

УДК 621.311

**РОЗВИТОК ОБЛАДНАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. ЧАСТИНА I**

Кандидати техн. наук С. І. Яцько, Н. П. Карпенко, Я. В. Ващенко, В. В. Панченко

**РАЗВИТИЕ ОБОРУДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ. ЧАСТЬ I**

Кандидаты техн. наук С. И. Яцько, Н. П. Карпенко, Я. В. Ващенко, В. В. Панченко

**DEVELOPMENT OF EQUIPMENT FOR DISTRIBUTION DEVICES POWER TRACTION ELECTRIC SUPPLY. PART I**

PhD in technical science S. I. Yatsko, N. P. Karpenko, Y. V. Vashchenko, V. V. Panchenko

*Розглянуто поточний стан розвитку технологій, а також технічні параметри та характеристики сучасного типового обладнання розподільних пристроїв систем тягового електропостачання. Виокремлено специфіку основних подібних рис і відмінностей, переваг і недоліків перспективного обладнання систем електропостачання. Зосереджено увагу на технічних рішеннях, відмінних від тих, що застосовуються в Україні, з метою аналізу доцільності їх розвитку та впровадження в теперішніх умовах.*

**Ключові слова:** *тягове електропостачання, розподільні пристрої, сучасне обладнання, нові технології, вимикачі тягових підстанцій.*

*Рассмотрено текущее состояние развития технологий, а также технические параметры и характеристики современного типового оборудования распределительных устройств систем тягового электроснабжения. Выделено специфику основных сходных черт и различий, преимуществ и недостатков перспективного оборудования систем электроснабжения. Сосредоточено внимание на технических решениях, отличных от тех, что применяются в Украине, с целью анализа целесообразности их развития и внедрения в нынешних условиях.*

**Ключевые слова:** *тяговое электроснабжение, распределительные устройства, современное оборудование, новые технологии, выключатели тяговых подстанций.*

*It's presented review of state and development technologies, technical parameters and characteristics modern basic type equipment in the distributive devices for traction power supply systems: complete block technologies, high-voltage switches direct and alternating current, power and converting transformers, switchgears, recuperators and inverters, power supply automation. On example world's leading specimens shows possibilities high energy efficiency and reliability modern equipment for switchgears. Specifics main features and differences, advantages and disadvantages of perspective equipment electric power supply systems are considered. It's focused view on technical solutions other than those, used in Ukraine, to analyze the feasibility their development and implementation in the present conditions. General directions and criteria for choice rational strategy modernization distributive devices of traction power supply systems are determined. Analysis will allow performing selection technical parameters for devices in design mathematical models and subsequent verification, coordination and implementation in new devices, their compatibility with existing traction power system, railways, subways.*

**Keywords:** traction power supply, switchgears, modern equipment, new technologies, traction substations switches.

**Вступ.** Як відомо, основними двома складовими будь-якої електрифікованої транспортної системи є рухомий склад та системи забезпечення його енергією – мережі електропостачання. І якщо напрямки підвищення енергоефективності рухомого складу відомі (упровадження асинхронних, синхронних, лінійних приводів; оптимізація режимів руху тощо) [1] і, як правило, полягають у доведенні до оптимуму відомих теоретичних напрацювань, то технології систем електропостачання нині перебувають на межі кардинальних змін.

Бажання підвищити ефективність функціонування електрифікованих залізниць шляхом зменшення енергетично-

матеріальних витрат на виробництво, експлуатацію, обслуговування та ремонт передбачає пошук нових технічних рішень у цій галузі [2]. Це пов'язано з усвідомленням тенденції до постійного збільшення вартості електроенергії, скінченності паливних ресурсів, суттєвих втрат більш ніж 30 % при передачі та розподіленні електроенергії, вартості виходу з ладу обладнання систем електропостачання, вимог до забезпечення екологічності [3].

**Аналіз публікацій.** Аналіз відомих джерел дав змогу виокремити основні напрямки перспективних технологій у системах тягового електропостачання (рис. 1) [4-10].

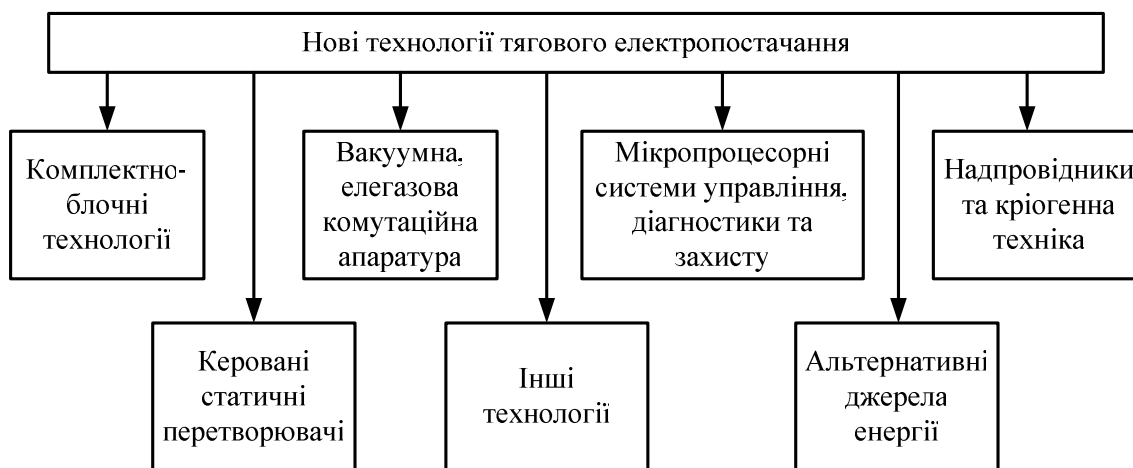


Рис. 1. Перспективні технології систем електропостачання

На сьогодні багато виробників пропонують до поставки на тягові підстанції й інші об'єкти електропостачання залізниць різне за технічними характеристиками, схемним і конструктивним виконанням, якістю і надійністю електротехнічне обладнання. Окрім вітчизняного, наприклад компаній Плутон, Запоріжтрансформатор (Україна, Запоріжжя), також спостерігається тенденція до використання імпортного обладнання, наприклад таких виробників, як АВВ, Siemens, General

Electric (Німеччина) Secheron (Швейцарія), Schneider, Alstom (Франція), Toshiba, Meiden (Японія) тощо. Наведений далі огляд не може охопити весь широкий спектр окремих розробок, а показує лише галузі, у яких відбуваються найсуттєвіші технологічні зміни.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Огляд та аналіз актуальних технологій, а також перспективних засобів поліпшення функціонування для визна-

чення раціональної стратегії модернізації системи тягового електропостачання.

**Основна частина досліджень.** Пріоритетним у техніці тягового електропостачання є впровадження **комплектно-блочних технологій** [5]. Суть цієї технології полягає в тому, що на одному підприємстві здійснюється дослідження, конструювання, проектування, виробництво, монтаж, налаштування, сервісне і гарантійне обслуговування. В основу

комплектно-блочних технологій покладено концепцію створення необслуговуваної підстанції без постійного експлуатаційного персоналу, що передбачає використання високонадійного обладнання та застосування засобів автоматизації і діагностики всього обладнання підстанції. Це дає змогу перейти від обслуговування «по регламенту» до обслуговування «по необхідності», за фактичним станом. Приклад блочної підстанції показано на рис. 2.



Рис. 2. Приклад тягової підстанції постійного струму комплектно-блочного типу

Складовими елементами комплектно-блочних підстанцій має бути високонадійне та багатофункціональне силове і допоміжне обладнання, до якого в першу чергу відносять трансформатори, комутаційну апаратуру, напівпровідникові перетворювальні пристрої, засоби автоматизації та ін.

Що стосується **силової комутаційної апаратури** (рис. 1), відомо, що на початку електрифікації тягові підстанції комплектувалися баковими масляними вимикачами. У міру розвитку комутаційної техніки вимикачі замінювалися на маломасляні, де масло служить тільки дугогасним

середовищем. На ряді підстанцій застосовуються повітряні вимикачі, від'єднувачі і короткозамикачі. Нині масляні, маломасляні, повітряні вимикачі, від'єднувачі і короткозамикачі не рекомендуються до застосування. На сьогодні за надійністю, екологічністю, мінімізацією витрат з обслуговування і експлуатації, діапазонами номінальних параметрів та економічністю найбільш доцільним є застосування вакуумних та елегазових вимикачів [6,7]. З цих двох типів найбільше застосовуються: на середні напруги змінного струму до 35 кВ

включно – вакуумні, а на високі напруги більше 35 кВ – елегазові.

Доведено, що найбільш простим способом гасіння електричної дуги є гасіння у вакуумі, у якому відсутнє середовище, що

проводить струм. Основою будь-якого вакуумного вимикача є вакуумна дугогасна камера, у якій створюється вакуум високого рівня  $1,33 \cdot 10^{-4}$  Па ( $10^{-6}$  мм рт. ст.) (рис. 3).

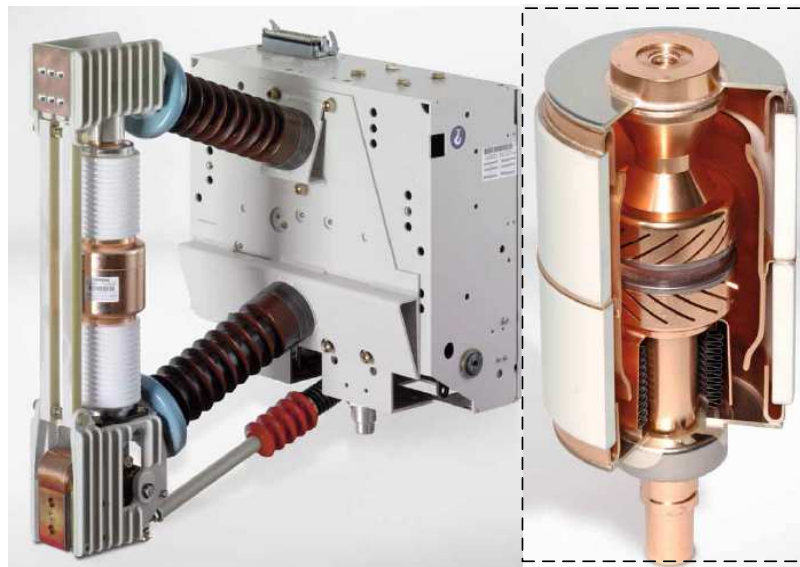


Рис. 3. Вакуумний вимикач ЗАН47 та вакуумна камера виробництва Siemens [7]

До переваг вакуумних вимикачів відносять: відсутність необхідності використання масла, високу зносостійкість, простоту експлуатації, безшумність, чистоту, екологічність; високу швидкодію. Серед недоліків вказують на: рентгенівське випромінювання (при напрузі більше 35 кВ); комутаційні перенапруги; властивість матеріалів до зварювання в умовах глибокого вакууму.

Елегазові вимикачі розглядаються як найбільш перспективні на напруги 110 і 220 кВ (рис. 4). Елегаз  $SF_6$  (шестифториста сірка) є електровід'ємним газом, його молекули мають здатність захоплювати електрони. При цьому утворюються малорухомі, важкі від'ємні іони, які повільно переміщуються в електричному полі. Втрата електронів робить дугу нестійкою і вона легко гасне.

Переваги елегазових вимикачів: вибухо- і пожежобезпечність, швидкодія,

можливість здійснення синхронного розмикання контактів безпосередньо перед переходом струму через нуль, висока вимикальна здатність при особливо важких умовах вимкнення (напр. вимкнення невіддалених коротких замикань), надійне вимкнення ємнісних струмів холостих ліній, малий знос дугогасних контактів. До недоліків відносять: шкідливий вплив на навколишнє середовище, необхідність наявності пристроїв для наповнення, перекачування та очищення  $SF_6$ , складність конструкції ряду деталей та вузлів, необхідність застосування високонадійних ущільнювачів, висока вартість дугогасного середовища та вимикача в цілому.

**Вимикачі постійного струму.** Основним напрямком удосконалення швидкодійних вимикачів є зменшення часу вимкнення  $t_{\text{вимкн}}$ . Його можна зменшувати, удосконалюючи конструкцію механізму швидкодійного вимикача або дугогасної камери.

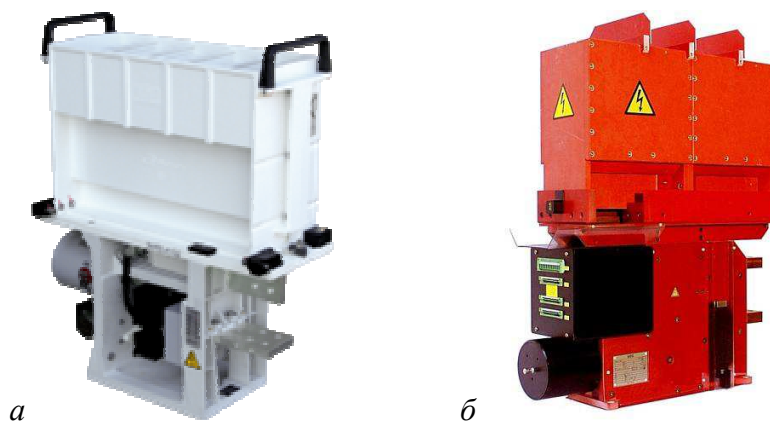


Рис. 4. Швидкодіючі вимикачі Secheron (а) [8] та Gerapid (б) [9]

Серед швидкодійних автоматичних вимикачів можна навести зразки Gerapid виробництва General Electric (Німеччина) або UR – виробництва Secheron (Швейцарія) (рис. 4). Обидва вимикачі мають приблизно однакові технічні характеристики: струми вимкнення до 8000 А, велика кількість опцій (розчіплювачі максимального струму, мінімальної напруги), значний комутаційний ресурс [8,9]. Технічне обслуговування передбачає лише візуальний огляд та, у разі необхідності, заміну пари дугогасних контактів після виконання 300 аварійних вимикань.

Принцип дії вимикачів оснований на гасінні електричної дуги в дугогасній решітці, яка складається зі сталевих пластин. Електрична дуга під дією магнітного поля видувається в дугогасну камеру, де розбивається на короткі дуги і гаситься.

**Силові та перетворювальні трансформатори.** На залізницях світу, електрифікованих на однофазному струмі промислової частоти, живлення тягової мережі відбувається від трифазних ліній електропередачі через трансформатори, з'єднані по одній із схем: однофазного трансформатора Скотта, трифазного трансформатора з відкритим трикутником ( $\Delta$ ) та за схемою «зірка-трикутник-11»

( $\wedge/\Delta$ -11), до яких висуваються такі загальні вимоги: забезпечувати заданий рівень напруги, мінімальну несиметрію, можливість живлення районних та нетягових споживачів [10].

На вітчизняних електрифікованих залізницях найбільше розповсюдження отримала схема живлення тягової мережі від трифазного трансформатора зі схемою з'єднання обмоток  $\wedge/\Delta$ -11. Трансформатор за схемою Скотта застосовується на залізницях у Європі, Японії та ін. Схема Скотта складається з двох однофазних взаємозамінних трансформаторів (рис. 5). Перевагами схеми Скотта є можливість регулювання напруги на висотному та базисному трансформаторах та менший ступінь несиметрії порівняно з іншими схемами.

В Україні така схема Скотта не застосовується через необхідність переобладнання існуючої тягової системи електропостачання, складність виготовлення трансформаторів (ізоляція обмоток первинної напруги виконується на лінійну напругу, трансформатор за рахунок цього є спеціальним, а не типовим, це його здорожчує), а також неможливість живлення районних і нетягових споживачів (для живлення окремих трифазних споживачів необхідно встановлювати окремі трифазні трансформатори).

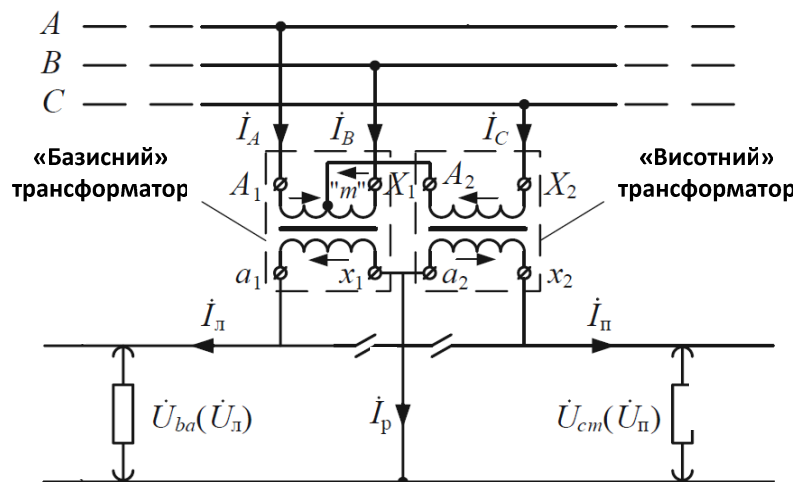


Рис. 5. Схема Скотта

Сучасні **перетворювальні трансформатори** рекомендується конструктивно виконувати сухими, з відкритими обмотками, не екранованими твердою ізоляцією, з природним охолодженням [11]. Сухі трансформатори (рис. 6) кращі за перевантажувальною здатністю, екологічністю, пожежобезпекою. У сухих трансформаторах обмотки просочені смолою, виготовлені методом вакуум-тиску з подальшою їх полімеризацією при високій температурі. Цим досягається міцне ізоляційне покриття котушок, яке гарантує надійний рівень ізоляції і захист від впливу

навколишнього середовища і одночасно не перешкоджає ефективному охолодженню. Як ізоляція використовується матеріал з практично негорючого і самозатухаючого матеріалу, армованого скловолокном, у якому розміщена високовольтна обмотка з вертикальними і горизонтальними каналами охолодження. Магнітна система трансформатора зібрана з тонколистової 0,3 мм холоднокатаної анізотропної електротехнічної сталі за технологією Step-Lap, що забезпечує зменшення втрат, струму холостого ходу і рівня шуму.



Рис. 6. Сухий трансформатор для підстанцій метрополітенів виробництва Плутон (м. Запоріжжя) [11]



Окремі види обладнання входять до складу **розподільних пристроїв**, призначених для приймання і розподілу електроенергії на одній напрузі. Електричні схеми розподільчих пристроїв повинні забезпечувати з'єднання їх окремих елементів просто, надійно і зручно для виконання вимог до надійності та безпеки живлення залізничних споживачів, відповідно 1-ї або 2-ї категорій.

На рис. 7, а наведено електричну схему обладнання на прикладі розподільного пристрою змінного струму 27,5 кВ виробництва Toshiba [12], що складається з таких основних елементів, як тягові трансформатори Скотта великої потужності, однофазні автоматичні вимикачі, обмежувачі перенапруг, перемикачі положень, панелі керування, інтелектуальні цифрові реле, засоби захисту, контролю та моніторингу стану на основі контролерів та мережі з'єднання LAN.

Для системи електрифікації постійного струму на додаток до такого стандартного обладнання, як випрямні трансформатори, випрямлячі та швидкодійні автоматичні вимикачі, розроблено значну кількість нового обладнання на основі силової електроніки та цифрових технологій. На рис. 7, б показано приклад схеми розподільного пристрою тягової підстанції постійного струму 3,3 кВ. Застосовуються трансформатори з потужністю випрямлячів до 6 МВт з еластичною або епоксидно-гумовою ізоляцією. Для підвищення екологічності застосовуються трансформатори з рідкосиліконовою або рослинно-масляною ізоляцією.

Випрямлячі із застосуванням методу вертикальної теплорозсіювальної труби самоохолодження (рис. 8) мають високу термічну ефективність і можуть бути встановлені на відкритому повітрі.

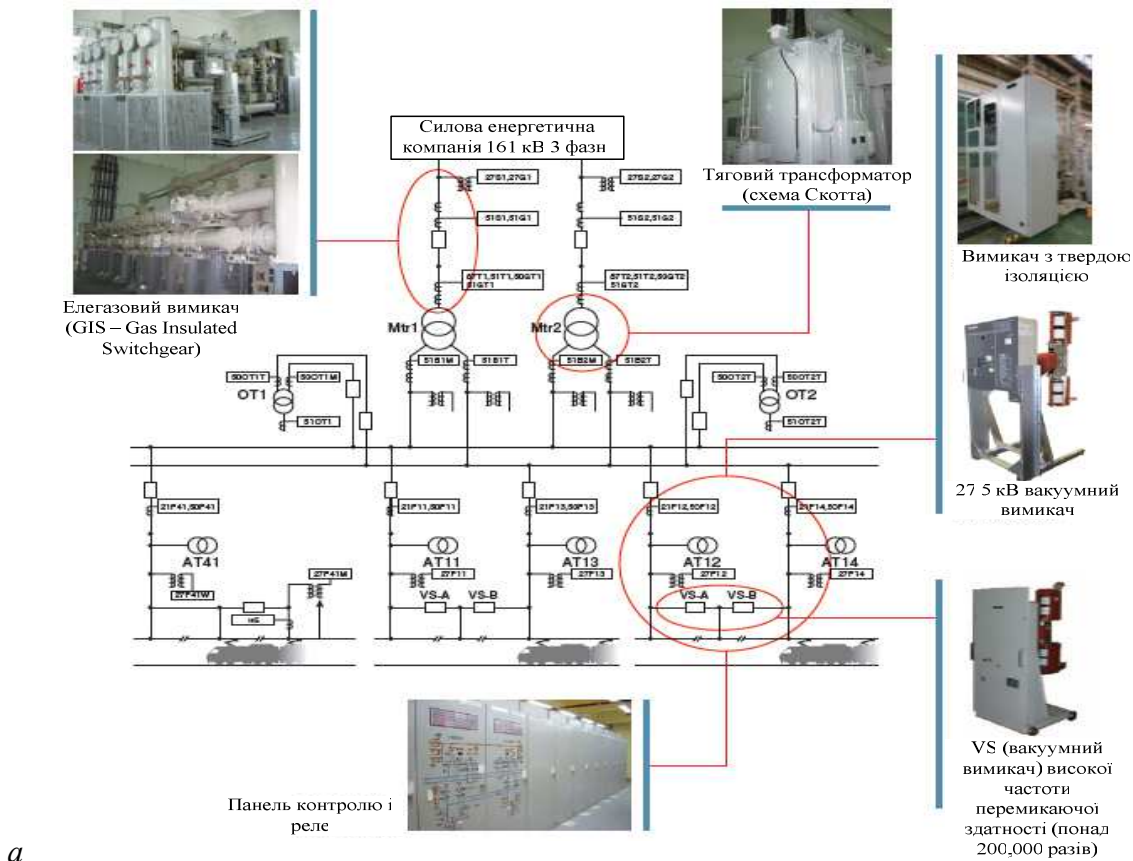
Високошвидкісний вакуумний вимикач (HSVCB) складається з блоків вимикача, конденсатора, модуля управління та захисту (рис. 9). У разі виявлення блоком керування та захисту надструму або отримання команди відкриття, обидва вентиля та тиристорний ключ конденсаторного блока вмикаються.

Оскільки струм конденсатора перебуває в протилежному напрямку до навантаження / несправності струму, досягається нульова точка перетину постійного струму. Тому навантаження / несправності можуть бути розірвані з високою надійністю та безпечністю. Під час звичайного розриву не відбувається дуга через застосування вакуумного вимикача VCB.

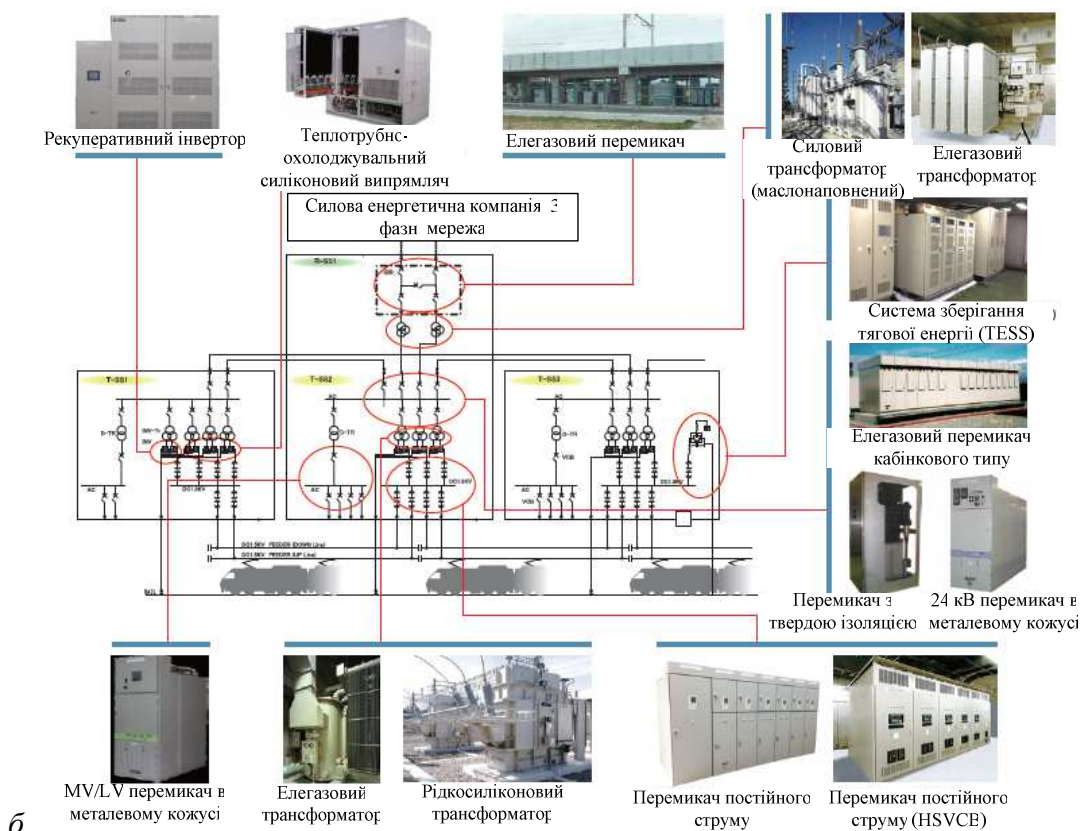
Двома енергоефективними системами для постійного струму є регенеративні (рекуперативні) інвертори та накопичувачі (рис. 10). Регенеративний інвертор – це енергозберігаюче рішення для ефективного використання енергії рекуперативного гальмування від рухомого складу. Він перетворює рекуперований постійний струм назад до джерела змінного струму та постачає його до допоміжної системи для пасажирських станцій. Система накопичення тягової енергії є енергозберігаючим рішенням, що дає змогу не тільки зберігати рекуперовану енергію, а й сприяє згладжуванню пікових енергій споживання, компенсації напруги джерела, а також служить для аварійного живлення.

Перспективним у ролі накопичувачів є використання акумуляторів на основі оксиду титанату літію, до переваг яких відносять безпеку та довготривалість роботи, швидке зарядження, високу вихідну потужність.

Що стосується **автоматизації електропостачання**, перспективним є застосування систем диспетчерського управління та збору даних (Supervisory control and data acquisition - SCADA), що дає змогу здійснювати стабільні, високонадійні та водночас зручні поїзні операції. Наприклад, при виникненні несправності у розподільній мережі одночасно декілька сигналів несправності будуть відправлені з підстанцій до SCADA-серверу в центрі керування. Оператор може бути заплутаний багатьма несправностями та сигналами. SCADA-система збирає пов'язану інформацію та відображає спочатку те, що насправді сталося, активуючи контроль відновлення та показуючи процедуру відновлення оператору.



а



б

Рис. 7. Тягові системи змінного (а) та постійного (б) струму Toshiba [12]



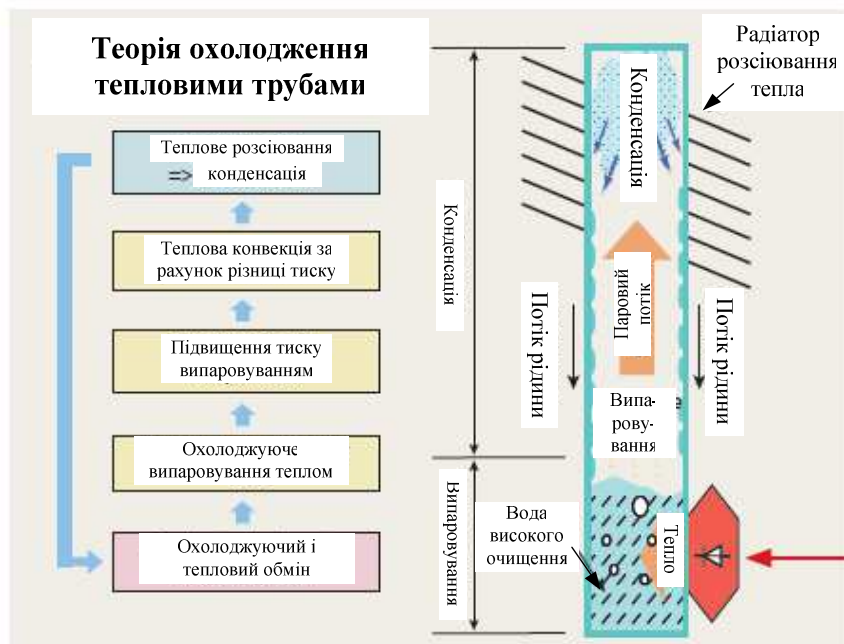


Рис. 8. Принцип вертикальної теплової труби самоохолодження

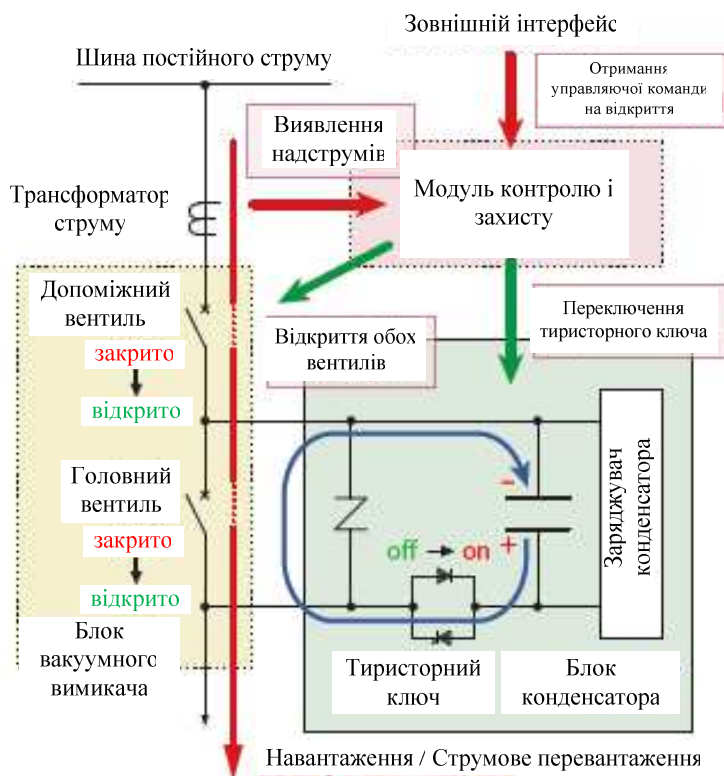


Рис. 9. Принцип вимикання постійного струму за допомогою HSCB

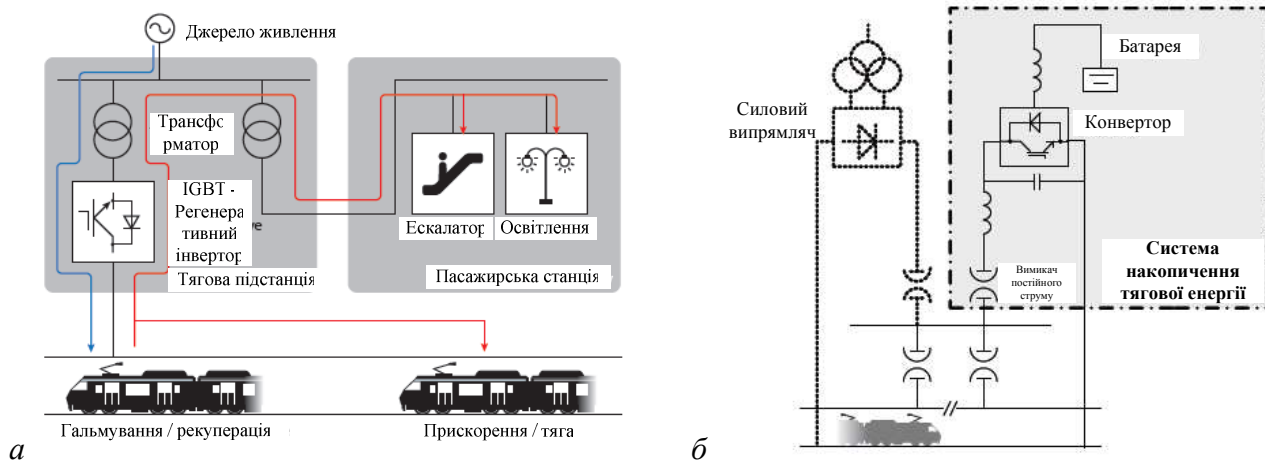


Рис. 10. Принципи рекуперації (а) та накопичення енергії (б) [12]

**Визначення раціональної стратегії модернізації системи тягового електропостачання.** Підтримання конкурентоспроможності залізничного транспорту потребує поліпшення технічних та економічних характеристик системи тягового електропостачання шляхом її модернізації. При всьому цьому на рівень та глибину рішень суттєво впливає необхідність узгодження співвідношення капітальних та експлуатаційних витрат з прибутками від експлуатаційної діяльності. Зрозуміло, що ця задача багатокритеріальна і належить до задачі вибору найкращого проектного рішення з множини можливих рішень. Вибір найкращого проектного рішення пропонується проводити шляхом визначення функції корисності кожної альтернативи  $F_i$ :

$$F_i = \sum_{j=1}^k U_{ij} \cdot W_j, \quad j=1K n ,$$

де  $n$  – кількість альтернатив;  $k$  – кількість критеріїв;  $U_{ij}$  – оцінка  $i$ -ї альтернативи за  $j$ -м критерієм;  $W_j$  – вага  $j$ -го критерію, так як кожен критерій може мати різний ступінь важливості. Приймається, що вага критерію оцінюється за шкалою від 0 до 1, а оцінка альтернативи – за конкретним критерієм від 0 до 10.

Принцип виставлення ваги, балів та розрахунку корисності кожної альтернативи для прийняття оптимального рішення про пріоритетність впровадження елементів системи електропостачання проілюстровано на рис. 11.



Рис. 11. Результати розрахунку пріоритетності впровадження елементів системи електропостачання

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Підвищення безпеки, надійності та енергоефективності залізничного транспорту неможливе без упровадження технологічних інновацій та передових технологій у системах тягового електропостачання. Установлено, що на теперішній час у світі такі технології досягли значного прогресу. Це обумовлено в першу чергу розвитком підходів до виробництва пристроїв та обладнання, а також матеріалів, з яких вони виготовляються. Найбільш передовими є

концепції не поетапної заміни (модернізації) окремих видів обладнання, а розроблення і впровадження блочних комплектних вузлів, які не потребують обслуговування та взаємоузгоджені між собою. В Україні також потрібне переосмислення напрямків розвитку та прискорення темпів упровадження технологій електропостачання. Це забезпечить суттєве зменшення витрат на доставлення - розподілення електроенергії та економію трудовитрат на обслуговування і ремонт обладнання розподільних пристроїв.

### *Список використаних джерел*

1. Басов, Г. Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу [Текст] / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. – Харків: Апекс+, 2005. – Ч. 2. – 248 с.
2. Матусевич, О. О. Дослідження експлуатації силового обладнання системи тягового електропостачання залізниць [Текст] / О. О. Матусевич, Д. В. Міронов // Вісник ДНУЗТ. – 2015. – № 1(55). – С. 62-77.
3. Рекомендации по экономии электроэнергии в устройствах энергоснабжения электрифицированных железных дорог [Текст]: Р 612/7 ОСЖД. – Варшава, 2010. - 10 с.
4. Марикин, А. Н. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций [Текст] / А. Н. Марикин, А. В. Мизинцев. – М.: ГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2008. – 220 с.
5. Комплектное блочно-модульное оборудование тягового электроснабжения [Текст] / ДАК-энергетика. – Днепропетровск. – 28 с.
6. Switching in electrical transmission and distribution systems [Текст] / R. Smeets, L. Sluis, M. Kapetanovic, D. Peelo, A. Janssen. – John Wiley and Sons, Ltd., 2015. – P. 243-260.
7. 3AN47 vacuum circuit-breakers for traction applications. Catalog HG 11/52-2010 [Текст] / Siemens AG. – 36 p. – Точка доступу: [www.siemens.com/energy](http://www.siemens.com/energy).
8. Быстродействующие автоматические выключатели постоянного тока для стационарных установок. Тип UR [Электронный ресурс] / Secheron. – 2016. – 16 с. – Режим доступа: [www.secheron.com](http://www.secheron.com).
9. Gerapid. Быстродействующий автоматический выключатель постоянного тока. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / General electric power controls, 2011. – 57 с. – Режим доступа: [www.geindustrial.com](http://www.geindustrial.com).
10. Запорожтрансформатор. Номенклатурный каталог [Электронный ресурс] / ПАО «Запорожтрансформатор». – 36 с. – Режим доступа: [www.ztr.ua](http://www.ztr.ua).
11. Тяговые подстанции метрополитена [Электронный ресурс] / ЧАО «Плутон». – Запорожье. – 81 с. – Режим доступа: [www.pluton.ua](http://www.pluton.ua).
12. Railway power supply systems [Электронный ресурс] / Toshiba. – Japan, 2014. – Режим доступа: <http://toshiba-railway.com>.

---

Яцько Сергій Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75.  
E-mail: [ua.yatsko@gmail.com](mailto:ua.yatsko@gmail.com).

---

Карпенко Надія Петрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-96. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Ващенко Ярослав Васильович, канд. техн. наук, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (050) 728-21-92. E-mail: yaroslav.vashchenko@gmail.com.

Панченко Владислав Вадимович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (066) 187-89-61. E-mail: vlad\_panchenko@ukr.net.

Yatsko Sergey Ivanovich, cand. tech sciences, Associate Professor Department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (057) 730-10-75. E-mail: ua.yatsko@gmail.com.

Karpenko Nadia Petrivna, cand. tech. sciences, associate professor department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (057) 730-19-96. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Vashchenko Yaroslav Vasilievich, cand. tech sciences, Assistant Department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (050) 728-21-92. E-mail: yaroslav.vashchenko@gmail.com.

Panchenko Vladislav Vadimovich, cand. tech sciences, Senior Lecturer Department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics Ukrainian State University of Railway Transport. Phone: (066) 187-89-61. E-mail: vlad\_panchenko@ukr.net.

Стаття прийнята 19.10.2017 р.