

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА. ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

УДК 621.314.2:629:423.1-523.1

МУХА А.М., к.т.н., доцент

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРИЧНИХ РЯДІВ СТРУКТУР СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЯГОВОГО ПРИВОДА БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Вступ. З метою підвищення конкурентоспроможності залізниць у порівнянні з іншими видами транспорту потрібно підвищувати прискорення і швидкості потягів, для чого необхідно підвищувати потужність електровозів з одночасним зменшенням його маси, оскільки більш потужне обладнання має більші масу та габарити, що призведе до збільшення впливу на колію.

Особливо гостро стоїть вирішення цієї суперечної задачі для електровозів подвійного живлення, оскільки вони мають у своєму складі обладнання як для постійного, так і змінного струмів. Такі електровози доцільно будувати для залізниць України з метою ліквідації втрат часу при заміні електровозів у місцях стикування контактних мереж постійного струму напругою 3 кВ з мережею змінного струму на 25 кВ, а також зменшення експлуатаційних витрат.

Крім того, підвищення потужності електровозів постійного струму обмежено напругою контактної мережі в 3 кВ. Загальновідомий той факт, що підвищення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6, 12 або 24 кВ дозволить підвищити пропускну спроможність та підвищити ефективність електричної тяги постійного струму [1].

Таким чином, є доцільним будувати багатосистемний електрорухомий склад (ЕРС). Під багатосистемним мається на увазі ЕРС, який зможе працювати як на постійному, так і змінному струмах при різних рівнях напруги у контактній мережі. Основою тягового привода таких електровозів є статичні перетворювачі, побудовані з використанням сучасної елементної бази.

Вихідними даними для аналізу властивостей статичних перетворювачів тягового привода перспективних багатосистемних електровозів приймаємо:

- 1) напруга у контактній мережі постійного струму 3 кВ та підвищена до рівня 6, 12 або 24 кВ;
- 2) напруга у контактній мережі змінного струму 25 кВ частотою 50 Гц;
- 3) кількість тягових двигунів 4 або 6, що відповідає односекційному електровозу;
- 4) тягові електродвигуни (ТЕД): трифазний асинхронний (АТД) або постійного (пульсуючого) струму послідовного збудження (ТД ПС).

Представлені вихідні дані зумовлюють можливість побудови перетворювачів за різними структурами, і визначення оптимальної із них є досить складною науково-практичною проблемою.

Така проблема досить успішно вирішується у інших галузях техніки за умови уніфікації складових частин перетворювачів [2].

Постановка задачі. Провести порівняння різних структур перетворювачів призначених для тягового привода багатосистемних електровозів, за умов мінімізації витрат на їх створення та експлуатацію, тобто використовуючи так звану цільову функцію C_N [2].

Результати роботи. При традиційних підходах у проектуванні, коли частота змінного струму приймається сталою і рівною 50 Гц, з підвищенням потужності підви-

щується маса локомотива. Маса тягового електропривода багатосистемних електровозів – це в основному маса тягових двигунів, трансформатора та напівпровідникових перетворювачів.

Сучасні тенденції у проектуванні локомотивів з переходом від колекторних машин постійного струму до асинхронних дозволяє зменшити масу тягових двигунів більше, ніж у два рази при однакових потужностях, що суттєво з урахуванням того, що, наприклад, маса тягового двигуна ЭД141У1 дорівнює 4,75 т. Суттєве зменшення маси тягового трансформатора можна досягнути за рахунок збільшення частоти струму.

Автором в роботах [3, 4] пропонується створювати статичні перетворювачі тягового привода з використанням трансформаторів підвищеної частоти та модульного принципу будови перетворювача. В залежності від структури перетворювача тягового привода багатосистемних електровозів пропонується наступна їх класифікація, яка враховує:

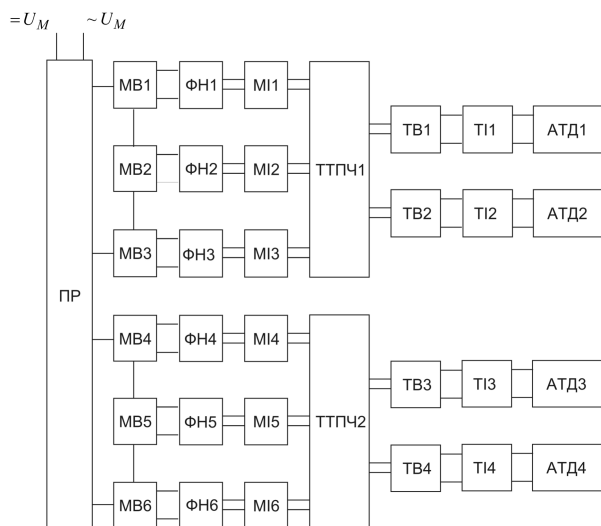
1) кількість та вид тягового двигуна: 4А – чотири асинхронних тягових двигуна (АТД); 6А – шість АТД; 4Т – чотири двигуна постійного струму (ТДПС); 6Т – шість ТДПС;

2) тип силового модуля: М1, М2, М3, М4, М5 або М6 (силовий модуль – складова частина тягового статичного перетворювача, яка за потужністю відповідає певній кількості тягових двигунів);

3) тип трансформатора підвищеної частоти: 1Ф – однофазний; 3Ф – трифазний;

4) схему з'єднання вхідних випрямлячів мережевого контура за формулою $m \times a$, де m – кількість паралельних груп послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів; a – кількість послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів.

Наприклад, тяговий статичний перетворювач для живлення чотирьох асинхронних тягових двигунів, побудований з силових модулів типу М2 (тобто два тягових двигуна на один силовий модуль) з використанням трифазних трансформаторів підвищеної частоти, в складі якого використовуються шість мережевих випрямлячів, буде класифіковано як 4А-М2-3Ф-2м3а (рис. 1).



ПР – перемикач режимів (25 кВ 50 Гц або 3 (6, 12 або 24) кВ постійного струму); МВ – випрямляч мережевого контуру; ФН – фільтр накопичувач; МІ – інвертор мережевого контуру; ТТПЧ – трифазний трансформатор підвищеної частоти; ТВ – випрямляч тягового контуру; ТІ – тяговий інвертор; АТД – асинхронний тяговий двигун

Рисунок 1 – Структура тягового перетворювача типу 4А-М2-3Ф-2м3а

Перетворювач, структурна схема якого представлена на рис.1 дозволяє реалізувати два основних напрямки покращення якості електричної енергії, що споживається.

- використання багатофазних перетворювачів, що працюють зі зсувом по фазі;
- використання при перетворенні електричної енергії підвищеної частоти.

Використання багатофазних систем з ланкою підвищеної частоти дозволяє зменшити масогабаритні показники фільтрів та трансформатора. Крім того, в подібних багатофазних системах є можливість керувати струмами та напругами, які перевищують максимально допустимі параметри одиночних силових елементів перетворювача.

Загалом автором проаналізовано 58 перетворювальних структур, які використовують ланки підвищеної частоти. Обрати оптимальну структуру за умов мінімізації витрат на її створення та експлуатацію є можливим використовуючи так звану цільову функцію C_N [4].

Нехай на множині X перетворювальних структур з різним класом вентилів задана функція попиту $\varphi(\lambda)$ на кожен тип $\lambda \in X$. Функція попиту чисельно дорівнює кількості пристроїв певного типу у загальному об'ємі пристроїв перетворювальних структур.

Попит у пристроях повинен бути задоволений з допомогою деякої сукупності параметричних рядів пристроїв. Ці пристрої мають наступні N значень головного параметра: $U_1, U_2, \dots, U_N$.

Позначимо параметричний ряд $U^N = (U_1, U_2, \dots, U_K, \dots, U_N)$, де N – кількість типів пристроїв у ряді, який досліджується; U_K – значення головного параметру K -го пристрою.

Значення U_K , $K = 1, 2, \dots, N$ обираємо з деякої множини можливих значень головного параметра. В якості головного параметра пропонується прийняти клас приладів, оскільки саме клас приладу визначає можливість роботи вентиля при тій або іншій напрузі на вході перетворювача.

Значення N , яке дорівнює п'яти (за кількістю можливих значень напруг контактної мережі), приймаємо в якості обмеження цільової функції C , яку розглядаємо як математичну модель оптимізації параметричних рядів пристроїв.

Цільова функція визначається в цілому за життєвий цикл заходу, який називається розрахунковим періодом. В якості початкового року розрахункового періоду приймаємо рік введення параметричного ряду в експлуатацію. Кінцевий рік розрахункового періоду визначається моментом завершення життєвого циклу заходу. Вираз для цільової функції запишемо наступним чином:

$$C(U^N) = \sum_{U \in U^N} 3^\circ(U) + \sum_{\lambda \in X} \varphi(\lambda) \min_{U \in U^N} 3(U, \lambda) (1 + E_H)^{t_p - t},$$

де $3^\circ(U)$ – постійні витрати на пристрій одного типу, які не залежать від їх кількості в експлуатації (витрати на розробку, підготовку виробництва). Тобто $3^\circ(U)$ – вартість виробництва одного екземпляра пристрою даного типу (капітальні витрати);

$\sum_{U \in U^N} 3^\circ(U)$ – вартість виробництва усіх типів пристроїв даного виду;

$3(U, \lambda)$ – витрати на задоволення потреб у пристрої з головним параметром λ з

допомогою пристрою з головним параметром U , який відноситься до параметричного ряду пристроїв. Тобто, $3(U, \lambda)$ – це поточні (експлуатаційні) витрати;

E_H – норматив приведення різночасових витрат до розрахункового року, $E_H = 0,1$;

t_p – порядковий номер розрахункового періоду;

t – порядковий номер t -го року експлуатації параметричного ряду пристроїв, починаючи від початкового розрахункового періоду. У нашому випадку розрахунковий і початковий роки збігаються. Тому $t_p = 1$. Відомо, що приведення витрат до початку розрахункового року здійснюється діленням витрат на коефіцієнт приведення, що у нашому випадку забезпечується від'ємним значенням різниці $(t_p - t)$, так як $t \geq t_p = 1$;

t_c – термін служби пристрою у роках (прийнято 10 років).

Задача оптимізації параметричного ряду полягає у мінімізації цільової функції за час розрахункового періоду. Цю задачу сформулюємо наступним чином: задано деяке число N_0 ; потрібно знайти члени ряду U_K , $K = 1, 2, \dots, N$ із умови:

$$U_N = \min U(U^N), \\ 0 < N \leq N_0$$

Враховуючі значення функції затрат $3^\circ(U)$ параметричні ряди, наприклад, для перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а потужністю 3000 кВт, запишуться:

$U_1^N = 30$	$\varphi(\lambda) = 0,3179$	$3^\circ(U) = 57,865$
$U_2^N = 30; 60$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$3^\circ(U) = 57,865; 115,73$
$U_3^N = 30; 120$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$3^\circ(U) = 57,865; 121,647$
$U_4^N = 30; 240$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$3^\circ(U) = 57,865; 243,294$
$U_5^N = 30; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,1588$	$3^\circ(U) = 57,865; 364,941$
$U_6^N = 30; 60; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$3^\circ(U) = 57,865; 115,73; 364,941$
$U_7^N = 30; 120; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$3^\circ(U) = 57,865; 121,647; 364,941$
$U_8^N = 30; 240; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$3^\circ(U) = 57,865; 243,294; 364,941$

Деякі результати розрахунків цільових функцій представимо на рис.2.

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції при різних потужностях перетворювача представлені у табл.1, 2 (структура з мінімальним значенням цільової функції позначена як «●» окремо для структур з силовими модулями М1, М2 та М3).

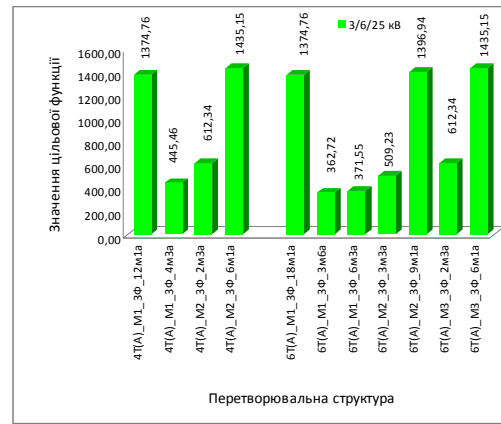
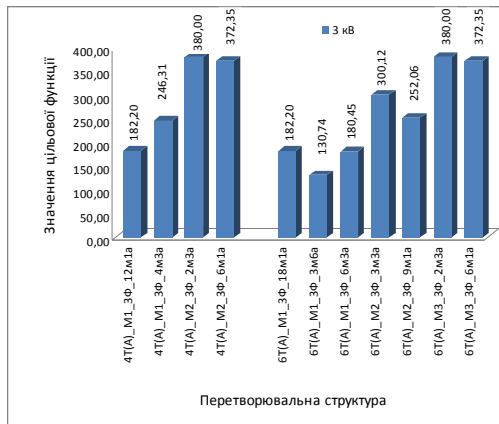


Рисунок 2 – Значення цільових функцій різних перетворювальних структур при потужності перетворювача 12000 кВт та різних напругах у контактній мережі

Таблиця 1 – Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 4 ТЕД

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	3 кВ	3/6 кВ	3/12 кВ	3/24 кВ	3/25 кВ	3/6/25 кВ	3/12/25 кВ	3/24/25 кВ
4T(A)-M1-3Ф-12м1а	3000								
	6000								
	9000	•							
	12000	•							
4T(A)-M1-3Ф-4м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000	•	•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
4T(A)-M2-3Ф-2м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000		•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
4T(A)-M2-3Ф-6м1а	3000								
	6000	•							
	9000	•							
	12000	•							

Висновки.

1. Для побудови статичного перетворювача тягового привода багатосистемного електровоза з чотирма тяговими двигунами доцільно, з точки зору значення цільової функції, використовувати структури типу 3а, а саме 4T(A)-M1-3Ф-4м3а (силовий модуль M1) та 4T(A)-M2-3Ф-2м3а (силовий модуль M2).

2. У відповідності до табл.2 визначаємо, що для побудови статичного перетворювача тягового привода багатосистемного електровоза з шістьма тяговими двигунами доцільно, з точки зору значення цільової функції, використовувати структури 6T(A)-M1-3Ф-3м6а (силовий модуль M1), 6T(A)-M2-3Ф-3м3а (силовий модуль M2) та 6T(A)-M3-3Ф-2м3а (силовий модуль M3).

Таблиця 2 – Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 6 ТЕД

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	3 кВ	3/6 кВ	3/12 кВ	3/24 кВ	3/25 кВ	3/6/25 кВ	3/12/25 кВ	3/24/25 кВ
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	3000								
	6000								
	9000								
	12000								
6Т(А)-М1-3Ф-3мба	3000			•	•	•	•	•	•
	6000	•		•	•	•	•	•	•
	9000	•	•	•	•	•	•	•	•
	12000	•		•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	3000	•	•						
	6000		•						
	9000								
	12000		•						
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000	•	•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000								
	6000								
	9000	•							
	12000	•							
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000		•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000								
	6000	•							
	9000	•							
	12000	•							

ЛІТЕРАТУРА

1. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А.В.Котельников. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.
2. Дубинец Л.В. Научное обоснование и разработка систем управления электроподвижным составом на основе применения герконовых устройств: дис. ... доктора техн. наук: 05.09.03 / Дубинец Леонид Викторович - Днепропетровск, 1991. – 356 с.
3. Дубинець Л.В. Обґрунтування вибору частоти тягового трансформатора багатосистемного електрорухомого складу / Л.В.Дубинець, А.М.Муха, О.Л.Маренич, О.А.Гусар // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – Вип. 3/2007 (44), част.1. – С.28-29.
4. Муха А.М. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму / А.М.Муха // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип.27. – С.93-98.