

УДК 629.423

*С. В. Каращук*  
*(аспірант кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного економіко-технологічного університету транспорту, м. Київ)*

## АНАЛІЗ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

*У статті виконано аналіз існуючих систем тягового електроприводу, визначено їх основні переваги та недоліки, розглянуто досвід використання різних типів електроприводів країнами світу.*

*Ключові слова:* електропривід, електровоз, електропоїзд, тяговий двигун.

*В статті виконано аналіз існуючих систем тягового електроприводу, визначено їх основні переваги та недоліки, розглянуто досвід використання різних типів електроприводів країнами світу.*

*Ключевые слова:* электропривод, электровоз, электропоезд, тяговый двигатель.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день існує велика кількість систем та засобів для регулювання тягового привода рухомого складу. Проте перед впровадженням тієї чи іншої системи слід проаналізувати, які характеристики вплинуть на роботу локомотива, його пристосованість до існуючих засобів технічного обслуговування, наявність достатньо кваліфікованого персоналу для роботи з обладнанням, економічна обґрунтованість впровадження системи на тяговий рухомий склад тощо.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** В публікаціях [1-3] проаналізовано режими роботи електрорухомого складу (ЕРС) та обґрунтовано необхідність підвищення його коефіцієнта корисної дії, проаналізовано вплив джерела живлення моделі тягового електропривода з широтно-імпульсним регулюванням напруги на якість його вихідних характеристик, розглянуті та обґрунтовані системи захисту напівпровідникових ключів від негативних наслідків комутації.

**Мета статті** – проаналізувати існуючі системи тягового електропривода. Визначити їх переваги та недоліки. Визначити економічну доцільність впровадження нових систем регулювання, проаналізувавши досвід їх експлуатації країнами світу, з'ясувати чи доцільне застосування подібних на тяговому рухомому складі залізниць України.

### **Виклад основного матеріалу**

На перших етапах розвитку залізниць, локомотиви приводились у рух завдяки паровій тязі, відтоді розвиток науки та техніки настільки пройшов уперед, що існує велика кількість засобів для створення сили тяги [4]

Для ЕРС принцип створення сили тяги полягає у взаємодії магнітних полів. Серед них можна виділити роторні машини, та лінійні двигуни. Застосування лінійних двигунів, які реалізують силу тяги не внаслідок сил зчеплення колеса з рейкою, а шляхом взаємодії активних частин машини, укладених на рухомому складі й колії, є дуже проблематичним, принаймні в найближчому майбутньому, тому що потребує створення повністю автономних спеціальних магістралей зі своєю інфраструктурою, з колосальними капітальними витратами на їх створення, оснащення і експлуатацію [5].

© *Каращук С. В., 2016*

Отже, в подальшому актуально буде розглядати лише роторні електричні машини. Розподіл типів тягових передач залежно від джерела енергії тягового рухомого складу (ТРС) зображено на рис. 1.

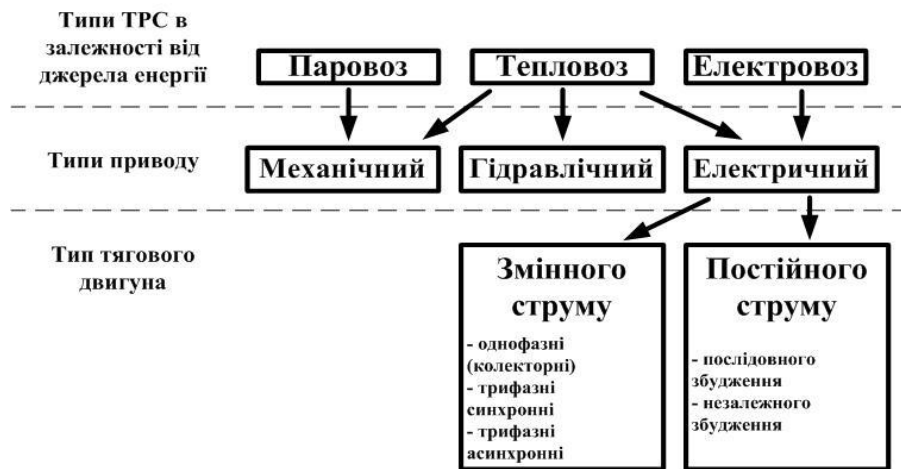


Рис. 1. Типи засобів створення сили тяги залежно від типу джерела енергії ТРС

Для кожного типу електричної машини характерні свої особливості експлуатації та систем регулювання. Відомо, що для машин постійного струму управління здійснюється шляхом зміни напруги, підведеної до тягового електродвигуна (ТЕД) та регулюванням величини магнітного потоку машини, для машин змінного струму – управління зміною амплітуди та частоти підведеної напруги. На рис. 2 зображено класифікацію ЕРС залежно від типу перетворювача та ТЕД.

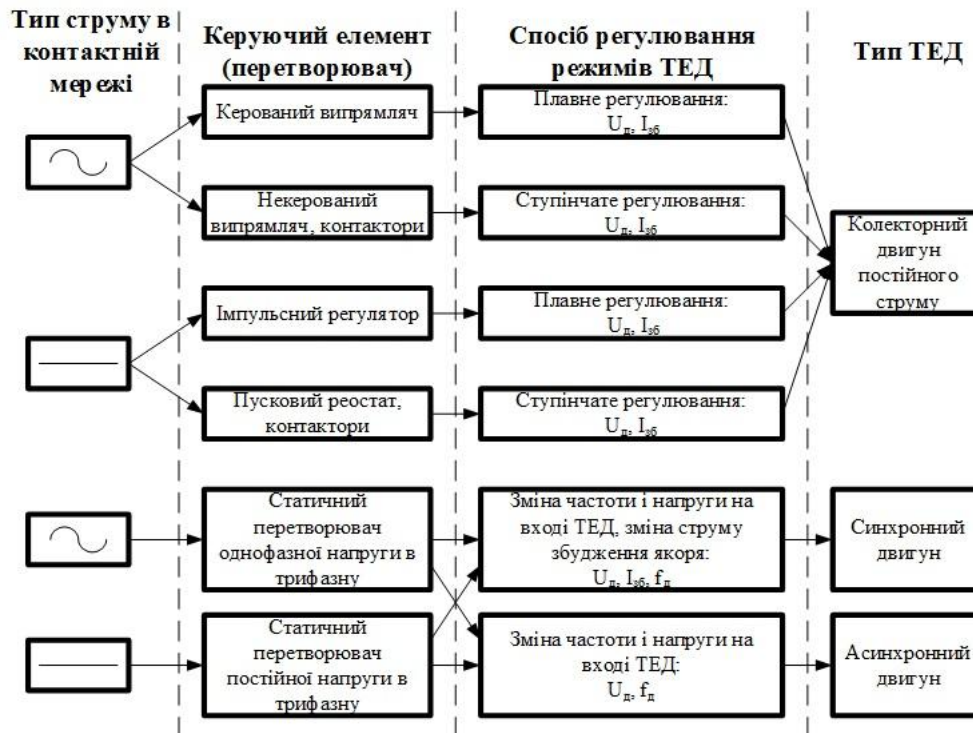


Рис. 2. Класифікація ЕРС залежно від типу перетворювача та ТЕД

Застосування громіздких контакторних (з індивідуальним чи груповим приводом) засобів регулювання тяговими двигунами не є ефективним. Такі пристрої потребують значних витрат на обслуговування і ремонт, адже мають низьку надійність та значну ресурсоемність ремонту.

Сучасний темп розвитку напівпровідникової та мікропроцесорної техніки, а також нові системи автоматизації та комп'ютерного управління дозволяють здійснювати один з найефективніших методів управління – імпульсне регулювання.

Очевидними перевагами імпульсного регулювання є повна або часткова відмова від контакторного методу регулювання. З'являється можливість застосування більш економічних типів тягових двигунів, підвищення надійності та зниження собівартості експлуатації локомотива.

Застосування імпульсного регулювання дозволить покращити плавність регулювання сили тяги, зменшити масу та габарити обладнання, підвищити надійність, що в свою чергу збільшить міжремонтні пробіги, а також забезпечить максимальне використання зчіпної ваги локомотива.

Процес переходу від контакторного (ступеневого) методу управління тяговим електроприводом до імпульсного (безступеневого) продовжується і дотепер. Адже кожен з існуючих методів управління двигуном локомотива має як переваги, так і недоліки. Згідно з класифікацією виділено п'ять поколінь систем регулювання ЕРС. Перше та друге покоління характеризуються застосуванням статичних перетворювачів з некерованими ртутними (перше покоління) та кремнієвими (друге покоління) випрямлячами. Системи регулювання з такими типами перетворювачів мають досить низький ККД, значну масу та великі габарити обладнання, що необхідно розмістити в електровозі. Тому продовжилась дослідницька робота науковців світу з покращення параметрів перетворювачів.

З розробкою керованого випрямляча (тиристора) розпочалась історія імпульсного регулювання тяговим електроприводом ЕРС. Дослідження проводились у двох напрямках: імпульсне регулювання напруги на ТЕД постійного струму та у напрямі розробки електровозів з трифазними тяговими двигунами змінного струму.

### **Трифазний тяговий двигун змінного струму в тяговому електроприводі електрорухомого складу**

Роботи по створенню електровозів з асинхронними тяговими двигунами (АТД) були розвернуті у 1963 р. Після випробувань було створене та встановлене необхідне обладнання на перший експериментальний локомотив з асинхронними тяговими двигунами Ве4/4 12001. На електровозі проводились дослідження роботи електропривода, впливу роботи статичного перетворювача на мережу живлення та роботи по оптимізації конструкції обладнання. Було визначено низку недоліків такого приводу, та визначені основні напрями удосконалення [6].

У 1980 р. був побудований перший серійний локомотив з АТД. Це був універсальний чотиривісний електровоз змінного струму серії Е-120 потужністю 5600кВт і максимальною швидкістю 200км/год. Вже у 1987 р. почався серійний випуск електровозів, що склав 60 одиниць для Державної залізниці Німеччини.

Після цього для Державної залізниці Данії (DSB) була побудована партія електровозів подібного типу серії ЕА3000, а також декілька високошвидкісних електропоїздів ICE1, кінцеві вагони яких фактично являли собою окремі електровози з тяговим електроприводом електровоза серії 120.

Перші тягові перетворювачі були створені на основі одноопераційних тиристорів. Такі системи обов'язково обладнувалися схемами примусової комутації силових ключів та масивними фільтрами сторонніх гармонік струму, що зменшувало ККД та погіршувало масо-габаритні показники локомотивів.

У 1980-х рр. у Японії був винайдений двоопераційний тиристор GTO, що значно спростило конструкцію перетворювачів. Було створено низку перетворювачів та багато серій ЕРС різних систем живлення, силові системи управління тяговим електроприводом яких базувалися на двоопераційних тиристорах GTO.

Проте перетворювачі, в основі конструкцій яких були тиристори GTO, мали певні недоліки. Паралельно силовим виводам GTO тиристора обов'язково необхідно підключати демфуючі (снаберні) схеми захисту напівпровідникового приладу від перенапруги. При цьому в снабері втрачається частина потужності, яка залежить від навантаження тягового перетворювача. Це однозначно вимагало підвищення вимог до демфуючих схем, застосування підвищеного класу точності безіндуктивних ланцюгів, що в свою чергу збільшувало вартість тягового електроприводу. Також втрати в снаберних колах знижували ККД приводу.

Технічним рішенням щодо підвищення ефективності силових напівпровідникових приладів, яке б дозволило об'єднати позитивні якості як біполярних транзисторів, так і польових транзисторів було створення монолітної структури названих IGBT, тобто біполярних транзисторів з ізолюваним затвором.

В 1983 р. вперше було запатентовано технологію IGBT, які з 1990-х рр. успішно застосовувались в різних галузях господарства.

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором IGBT не мають недоліків GTO. Вони представлені приладами, що управляються електричним полем між затвором та емітером і тому для його керування не потрібно великої кількості енергії. Для управління ним не потрібен великий струм, який заряджає та розряджає затвор приладу.

Створення новітніх IGBT електронних пристроїв призвело до створення нового покоління сучасного парку вантажних та пасажирських електровозів, швидкісних електропоїздів та рухомого складу метрополітену з трифазними тяговими двигунами, а також модернізації існуючого ЕРС з іншими системами регулювання тяговим електроприводом.

Основою системи регулювання ЕРС з асинхронним тяговим двигуном (АТД) (рис. 3) є тяговий перетворювач. Тягові перетворювачі ЕРС можуть мати різну структуру. При виборі структури перетворювача треба виходити з конкретних умов роботи тягового електроприводу і забезпечити необхідний техніко-економічний рівень.

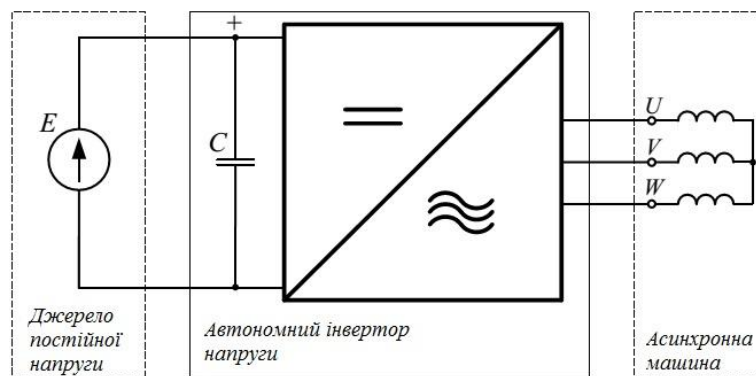


Рис. 3. Принципова схема ЕРС з АТД

Для управління АТД існує три основні принципи регулювання:

- регулювання за абсолютною частотою ковзання;
- регулювання кута моменту (векторне управління);
- пряме керування моментом.

Основою методу регулювання за абсолютною частотою ковзання є залежності струму статора та обертального моменту залежно від частоти ковзання. Основною перевагою методу є відносна простота системи управління, а основними недоліками такого принципу є:

- використання параметричної залежності струму статора та моменту від частоти ковзання, що можуть відрізнятися у різних двигунів однієї серії;
- необхідність корегування частоти ковзання залежно від температури обмотки ротора;
- неможливість безпосереднього вимірювання температури обмотки короткозамкненого ротора.

Регулювання по куту моменту (векторне регулювання) дає більш точніші результати ніж по абсолютному ковзанню, оскільки кут моменту не залежить від зміни температури обмотки ротора. Проте недоліком є наявність великої кількості датчиків та складність системи управління, що в свою чергу значно підвищує вартість як системи управління, так і системи діагностики, та може призвести до зниження надійності локомотива в цілому.

Система прямого керування моментом використовує лише датчики струму та напруги, що значно спрощує систему управління та систему діагностики. Система управління побудована без використання датчиків швидкості, що спрощує також і монтаж системи управління. Пряме управління електромагнітним моментом АТД здійснюється комутацією ключів інвертора з таким розрахунком, щоб перехід від одного можливого положення вектора напруги статора до іншого забезпечував необхідні значення потокозчеплення статора і кута між векторами потокозчеплення і струмом ротора. Це потребує спеціалізованих систем та алгоритмів керування і впливає на складність, а отже і вартість системи управління та діагностики. Задовільну якість перехідних процесів буде забезпечено, якщо похибка оцінок опорів обмоток статора і ротора не перевищить 5%. Тому в системі повинні бути передбачені алгоритми адаптації до нагрівання обмоток двигуна.

За структурою силової схеми можна виділити декілька типів. Проте в основному на залізничному транспорті в тяговому електроприводі використовують лише автономні інвертори напруги для живлення АТД. Умовно їх можна поділити на:

- ЕРС з груповим живленням АТД, коли від одного інвертора напруги живляться декілька тягових асинхронних двигунів;
- ЕРС з індивідуальним живленням АТД, коли для кожного асинхронного двигуна встановлено окремий інвертор напруги.

До ЕРС з груповим живленням АТД належать пасажирські електропоїзди та електровози (електровози ДСЗ, ЕП10, електропоїзди НRCS2, ЕКр1, ІСЕ тощо). При груповому живленні АТД зменшується кількість статичних перетворювачів напруги, яку необхідно встановити на електровози, та зменшується складність системи управління, що впливає на початкову вартість локомотива. Проте це знижує зчіпні властивості локомотива, адже відсутня можливість повісного регулювання сили тяги, також можливий несиметричний перерозподіл навантаження на АТД при незначних відхиленнях в їхніх параметрах.

Ці недоліки відсутні у електрорухомому складі з індивідуальним живленням АТД. При цьому кожен тяговий двигун має свій інвертор напруги. Отримавши завдання на створення сили тяги, такий локомотив здатний самостійно виявити найнедовантаженішу колісну пару, та збільшити (або зменшити при наявності буксування) підведену до неї потужність. Така система зазвичай встановлюється на вантажних локомотивах, коли важливо отримати максимально допустимі сили тяги.

Зважаючи на вищезазначене, можна зробити висновок про ефективність електрорухомого складу з АТД, проте впровадження таких технологій передбачає значні витра-

ти на розвиток інфраструктури, особливо з регулювання та управління витратами електричної енергії на тягу поїздів, необхідності залученні при обслуговуванні більш кваліфікованого персоналу і новітніх засобів діагностики та ремонту, відкриття нових дільниць та цехів в депо та пунктах технічного обслуговування, що також передбачає значні витрати. Якщо взяти до уваги критерій енергоефективності, то порівняємо коефіцієнти корисної дії електровозів постійного струму з реостатно-контакторною системою управління і колекторним ТЕД та з АТД. Електровоз ВЛ11м з ККД тривалого режиму без врахування допоміжних машин складає не менше 90%, аналогічний показник для електровоза постійного струму з асинхронним тяговим електроприводом 2ЭС10 складає не менше 87,5%. З цього випливає необхідність у пошуку іншого методу підвищення енергоефективності електрорухомого складу постійного струму.

### **ЕРС з імпульсним регулюванням напруги ТЕД постійного струму**

Імпульсні системи управління тяговим приводом, називаються такі в яких використовується один або декілька імпульсних перетворювачів для регулювання параметрів засобами дискретної (переривчастої) зміни іншого параметра.

В основі принципу роботи імпульсного перетворювача енергії лежить ключовий режим роботи напівпровідникового пристрою, який здійснює періодичне підключення напруги живлення до вхідної схеми перетворювача.

При імпульсному регулюванні напруги на ТЕД економиться частина електричної енергії, яка на існуючому ЕРС постійного струму безповоротно витрачається в пускових резисторах. Це особливо стосується рухомого складу міського та приміського сполучення, який має часті зупинки [8].

Заміна контакторної системи управління на безконтактні імпульсні системи управління дозволяють отримати такі переваги, а саме:

- застосування безреостатного пуску і рекуперативного гальмування у всьому діапазоні робочих швидкостей рухомого складу, що працює з частою зміною режиму руху, під час розгону дозволяє знизити витрату електроенергії на 25-40%;
- безступінчасте регулювання струму в тягових електродвигунах забезпечує плавність пуску і гальмування рухомого складу;
- заміна контактної апаратури більш надійними в експлуатації безконтактними елементами дозволяє знизити витрати на поточне обслуговування електрообладнання;
- зменшення струмів тягової мережі при пусках і повернення електроенергії в мережу при рекуперативному гальмуванні зменшують падіння напруги в тяговій мережі і, отже, підвищують середній рівень напруги в ній, що дозволяє додатково збільшити швидкість рухомого складу;
- дозволить створити більш сучасніші системи автоматичного регулювання процесів тяги та гальмування;
- створення безреостатних систем тяги з граничними силами тяги по умовах зчеплення;
- через відсутність неефективного реостатного регулювання, з'являється можливість застосування ТЕД з високими швидкісними характеристиками, що сприятиме підвищенню швидкості руху ТРС.

Перші дослідження та експериментальні впровадження імпульсного регулювання напруги на ТЕД постійного струму було проведено в багатьох країнах (Німеччина, Японія, Англія, США та ін.) після створення перших силових тиристорів. Так в 1963-1965 рр. у Німеччині було створено дослідні зразки деяких промислових електровозів невеликої потужності та акумуляторний електровагон [8].

В 1965-1970 рр. вперше були дослідженні тиристорно-імпульсні системи управління тяговим електроприводом на залізницях СРСР. Вони були випробувані на електропоїздах постійного струму СРЗА6М, ЭР2 та ЭР22. Переобладнані електропоїзди досить тривалий період часу експлуатувалися на Прибалтійській залізниці. Одночасно

проводились дослідження можливості впровадження тиристорно-імпульсної системи управління на метрополітені. Вони виконувалися двома науковими групами спеціалістів МПТА під керівництвом професора В.С. Хвостова і доцента А.І. Хоменко. В 1966 р. на Тбіліському електровозобудівному заводі за участі наукової групи МЕІ під керівництвом професора В.Е. Розенфельда був побудований експериментальний електровоз постійного струму з частотно-імпульсними перетворювачами [9].

На електропоїзди ЕР2 для плавного підвищення напруги ТЕД була прийнята широтно-частотна система, при якій спочатку ( протягом 1 сек.) проводився частотний пуск, при якому частота змінювалась від 150 до 400 Гц, а потім при досягненні напруги біля 600 В стабілізувалась на рівні 400 Гц. В подальшому напруга підвищувалась широтно-імпульсним методом і при досягненні 92% напруги контактної мережі, коли попарно послідовно увімкнені ТЕД, практично повністю знаходились під напругою контактної мережі – перетворювач закорочувався [10].

У вересні 1965 р. у Японії були проведені дослідження щодо застосування імпульсного регулювання на електропоїзді постійного струму. На дослідному вагоні з напругою живлення 600 В, було встановлено тиристорний імпульсний перетворювач для безреостатного пуску і реостатного гальмування. Перетворювач мав потужність 110 кВт і регулював напругу на двох двигунах потужністю 55 кВт одного візка з струмами тяги та гальмування 200 А. Також було створено ряд декількох дослідних зразків моторних вагонів з імпульсною модуляцією регулюючого сигналу з змінною частотою в діапазоні 30-80 Гц.

Проте така низька частота комутації призводила до неможливості згладжування пульсацій струмів та напруги мережі живлення вхідними індуктивно-ємнісними фільтрами. Тому в результаті досліджень була створена дослідна серія з двох моторних вагонів з чотирма двигунами потужністю 4x95кВт на кожному вагоні, які були постійно увімкнені послідовно. ТЕД були підключені до загальної системи живлення за допомогою паралельних переривачів через роздільний дросель. Робота всіх перетворювачів була синхронізована таким чином, що спожитий струм, від загального індуктивно-ємнісного фільтра мав в 4 рази більшу частоту ніж частота кожного окремого переривача. Частота переривача змінювалась від 45 до 200 Гц. Установка налічувала 52 тиристора та 44 діода. Досліджені в 1968-1969 рр. схемні рішення були прийняті за основу і впровадженні у розробці електропоїздів метрополітену Токіо «Гейто» з імпульсним регулюванням [8].

У 1964 р. спеціальне конструкторське бюро по електровозах Грузинської РСР, використало проведені Московським енергетичним інститутом дослідження, розробило технічний проект восьмивісного електровоза постійного струму, розрахованого на роботу під напругою як 3кВ так і 6кВ. Проектом передбачалося використання кузова, візків, тягових електродвигунів і допоміжних машин електровоза ВЛ8. При роботі електровоза від мережі 3кВ всі його тягові параметри збереглися, як у серійного локомотива; при напрузі 6кВ потужність ТЕД зменшилася до 312 кВт, а швидкість годинного режиму до 23 км/год. Перетворювальна установка була спроектована з 12-ма тиратронами та інверторним трансформатором; постійний струм високої напруги спочатку перетворювався в трифазний струм підвищеної частоти, який потім трансформувався в струм більш низької напруги, випрямлявся і надходив для живлення ТЕД. Спеціальні тиратрони розраховувалися на середній струм 85 А і напругу 15 кВ. Електровоз отримав індекс та став називатись ВЛ8<sup>н</sup>.

На іншій секції був змонтований імпульсний частотний статичний перетворювач постійного струму в постійний струм регульованої напруги. Цей перетворювач складався з шести фаз, у кожній з яких були реактори, конденсатори, тиристори й діоди. При цьому потужність тягових електродвигунів при напрузі в контактній мережі 6 кВ використовувалася повністю, а при напрузі 3 кВ – на 80%; максимальна напруга на

виході перетворювачів становила відповідно 3600 і 2400 В, тобто напруга на ТЕД – 1800 і 1200 В. Частота імпульсів тиристорів при регулюванні напруги змінювалася від 14 до 400 Гц, тобто частота пульсації струму секції від 84 до 2400 Гц.

Секція електровоза з тиристорним перетворювачем мала 120 тиристорів ВКДУ-150-6 (150 А, 6-й клас) і 156 діодів ВКД-200-7. Вага цієї секції близько 92 т, тобто перевищувала вагу секції серійного електровоза ВЛ8.

У 1969 р. секція тиратронів була переобладнана згідно з тиристорною, також згодом було встановлено обладнання для здійснення рекуперації.

У 1970 р. на електропоїзді ЕР2-830 було замінено реостатно-контакторну систему управління на імпульсні перетворювачі у двох моторних вагонах. У 1971 р. було замінено ще на двох тобто електропоїзд був повністю переобладнаний на імпульсний пуск. Електропоїзд в подальшому отримав індекс і отримав назву серії ЕР2и.

Досвід експлуатації електропоїздів з імпульсним регулюванням напруги було використано при конструюванні нової серії електропоїздів з імпульсним регулюванням напруги. У вересні 1976 р. Ризький вагонобудівний завод випустив електропоїзд ЕР12-6001 з тиристорно-імпульсним перетворювачем.

На електропоїзді було встановлено двофазні тиристорно-імпульсні перетворювачі ТИП-1320/3У, в яких використовувався широтно-імпульсний метод регулювання напруги з постійною частотою 400 Гц. За допомогою перетворювача плавно регулювалася напруга на двох послідовно увімкнених ТЕД, в межах від 5 до 95% від напруги контактної мережі, а також плавне регулювання збудження двигунів від 100 до 50%. Плавна зміна напруги дозволила підвищити уставку пускового струму до 220 А (на електропоїздах ЕР2 уставка становила 190 А), тобто збільшилось прискорення. У 1978 р. були проведені тягово-енергетичні випробування електропоїзда, які, у порівнянні з електропоїздом ЕР2, на відстані розгону 1,5 км середнє прискорення з 0,57 м/с<sup>2</sup> (у електропоїзда ЕР2) підвищилось до 0,71 м/с<sup>2</sup>, витрата електроенергії зменшилась на 8,5-10% [11].

Проте в подальшому серійного випуску електропоїзда не відбувалось. Завод виробник відмовився від електропоїздів з дорогим устаткуванням, що також не мали достатню надійність статичних перетворювачів. Ремонт електропоїздів був дуже затратним. Тому більшість електропоїздів була переобладнана на систему серійних одиниць електропоїздів ЕР2 з пусковими резисторами та реостатними контролерами.

Впровадження тиристорних схем в тяговому електроприводі призвело до необхідності вимірювання впливу роботи таких перетворювачів на роботу силового устаткування, лінії зв'язку та систем СЦБ. Тому були проведені дослідження впливу роботи тиристорних перетворювачів, та створені спеціальні засоби вимірювання.

Тиристорно-імпульсна система управління тяговим електроприводом застосовувалася на рухомому складі міського транспорту. Так серед дослідних зразків імпульсна система застосовувалася на вагонах трамваю КТМ-5М, 71-608 і 71-619Т, а також малосерійних РВ3-7, ЛВС-86Т, ЛВС-86М, 71-605М [7]. Досить широкого поширення в СРСР з 1987 р. отримали імпортовані чеські трамваї ТАТРА-Т6В5. На їх основі Дніпропетровським підприємством «Южмаш» і Свердловським «Уралмаш» були згодом створені свої моделі трамваїв з імпульсною системою. В Білорусі імпульсна система управління тяговим приводом використовується у вагонах АКСМ-1М, АКСМ-60102 і АКСМ-743. З кінця 1980-х рр. завод імені Урицького у м. Ангельс Саратовської області налагодив серійний випуск членованих тролейбусів ЗиУ-683 (ЗиУ-10) (пізніше – ЗиУ-6205) на базі регулятора РТ-300 / 700Б2М. У Санкт-Петербурзі в 1996 р. одна машина ЗиУ-682В00 № 1639 при капітальному ремонті була обладнана тиристорно-імпульсною системою регулювання МЕРА-2.

Технології імпульсного регулювання напруги на ТЕД постійного струму застосовувались на електропоїзді «Яуза», побудованого ЗАО «Метровагонмаш» у 1998 р. Поїзд

отримав номер моделі 81-720/81-721. Розробником і постачальником перетворювачів для вагонів був завод «Динамо». Усього до 2000 р. було побудовано 56 вагонів метрополітену (8 семивагонних поїздів). Проте проведені тягово-енергетичні випробування довели, що у електропоїзда у порівнянні з серійним електропоїздом 81-717/81-714 з реостатно-контакторною системою управління витрата електроенергії на тягу збільшилася на 7,5%, а гальмівні шляхи збільшились з швидкості 40-90 км/год на 8-15%. Також було зафіксовано вплив імпульсної системи регулювання на роботу приладів регулювання і безпеки руху (АРС, СЦБ, радіозв'язок та ін.). Тому в подальшому у компанії «Alstom» було закуплено 40 комплектів асинхронного приводу, якими були обладнані вагони типу «Русич».

В основу розглянутих тягових електроприводів лежать статичні перетворювачі з напівпровідниковими переривачами на одноопераційних тиристорах, найпростіша принципова схема кола комутації якого зображена на рис. 4.

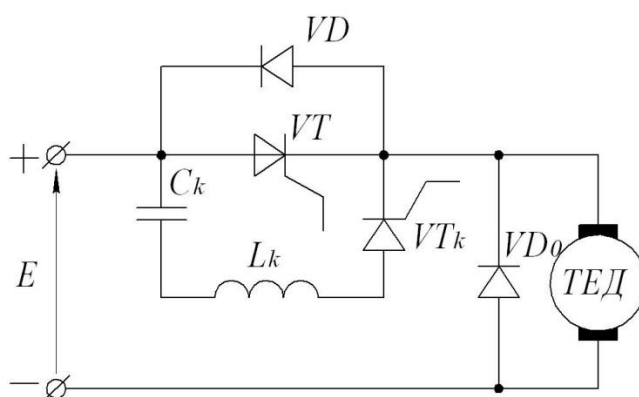


Рис. 4. Принципова схема імпульсного перетворювача з пристроями комутації одноопераційного тиристора

Як видно з принципової схеми, для комутації тиристора  $VT$  необхідно застосовувати допоміжні комутуючі пристрої (додатковий тиристор  $VT_k$ , комутаційний конденсатор  $C_k$  та дросель  $L_k$ ) значної потужності, що призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії схеми перетворювача. Також реактивні елементи комутуючої апаратури мають значні габарити, що ускладнює її установку на рухомому складі. Схеми з подібними перетворювачами не можуть працювати з високою частотою комутації, що призведе до впливу системи регулювання засоби безпеки руху (СЦБ та радіозв'язку), якщо не застосовувати згладжувальні фільтри, а це також призведе до підвищення вартості обладнання та зниження коефіцієнта корисної дії.

Позбутися цих недоліків можна застосовуючи двоопераційні напівпровідникові прилади (GTO-тиристори та IGBT-транзистори). Це дозволить зменшити вплив процесів комутації на роботу інших пристроїв залізниці та підвищити ефективність роботи електропривода.

Подальші дослідження імпульсних систем тягового електропривода привела до появи розробок, основні з яких проводились у напрямках:

- дослідження у підвищенні енергетичних та масо-габаритних показників, шляхом зменшення числа напівпровідникових елементів та встановленні нових зв'язків;
- підвищення надійності електропривода за рахунок обмеження перенапруги на силовому ключі і покращення форми вихідної напруги LC-фільтра;
- підвищення точності регулювання, шляхом вилучення статистичної помилки, яка викликана останнім значенням опору елементів в колі зворотного зв'язку, та шля-

хом виключення похибки обробки кутів керування тиристорним перетворювачем, а також забезпечування спрощення його за рахунок скорочення кількості складних елементів;

- підвищення надійності та розширення діапазону можливостей регулювання;
- підвищення ефективності імпульсного електропривода постійного струму за рахунок оптимізації електродинамічного гальмування;
- дослідження моделі електропривода з імпульсним регулюванням та системи регулювання в просторі пакета Simulink програми MATLAB.

**Висновки та пропозиції.** Сучасні темпи підвищення вартості енергоносіїв змушує наукове співтовариство все більш ретельніше досліджувати проблему енергоефективності. Тому подальше дослідження засобів для зменшення енергоємності устаткування залізничного транспорту є актуальним питанням.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Карацук С.В., Гаюр А.В. Системи захисту напівпровідникових пристроїв від негативних наслідків комутації // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 23.– К.: ДЕТУТ, 2013.– С. 87–91.
2. Черняк Ю.В., Гатченко В.О., Ревчук М.О., Карацук С.В., Малюк С.В. Вплив джерела живлення моделі тягового електропривода на якість його вихідних характеристик // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 24.– К.: ДЕТУТ, 2014.– С.140–144.
3. Черняк Ю.В., Гатченко В.О., Гаюр А.В., Карацук С.В. Оцінка енергетичної ефективності існуючої системи рекуперативного гальмування електропоїздів // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 26-27.– К.: ДЕТУТ, 2015.– С.83–91.
4. José A. Lozano, Jesús Félez, Juan de Dios Sanz and José M. Mera (2012). Railway Traction, Reliability and Safety in Railway, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), ISBN:978-953-51-0451-3, InTech, Available from: URL: [intechopen.com/books/reliability-and-safety-in-railway/railway-traction](http://intechopen.com/books/reliability-and-safety-in-railway/railway-traction). – Date of Access: 26 October 2016.
5. Безрудченко В.М. Варченко В.К. Чумак В.В. Тягові електричні машини електрорухомого складу. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
6. *Le moteur asynchrone en traction électrique* par Marcel desponds, article, Bulletin technique de la Suisse romande, 102(1976) № 12. Access Mode: URL [dx.doi.org/10.5169/seals-72934](http://dx.doi.org/10.5169/seals-72934). – Date of Access: 16 February 2016.
7. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов.– М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
8. Розенфельд, В. Е. Электropоезда постоянного тока с импульсными преобразователями / Под. ред. В. Е. Розенфельда. – М.: «Транспорт», 1976. – 280 с.
9. Мнацаканов, В.А. Форсажный тяговый привод [Virtual Resource] / В.А. Мнацаканов // Access Mode: URL: [tomakltd.com/files/ftp.pdf](http://tomakltd.com/files/ftp.pdf). – Date of Access: 26 October 2016.
10. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1966-1977 гг.). – М.: Транспорт, 1979. – 213 с.
11. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1976-1985 гг.). – М.: Транспорт, 1980. – 238 с.

**Sergiy Karashchuk**

*(Postgraduate Student at the Department of Traction railway rolling stock, State Economy and Technology University of Transport)*

### ANALYSIS OF ELECTROMOTIVE SYSTEMS FOR ELECTRIC LOCOMOTIVES

*In the article the analysis the existing systems of electric traction, identified their main advantages and disadvantages, discussed the experience of using different types of drives countries. Determined that the use of pulse regulation allows for the machine to an AC electromotive part and impulse control voltage to a DC motor.*

*Different methods of control induction motors of electric and generalized that the introduction of asynchronous traction drive on electric vehicles involves significant costs for infrastructure, the need for the application to maintain a qualified staff and expensive diagnostic tools and repair, opening new stations and shops in the depot and maintenance sites which also involves significant costs.*

*Analyzed different types of impulse control voltage DC motors, their advantages and disadvantages. The experience of application of DC motors with pulse control on the railways in the world. Prospects use this method to control the domestic rolling stock.*

*Comparison of the efficacy of pulsed regulation of DC motors with asynchronous motors, and the main areas for further research.*

**Keywords:** *Electric drive, electric locomotive, traction engine.*

## REFERENCES

1. Karashchuk S.V., Gajur A.V. *Sistemi zahistu napivprovodnikovih pristroiv vid negativnih naslidkiv komutaciy* [Protection systems for semiconductor devices from the negative effects of switching] // Zbirnik naukovih prac' derzhavnogo ekonomiko-tehnologichnogo universitetu transportu serija transportni sistemi i tehnologii. vipusk 23, [Collected Works of Public Economics and Technology University of Transport Series transportation systems and technologies. issue 23] Kiev-2013 – p. 87-91.
2. Chernyak Y.V., Gatchenko V.O., Revchuk M.O., Karaschuk S.V., Malyuk S.V. *Vpliv dzhherela zhivlennya modeli tyagovogo elektroprivodu na yakist yogo vihidnih harakteristik* [Effect of power supply for quality characteristic model traction electric drive] // Zbirnik naukovih prac' derzhavnogo ekonomiko-tehnologichnogo universitetu transportu serija transportni sistemi i tehnologii. vipusk 24 [Scientific Papers of State Technological University of Economics and Transport series transport systems and technologies. issue 24], Kiev-2014. – p. 140-144.
3. Chernyak Yu.V., Gatchenko V.O., Gayur A.V., Karaschuk S.V. *Otsinka energetichnoyi efektyvnosti isnuyuchoyi sistemi rekuperativnogo galmuvannya elektropoyizdiv* [Analysis of existing and perspective directions of energy storage in transport order to increase its energy efficiency] // Zbirnik naukovih prac' derzhavnogo ekonomiko-tehnologichnogo universitetu transportu serija transportni sistemi i tehnologii. vipusk 26-27 [Scientific Papers of State Technological University of Economics and Transport series transport systems and technologies. issue 26-27], Kiev-2015. – p. 83-91.
4. José A. Lozano, Jesús Félez, Juan de Dios Sanz and José M. Mera (2012). *Railway Traction, Reliability and Safety in Railway*, Dr. Xavier Perpinya (Ed.), ISBN: 978-953-51-0451-3, InTech, Available from: URL: [intechopen.com/books/reliability-and-safety-in-railway/railway-traction](http://intechopen.com/books/reliability-and-safety-in-railway/railway-traction). – Date of Access: 26 October 2016.
5. V.M. Bezrychenko, V.K. Vharchenko, V.V. Chumak / *Tyagovi electrichni mashynu electrorhythmogo skladu*. Vud. Dniepropetr. nac. Univ. zaliz. transp. im. acad. V. Lazaryana, 2003. – 252 p.
6. *Le moteur asynchrone en traction électrique par*. Marcel desponds, article, Bulletin technique de la Suisse romande, 102(1976) № 12. Access Mode: URL [dx.doi.org/10.5169/seals-72934](http://dx.doi.org/10.5169/seals-72934). – Date of Access: 16 February 2016.
7. Zabrodin Y.S. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial Electronics]. Moscow, High school Publ., 1982. – 496 p.
8. Rozenfeld, V. E. *Elektropoezda postoyannogo toka s impulsnyimi preobrazovatelyami* [Electric trains with direct current pulse converters]. Moscow, Transport Publ., 1976. – 280 p.
9. V.A. Mnatsakanov, *Forsazhnyiy tyagovyyi privod* [The afterburner traction drive], Access Mode: URL: [tomakltd.com/files/ftp.pdf](http://tomakltd.com/files/ftp.pdf). – Date of Access: 26 October 2016.
10. Rakov V.A. *Lokomotivyyi i motorvagonnyiy podvizhnoy sostav zheleznyih dorog Sovetskogo Soyuza (1966-1977)* [Locomotives and multiple unit of railways of the Soviet Union (1966-1977)], Moscow, Transport Publ., 1979. – 213 p.
11. Rakov V.A. *Lokomotivyyi i motorvagonnyiy podvizhnoy sostav zheleznyih dorog Sovetskogo Soyuza (1976-1985)* [Locomotives and multiple unit of railways of the Soviet Union (1976-1985)], Moscow, Transport Publ., 1980. – 238 p.