3 кВ для подачі в тягову мережу, то при жорстко фіксованому співвідношенні між напругами на вході та виході ШПП напруга живлення його для різних варіантів (без урахування втрат в перетворювачі) повинна бути відповідно 9,9, 13,2 та 16,5 кВ. Така напруга може бути отримана від керованих випрямлячів розташованих на сусідніх тягових підстанціях, як запропоновано у роботі [9].

Виконаємо для порівняння розрахунок основних показників роботи ПП з понижувальними ШПП, які мають кількість фаз  $m = 2-5$ , тобто включаючи двофазний варіант. Лінію живлення виконуємо проводами 2А-185, якими буде подаватися енергія постійного струму від двох сусідніх тягових підстанцій до ПП. Також вважаємо, що ПП розташований посередині міжпідстанційної зони, довжина якої  $l = 30$  км.

Щоб забезпечити можливість якісного живлення ЕРС, враховуючи потужність сучасних електровозів та швидкісних електропоїздів, прийmemo номінальну потужність ПП рівною 8 МВт. Втрати напруги  $\Delta U_l$  і потужності  $\Delta P_l$  у лінії живлення розрахуємо за умови номінальної потужності навантаження ПП, тобто при номінальному вхідному струмі ШПП  $I_{вх.ном}$

$$\Delta U_l = I_{вх.ном} R_l; \quad \Delta P_l = I_{вх.ном}^2 R_l, \quad (2)$$

де  $R_l$  – опір лінії живлення, який визначають через погонні опори проводу  $r_{np} = 0,17$  Ом/км (для проводу А-185) та рейкової мережі  $r_p = 0,015$  Ом/км (для двониткової колії з рейками Р65)

$$R_l = (r_{np}/k_{np} + r_p/k_k) l/2, \quad (3)$$

де  $k_{np}$  – кількість паралельних провідників лінії живлення;  
 $k_k$  – кількість паралельних рейкових колій.

$$R_l = (0,17/4 + 0,015/4) 30/2 = 0,694 \text{ Ом.}$$

Виконаємо оціночний розрахунок значення номінальної вхідної напруги  $U_{вх.ном}$  та струму  $I_{вх.ном}$  ШПП з урахуванням втрат у ключах та втрат у елементах фільтрів перетворювача за діючими струмом та

напругою. Розрахуємо також втрати напруги та потужності у лінії живлення ПП згідно рівнянь (2) і зведемо отримані результати у таблицю.

Таблиця 1. Основні показники роботи ПП з багатофазними ШПП

Кількість фаз, $m$	Вхідна напруга $U_{вх.ном}$ , кВ	Вхідний струм $I_{вх.ном}$ , А	Втрати напруги в лінії $\Delta U_l$ , В	Втрати потужності в лінії $\Delta P_l$ , кВт	Максимальна напруга випрямляча $U_{dmax}$ , кВ	Потрібна кількість $IGCT$
2	6,64	1220	847	1033	8,4	8
3	9,95	815	566	461	11,0	9
4	13,25	612	425	260	14,1	16
5	16,56	490	340	167	17,2	25

Для оцінювання втрат потужності в лінії  $\Delta P_l$  виконаємо розрахунок втрат у тяговій мережі  $\Delta P_{тм}$  в середній частині міжпідстанційної зони при відсутності ПП. Щоб забезпечити згідно [1] хоча б мінімально необхідну напругу тягової мережі на

швидкісних ділянках  $U_{min} = 2,9$  кВ в середній частині зони, потрібні вольтододавальні пристрої на підстанціях. При рухові швидкісного електропоїзда, який споживає із мережі енергію потужністю  $P_e = 8$  МВт, його струм  $I_e$  буде:

$$I_e = P_e / U_{min}, \quad (4)$$

$$I_e = 8 \cdot 10^6 / 2900 = 2759 \text{ А.}$$

Для контактної підвіски, яка виконана за формулою М-120+2МФ-100, згідно рівняння (3) визначаємо опір тягової мережі  $R_{тм} = 0,277$  Ом і за рівняннями (2) втрати напруги  $\Delta U_{тм} = 764$  В та потужності  $\Delta P_{тм} = 2108$  кВт. Застосування вольтододавальних пристроїв дозволило забезпечити необхідний рівень напруги в тяговій мережі при підвищенні вихідної напруги підстанції до 3664 В, але втрати  $\Delta P_{тм}$  при цьому перевищують 25 % від корисної потужності. Це вдвічі перевищує втрати потужності в лінії  $\Delta P_l$ , які маємо навіть при використанні двофазного понижувального ШПП з найнижчою напругою живлення.

При номінальній потужності ШПП вихідна напруга керованих випрямлячів, яка потрібна в умовах двостороннього живлення ПП, з урахування втрат у перетворювачі та лінії буде відповідно складати 7,5, 10,5, 13,7 і 16,9 кВ. При односторонньому живленні ПП напруга працюючого випрямляча зростає до указаних у таблиці значень  $U_{dmax}$ .

Реалізувати такі джерела можна застосуванням керованих випрямлячів, підключених до вторинної обмотки понижувального трансформатора тягової підстанції номінальною напругою 10,5 кВ. Для п'ятифазного ШПП потрібен спеціальний понижувальний трансформатор та випрямляч з вихідною напругою 17,2 кВ, що ускладнює реалізацію такого варіанта. Найпростіше реалізувати джерело живлення ПП з чотирифазним ШПП, бо при застосуванні випрямляча на 14,1 кВ будуть мінімальні пульсації випрямленої напруги, що означає й мінімальні розміри фільтруючих пристроїв. Слід також уточнити, що для підтримання стабільності вихідної напруги ПП необхідно забезпечувати дистанційне регулювання вихідної напруги керованих випрямлячів на тягових підстанціях.

Кількість послідовно поєднаних силових  $IGCT$  в схемі ШПП обрано із урахуванням їх максимально допустимої

напруги, яка дорівнює 6,5 кВ, з необхідним для тривалої експлуатації запасом за напругою. Для двофазного понижувального ШПІ крім послідовного поєднання при вказаному струмовому навантаженні потрібне паралельне увімкнення силових *IGCT*, тому загальна кількість їх зростає до 8. При  $m = 3-5$  паралельного поєднання тиристорів застосовувати не потрібно, бо *IGCT* виготовляють на струми до 800-1200 А. Найпотужніші тиристори, тобто розраховані на найбільші струми, будуть необхідні для трифазного ШПІ, що суттєво підвищить вартість перетворювача.

З отриманих результатів можемо зробити висновок, що двофазний ШПІ, дійсно має досить великі втрати потужності в лінії живлення ПП, тому його застосування найменш вигідне. Наступні два варіанти при знижених втратах потужності є дещо складнішими двофазного, але простішими і дешевшими у порівнянні з п'ятифазним

ШПІ, де потрібно 25 *IGCT*. Із трифазного та чотирифазного варіантів перевагу має чотирифазний ШПІ за рахунок менших втрат енергії в лінії живлення та простішої будови джерел живлення.

Деяку складність викликає реалізація чотирифазного зрівняльного реактора на чотиристержневому осерді, індуктивність та взаємодуктивність обмоток якого були б ідентичними у всіх фазах. Розглядалися варіанти такого реактора з плоскою та просторовою магнітною системами. Простіша плоска конструкція для забезпечення ідентичних у всіх фазах параметрів потребує використання двох реакторів, обмотки яких поєднані за схемою рис. 3, а. При моделюванні чотирифазний реактор було реалізовано застосуванням схеми поєднання чотирьох трифазних індуктивних елементів рис. 3, б, що може бути використано при розробці конструкції чотирифазного ШПІ.

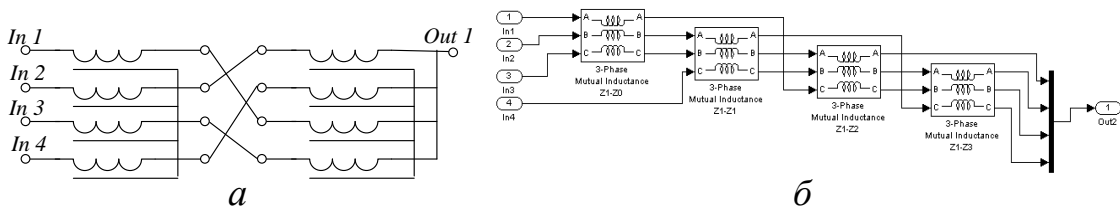


Рис.3. Схеми реалізації чотирифазного зрівняльного реактора

**Висновки.** Для підвищення ефективності роботи системи тягового електропостачання постійного струму при великих навантаженнях тягової мережі і

довжині міжпідстанційної зони понад 25 км слід застосовувати перетворювальні пункти на основі чотирифазних понижувальних ШПІ.

Список використаних джерел

1. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [Текст] № ЦЕ-0009. - К.: ТОВ „Швидкий рух”, 2005. - 80с.
2. Kotelnikov, A. World trends in the development of railway electrification [Text] / A. Kotelnikov, A. Glonti // Rail International. - 2001. - August/September. P.26 – 35.
3. Майер, Л. Оценка возможностей электротяги на 12 кВ постоянного тока [Текст] / Л. Майер, О. Вентура. - Ingenering Informazia. 1989. С. 271 – 273.
4. Carpita, M. Preliminary design of a 18 kv locomotive / M. Carpita, P. Cesario, P. Farina, O. Ventura. Sevilla. EPE95, 1995.
5. Марикин, А.Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / А.Н. Марикин; [Петербургский госуниверситет путей сообщения]. – СПб., 2008. – 36 с.
6. Корниенко, В.В., Электрификация железных дорог [Текст] / В.В. Корниенко, А.В. Котельников, В.Т. Доманский. // Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор): Монография. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.

## Автоматизовані системи електричного транспорту

---

7. Федотов, А.А. Электроснабжение контактной сети постоянного тока с питанием повышенным напряжением преобразователя по усиливающему проводу [Текст] / А.А. Федотов, Н.П. Анхимов, С.Н. Васильев и др. // Труды Межд. симп. «Элтранс». – СПб., 2003 – С. 291-296.
8. Гончаров, Ю.П. Система электроснабжения контактной сети постоянного тока с продольной линией повышенного напряжения [Текст] / Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, В.Н. Козачок, В.В. Замаруев, В.В. Ивахно, С.Ю. Кривошеев, А.И. Семененко // Вісник ДНУЗТ. – 2008. – С. 42-48.
9. Семененко, О.І. Трифазний ШПІ для пункту підвищення напруги 10/3,3 кВ [Текст] / О.І. Семененко, Т.В. Ісакова, Є.А. Аветісов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, № 126. – Х. – 2011 р. – С. 204-208.
10. Гончаров, Ю.П. Обратимый преобразователь для связи двух линий постоянного тока в системе распределенного тягового электроснабжения [Текст] / Ю.П. Гончаров, Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко и др./ Технічна електродинаміка, темат. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – К. – 2004. – ч. 6, С. 99-106.

---

Семененко Олександр Іванович, к-т техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: [slider2012@i.ua](mailto:slider2012@i.ua)

Семененко Юрій Олександрович, аспірант кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: [slider2012@i.ua](mailto:slider2012@i.ua)

Semenenko Oleksandr Ivanovych, Ph.D., associate professor Department automated electric vehicle, Ukrainian State University of Railway Transport.

Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: [slider2012@i.ua](mailto:slider2012@i.ua)

Semenenko Yuriy Oleksandrovyich, Postgraduate Department automated electric vehicle, Ukrainian State University of Railway Transport.

Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: [slider2012@i.ua](mailto:slider2012@i.ua)

*Стаття поступила 25.04.2015*