

НОМІНАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ

У статті представлені результати дослідження режимів роботи трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти.

В статье представлены результаты исследования режимов работы трехфазного тягового трансформатора повышенной частоты.

The results of determination of the study state of working of high frequency three-phase traction transformer are presented in the article.

Вступ. Збільшення потужностей тягового електрообладнання електровозів, а також необхідність встановлення нової апаратури, при жорсткому обмеженні доступного простору зі сторони кузова електровоза, вимагає впровадження підвищених робочих частот.

В попередніх роботах [1,2,3] автор довів доцільність використання на багатосистемних електровозах статичні перетворювачі з ланкою підвищеної частоти. Основною складовою цих статичних перетворювачів є потужні трифазні тягові трансформатори підвищеної частоти.

Мета роботи. Провести дослідження по визначенню параметрів, які характеризують номінальні режими роботи трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти, який забезпечує реалізацію багатосистемності електровозу, тобто можливість роботи під контактної мережею з різними параметрами.

Матеріал і результати дослідження.

Особливість роботи тягових трансформаторів підвищеної частоти в запропонованих перетворювальних структурах [2,3], обумовлюється трьома факторами які пов'язані з напругою живлення (напругою контактної мережі) та напругою навантаження:

1) нестабільність вхідної напруги трансформатора під впливом коливанні напруги контактної мережі (фактор коливання);

2) зміна величини вхідної напруги трансформатора, при зміні параметрів контактної мережі та схеми поєднання мережевих випрямлячів перетворювача (фактор багатосистемності);

3) необхідність підтримки вихідної напруги трансформатора в заданих межах в якості вхідної напруги тягового контуру (фактор стабільності).

Перший фактор не залежить від структури перетворювача і визначається нормативними документами [4,5]. Для контактної мережі постійного струму номінальною напругою 3000 В мінімальна напруга складає 2200 В, максимальна 3850 В та 4000 В (при наявності режиму рекуперації енергії). Для контактної мережі змінного струму промислової частоти 50 Гц та номінальною напругою 25000 В, мінімальна напруга складає 19000 В, а максимальна 29000 В.

У відсотковому співвідношенні значення цих напруг у першому наближенні складатиме:

$$\frac{2200}{3000} = 73 \%, \quad \frac{3850}{3000} = 128 \%, \quad \frac{4000}{3000} = 133 \%,$$
$$\frac{19000}{25000} = 76 \%, \quad \frac{29000}{25000} = 116 \%.$$

По аналогії з існуючою системою постійного струму 3 кВ, пропонується прийняти наступні значення коливання напруг контактної мережі постійного струму підвищеної напруги (табл.1.). Мінімальну напругу контактної мережі постійного струму підвищеного рівня напруги прийняти на рівні 73 % від номінальної, а максимальну 133 % (з урахуванням можливості рекуперації).

Другий фактор обумовлено необхідністю зміни схеми поєднання мережевих випрямлячів при різних рівнях напруги у контактній мережі, що необхідно для реалізації багатосистемності електровозу. Попередні дослідження [2,3] показали, що при напрузі у контактній мережі постійного струму 3 кВ необхідне паралельне поєднання кожного з мережевих випрямлячів до контактної мережі, тобто за схемою 1а (рис.1). При інших рівнях напруги у контактній мережі постійного струму та при змінній напрузі у контактній мережі доцільно

використання поєднання мережевих випрямлячів за схемою 3а (рис. 2).

Виходячи з цих вимог до схеми поєднання мережевих випрямлячів, та враховуючі можливі відхилення напруги у контактній

мережі постійного (табл.1) та змінного струмів [5] представимо значення напруг, що діють на вході мережевих випрямлячів силових модулів тягового перетворювача при реалізації багатосистемності (табл.2).

Таблиця 1

Значення коливання напруг підвищеного рівня у контактній мережі

Рівень напруги контактної мережі, В	Відносне значення напруги			
	Мінімальне, 73%	Номінальне, 100 %	Максимальне, 128 %	Максимальне при рекуперації, 133%
1	2	3	4	5
3000	2200	3000	3850	4000
6000	4400	6000	7700	8000
12000	8800	12000	15400	16000
24000	17600	24000	30800	32000

Таблиця 2

Значення напруг, що діють на вході мережевих випрямлячів тягового перетворювача

Напруга контактної мережі		Схема 1а	Схема 3а
1	2	3	4
1	3 кВ	мінімальна	2200
2		номінальна	3000
3		максимальна	3850
4		максимальна при рекуперації	4000
5	6 кВ	мінімальна	1467
6		номінальна	2000
7		максимальна	2567
8		максимальна при рекуперації	2667
9	12 кВ	мінімальна	2934
10		номінальна	4000
11		максимальна	5134
12		максимальна при рекуперації	5334
13	24 кВ	мінімальна	5867
14		номінальна	8000
15		максимальна	10267
16		максимальна при рекуперації	10667
17	25 кВ	мінімальна	6333
18		номінальна	8333
19		максимальна	9667

Пояснимо представлені у табл.2 дані.

При напрузі у контактній мережі 3 кВ на кожному з мережевих випрямлячів діє напруга контактної мережі з урахуванням можливих відхилень (табл.1). При інших напругах у контактній мережі реалізується послідовне поєднання мережевих випрямлячів за схемою 3а. При номінальній напрузі в контактній мережі постійного струму 6 кВ на вході кожного з мережевих випрямлячів діє $\frac{6000}{3} = 2000$ В (строчка 6, стовпчик 4 у табл.2).

Перемикання схеми поєднання мережевих випрямлячів для електровозу системи 3/6 кВ постійного струму має місце зміна напруги на вході мережевого випрямляча з 3000 В до 2000 В, що призведе до зміни напруги на первинній обмотці трансформатора підвищеної частоти.

Для електровозу системи 3/12 кВ постійного струму така зміна складатиме: 3000 В – 4000 В; для системи 3/24 кВ постійного струму 3000 В – 8000 В. Для інших можливих систем живлення багатосистемного електровозу мають місце такі значення: 3/6/25 кВ – 3000/2000/8333 В; 3/12/25

кВ – 3000/4000/8333 В; 3/24/25 кВ – 3000/8000/8333 В.

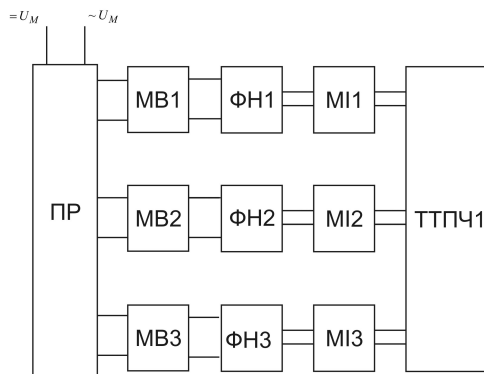


Рис.1. Мережевий контур перетворювача в режимі «3 кВ» постійного струму (за схемою 1а): ПР - перемикач режимів; МВ1, МВ2, МВ3 – мережеві випрямлячі; ФН1, ФН2, ФН3 – фільтри накопичувачі; МІ1, МІ2, МІ3 – мережеві інвертори; ТТПЧ - трифазний трансформатор підвищеної частоти.

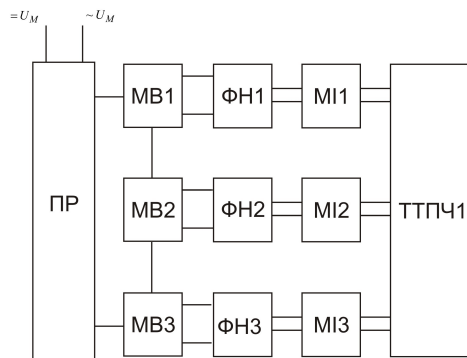


Рис.2. Мережевий контур перетворювача при поєднанні мережевих випрямлячів за схемою 3а.

Такі зміни вхідної напруги трансформатора підвищеної частоти не повинні мати суттєвий вплив на рівень вихідної напруги трансформатора (фактор стабільності).

$$w = \frac{U}{4,44 f B_m k_C S}, \quad (1)$$

де: U - напруга обмотки; k_C - коефіцієнт заповнення сталлю перерізу магнітопроводу. Для стрічкового магнітопроводу з ізоляцією емаллю, при товщині стрічки 0,08 мм, коефіцієнт k_C дорівнює 0,85 [6].

Реалізувати стабільність вихідної напруги трансформатора при зміні схеми поєднання мережевих випрямлячів перетворювача та напруги контактної мережі, у відповідності до виразу (1), можливо за рахунок зміни кількості витків w обмоток (первинної або вторинної), частоти f вхідної напруги або магнітної

індукції B_m у магнітопроводі при незмінності площі S перерізу магнітопроводу. Частота та магнітна індукція у трансформаторах підвищеної частоти дуже тісно пов'язані при забезпеченні мінімальних масогабаритних показників, тобто зміна однієї величини вимагає зміну іншої. Тому залишається один ефективний засіб – зміна кількості витків обмоток.

Такий спосіб використовується в системах зоно-фазового регулювання на електровозах змінного струму радянського виробництва [7,8 та ін.] та системах регулювання напруги трансформаторів [9].

Регулювання кількості витків по первинній або вторинній стороні тягового трансформатора підвищеної частоти, слід обумовлювати наявністю відповідної комутуючої апаратури і ніяким чином не впливає на суть проблеми, яка досліджується у даній роботі. Тому в подальшому це питання не розглядається і є темою окремих досліджень.

Вихідна напруга трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти є вхідною для тягового випрямляча [1] який доцільно виконати за трифазною мостовою схемою. Тяговий випрямляч живить тяговий двигун постійного струму, або тяговий інвертор, який живить асинхронний тяговий двигун. Тобто напруга тягового двигуна постійного, або змінного струму, визначає номінальну вихідну напругу тягового трансформатора підвищеної частоти (напругу вторинної обмотки).

На існуючих електровозах змінного струму, які експлуатуються на залізницях України, використовуються тягові двигуни постійного (пульсуючого) струму (ДПС) з номінальними напругами від 950 В (двигун НБ-418К6) до 1600 В (двигун НБ-412К). Максимальна напруга для цих двигунів дорівнює відповідно 1180 В та 1850 В [7]. Серед номінальних напруг електричних апаратів, у відповідності до ДСТУ 2773-94 [5], до яких відносяться і тягові електродвигуни, є два значення які відповідають представленому діапазону напруг, це 1000 В та 1500 В.

Тоді для забезпечення максимального рівня уніфікації, пропонується в якості номінального рівня вихідної напруги тягового випрямляча прийняти значення 1500 В. Крім того, саме це значення напруги є номінальним для тягових двигунів постійного струму, які використовуються на електровозах постійного струму [10,11,14,15].

У разі використання трифазного мостового випрямляча його вхідна U_2 та вихідна U_d напруги пов'язані співвідношенням [12]:

$$U_d = 2,34U_2. \quad (2)$$

Приймаючи $U_{d\text{ АІН}} = 1500 \text{ В}$ отримаємо фазну напругу трансформатор підвищеної частоти у разі живлення від випрямляча тягових двигунів постійного (пульсуючого) струму:

$$U_{2\text{ АІН}} = \frac{U_{d\text{ АІН}}}{2,34} = \frac{1500}{2,34} \approx 640 \text{ В}. \quad (3)$$

При використанні у тяговому приводі багатосистемного електровоза асинхронних тягових двигунів (АТД), тяговий випрямляч повинен забезпечити підтримання на вході тягового інвертора стабільного рівня напруги [1]. При використанні в якості тягового інвертора трифазного автономного інвертора напруги (АІН) його вхідна напруга приблизно буде дорівнювати [13]:

$$U_{\delta\text{ АДА}} = 0,45 \cdot U_{d\text{ АДА}}. \quad (4)$$

Лінійна напруга сучасного асинхронних тягового двигуна типу АД914 (СТА1200), який використовується на електровозі ДС3 складає 1870 В [11]., тоді:

$$U_{d\text{ АДА}} = \frac{U_{\delta\text{ АДА}}}{0,45} = \frac{1870}{\sqrt{3} \cdot 0,45} \approx 2400 \text{ В}. \quad (5)$$

Саме це значення пропонується прийняти в якості базового при визначенні значення вихідної фазної напруги трифазного трансформатора підвищеної частоти, який призначено для живлення тягового контуру при асинхронних тягових двигунах.

Тобто по аналогії з виразом (3) отримаємо:

$$U_{2\text{ АДА}} = \frac{U_{d\text{ АДА}}}{2,34} = \frac{2400}{2,34} \approx 1026 \text{ В}. \quad (6)$$

Таким чином, для статичних перетворювачів тягового приводу багатосистемних електровозів, вихідну фазну напругу трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти приймаємо на рівні 640 В, у разі використання тягових двигунів постійного (пульсуючого) струму та 1026 В, при використанні асинхронних тягових двигунів.

Для перетворювальних структур визначених у попередніх дослідженнях [1,2,3] як раціональні, з точки зору надійності та уніфікації, приймаємо розрахунковим режим підключення мережевих випрямлячів за схемою 1а (рис.1) до контактної мережі постійного струму з напругою 3 кВ, оскільки цей режим присутній у будь-якому варіанті

побудови статичного перетворювача підвищеної частоти для тягового приводу багатосистемного електровозу [2,3].

У цьому режимі рівень напруги неробочого режиму буде дорівнювати $U_1 = 3000 \text{ В}$, оскільки первина обмотка трансформатора підвищеної частоти підключається мережевим інвертором до контактної мережі постійного струму за заданим алгоритмом.

Втрати та струм неробочого ходу залежать від розрахункової потужності трансформатора [9].

Для проведення подальших досліджень режимів роботи статичного перетворювача приймаємо: потужність тягового двигуна постійного струму еквівалентну потужності на валу тягового двигуна ЕД-141У1 (електровоз ДЕ1) - 728 кВт при коефіцієнті корисної дії 93,3% споживана потужність складає $\frac{728}{0,933} = 780 \text{ кВт}$; потужність асинхронного

тягового двигуна еквівалентну потужності на валу тягового двигуна АД914 (електровоз ДС3) - 1200 кВт при коефіцієнті корисної дії 95,5% споживана потужність складає $\frac{1200}{0,955} = 1256 \text{ кВт}$.

Серед визначених структур присутні силові модулі М1, М2 та М3 [2,3], тобто до трифазного трансформатора підвищеної частоти підключаються тягові контури, які живлять відповідно один, два або три тягових двигуна.

До складу тягового контуру при тягових двигунах постійного струму входить тяговий випрямляч та трифазний тяговий інвертора [1]. В трифазних системах кращими показниками як енергетичними так і якості вихідної напруги та струму, характеризуються трифазні мостові схеми [12]. Саме тому для тягового випрямляча та тягового інвертора, які входять до складу тягового контуру статичного перетворювача підвищеної частоти тягового приводу електровозу, пропонується використати мостові схеми.

Коефіцієнти корисної дії тягового випрямляча та тягового інвертора, у першому наближенні приймаємо 0,99, що відповідає показникам реальних тягових перетворювачів електровозів змінного струму [7].

Вихідна потужність трифазного трансформатора підвищеної частоти P_2 залежить від типу силового модуля. При силовому модулі М1 до трансформатора

підключається тяговий контур для живлення одного тягового двигуна, при М2 – двох та при М3 – трьох.

При силовому модулі М1 та тяговому двигуні постійного струму, потужністю еквівалентною тяговому двигуну ЕД-141У1 та прийнятому вище коефіцієнті корисної дії тягового випрямляча, потужність трифазного трансформатора складатиме:

$$D_{2\phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M1} = 1,05 \cdot \frac{780}{0,99} \approx 827,3 \text{ кВт.} \quad (7)$$

Коефіцієнт 1,05 у виразі (5) характеризує встановлену потужність трифазного трансформатора (при активно-індуктивному навантаженні) [12].

Тоді вихідна потужність однієї фази трифазного трансформатора підвищеної частоти складатиме:

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M1} = \frac{1}{3} \cdot 827,3 \approx 275,7 \text{ кВт.} \quad (8)$$

При використанні асинхронних тягових двигунів потужністю еквівалентною тяговому двигуну АД914, вихідна потужність трифазного трансформатора та його однієї фази, з урахування коефіцієнтів корисної дії тягового випрямляча та тягового інвертора складатиме:

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{O} \bar{A} M1} = 1,05 \cdot \frac{1256}{0,99 \cdot 0,99} \approx 1345,6 \text{ кВт,} \quad (9)$$

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{O} \bar{A} M1} = \frac{1}{3} \cdot 1345,6 \approx 448,5 \text{ кВт.} \quad (10)$$

Вихідний струм трифазного трансформатора підвищеної частоти у номінальному режимі роботи та при різних видах тягових двигунів, з урахуванням раніш визначених рівнів вихідних напруг трансформатора, дорівнюватиме:

- при тяговому двигуні постійного струму

$$I_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M1} = \frac{275,7 \cdot 10^3}{640} \approx 430,7 \text{ А;} \quad (11)$$

- при асинхронному тяговому двигуні

$$I_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{O} \bar{A} M1} = \frac{448,5 \cdot 10^3}{1026} \approx 437,1 \text{ А.} \quad (12)$$

При силових модулях типів М2 та М3 доцільно з точки зору надійної роботи тягових двигунів та реалізації принципів індивідуального приводу використовувати трьох та чотирьохобмоткові трифазні трансформатори. Тобто на одному стрижні розташовувати три та чотири обмотки, з яких одна первина та дві (три) вторинні. Таке схемне рішення дозволить при аварійних режимах відключати тяговий контур в якому спостерігається коротке

замикання або інших не бажаний режим роботи.

Потужність трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при розрахункових тягових двигунах постійного струму складатиме:

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M2} = 1,05 \cdot \left(\frac{780}{0,99} + \frac{780}{0,99} \right) \approx 1654,5 \text{ кВт.} \quad (13)$$

Потужність однієї фази триобмоткового трансформатора:

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M2} = \frac{1}{3} \cdot 1654,5 \approx 551,5 \text{ кВт.} \quad (14)$$

Струм однієї вихідної обмотки трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при тягових двигунах постійного струму буде дорівнювати:

$$I_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{551,5 \cdot 10^3}{640} \approx 431 \text{ А.} \quad (15)$$

Аналогічно потужність трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при розрахункових асинхронних тягових двигунах складатиме:

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{O} \bar{A} M2} = 1,05 \times \left(\frac{1256}{0,99 \cdot 0,99} + \frac{1256}{0,99 \cdot 0,99} \right) \approx 2691,1 \text{ кВт.} \quad (16)$$

Потужність однієї фази триобмоткового трансформатора:

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{O} \bar{A} M2} = \frac{1}{3} \cdot 2691,1 \approx 897 \text{ кВт.} \quad (17)$$

Струм однієї вихідної обмотки трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при асинхронних тягових двигунах складатиме:

$$I_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{O} \bar{A} M2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{897 \cdot 10^3}{1026} \approx 437,1 \text{ А.} \quad (18)$$

Таким саме чином розрахуємо параметри номінального режиму роботи тягового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М3 при тягових двигунах постійного струму та асинхронних тягових двигунах:

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M3} = 1,05 \times \left(\frac{780}{0,99} + \frac{780}{0,99} + \frac{780}{0,99} \right) \approx 2481,8 \text{ кВт;} \quad (19)$$

$$D_{2\phi \phi \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} M3} = \frac{1}{3} \cdot 2481,8 \approx 827,3 \text{ кВт;} \quad (20)$$

$$I_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{I} \bar{N}_{M3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{827,3 \cdot 10^3}{640} \approx 431 \text{ A}; \quad (21)$$

$$D_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{O} \bar{A}_{M3} = 1,05 \times \left(\frac{1256}{0,99 \cdot 0,99} + \frac{1256}{0,99 \cdot 0,99} + \frac{1256}{0,99 \cdot 0,99} \right) \approx 4036,7 \text{ кВт}; \quad (22)$$

$$D_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{O} \bar{A}_{M3} = \frac{1}{3} \cdot 4036,7 \approx 1345,6 \text{ кВт}; \quad (23)$$

$$I_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{O} \bar{A}_{M3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1345,6 \cdot 10^3}{1026} \approx 437,1 \text{ A}. \quad (24)$$

Порівнявши значення струмів вторинних обмоток трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти для різних силових модулів та різних видах тягових двигунів, приймаємо як середнє розрахункове:

- номінальний вихідний струм трансформатора при ТДПС

$$I_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{I} \bar{N} = \frac{430,7 + 431 + 431}{3} \approx 431 \text{ A}; \quad (25)$$

- номінальний вихідний струм трансформатора при АТД

$$I_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{O} \bar{A} = \frac{437,1 + 437,1 + 437,1}{3} = 437,1 \text{ A}. \quad (26)$$

Сучасні технології будівництва трансформаторів дозволяють отримати коефіцієнти корисної дії трансформаторів на рівні 98...99% [9]. Тому, у першому наближенні, приймаємо, що коефіцієнт корисної дії тягового трифазного трансформатора підвищеної частоти дорівнює $\eta_{\text{фаз}} \times = 98,5 \%$.

Виходячи з цього, визначимо номінальні параметри трансформатора по первинному колу для розрахункового режиму роботи – живлення первинних обмоток трансформатора від

однофазних мережних інверторів зі зсувом напруг 120 ел. градусів, які підключені паралельно з фільтрами та мережевими випрямлячами до контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ. Тобто за першою гармонікою приймаємо, що вхідна напруга трансформатора дорівнює $U_1 = 3000 \text{ В}$.

В залежності від типу силового модуля (М1, М2, М3) та виду тягового двигуна вхідна потужність P_1 тягового трифазного трансформатора (повна та на один стержень $P_{1\phi}$) і вхідний струм однієї фази трансформатора I_1 , будуть дорівнювати.

1) силовий модуль М1, тяговий двигун постійного струму

$$D_{1\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{I} \bar{N}_{M1} = \frac{D_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{I} \bar{N}_{M1}}{\eta_{\text{фаз}} \times} = \frac{827,3}{0,985} \approx 839,9 \text{ кВт}; \quad (27)$$

$$D_{1\phi\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{I} \bar{N}_{M1} = \frac{1}{3} \cdot D_{1\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{I} \bar{N}_{M1} = \frac{1}{3} \cdot 839,9 \approx 280 \text{ кВт}; \quad (28)$$

$$I_{1\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{I} \bar{N}_{M1} = \frac{280 \cdot 10^3}{3000} \approx 93,3 \text{ A}; \quad (29)$$

2) силовий модуль М1, асинхронний тяговий двигун

$$D_{1\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{O} \bar{A}_{M1} = \frac{D_{2\text{ фаз}} \times \bar{A} \bar{O} \bar{A}_{M1}}{\eta_{\text{фаз}} \times} = \frac{1345,6}{0,985} \approx 1366,1 \text{ кВт}; \quad (30)$$

Таблиця 3

Значення вхідних параметрів тягового трансформатора підвищеної частоти при різних видах тягових двигунів та типах силових модулів

Параметр вхідного кола		Тяговий двигун постійного струму			Асинхронний тяговий двигун		
		Тип силового модуля					
		М1	М2	М3	М1	М2	М3
1		2	3	4	5	6	7
1	Вхідна потужність P_1 , кВт	839,9	1679,7	2519,6	1366,1	2732,1	4098,2
2	Потужність одного стержня $P_{1\phi}$, кВт	240	559,9	839,9	455,4	910,7	1366,1
3	Вхідний струм однієї фази трансформатора I_1 , А	93,1	186,6	280	151,8	303,6	455,4

$$D_{\text{до } \times \text{ до } \text{ м1}} = \frac{1}{3} \cdot D_{\text{до } \times \text{ до } \text{ м1}} = \text{кВт}, \quad (31)$$

$$= \frac{1}{3} \cdot 1366,1 \approx 455,4 \text{ кВт}$$

$$I_{\text{до } \times \text{ до } \text{ м1}} = \frac{455,4 \cdot 10^3}{3000} \approx 151,8 \text{ А}. \quad (32)$$

Результати розрахунків вхідних параметрів тягового трансформатора підвищеної частоти представлені у табл.3.

Загальні висновки.

1. Особливістю роботи тягових трансформаторів підвищеної частоти в запропонованих перетворювальних структурах, обумовлюється трьома факторами які пов'язані з напругою живлення та напругою навантаження:

- нестабільність вхідної напруги трансформатора під впливом коливань напруги контактної мережі (фактор коливання);
- зміна величини вхідної напруги трансформатора, при зміні параметрів контактної мережі та схеми поєднання мережевих випрямлячів перетворювача (фактор багатосистемності);

- необхідність підтримки вихідної напруги трансформатора в заданих межах в якості вхідної напруги тягового контуру (фактор стабільності).

2. Реалізувати стабільність вихідної напруги трансформатора при зміні схеми поєднання мережевих випрямлячів перетворювача та напруги контактної мережі, пропонується зміною кількості витків обмоток.

3. Випрямляч тягового контуру, який підключено до вихідної напруги трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти, доцільно виконати за трифазною мостовою схемою.

4. Для забезпечення максимального рівня уніфікації, пропонується в якості номінального рівня вихідної напруги тягового випрямляча прийняти значення 1500 В при тягових двигунах постійного струму та 2400 В при асинхронних тягових двигунах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дубинець, Л. В. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення. [Текст] / Л. В. Дубинець, Г. М. Чілікін, А. М. Муха // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого

- електропривода. Теорія й практика.» – Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2007. - С.356-357.
2. Муха, А. М. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму. [Текст] // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Вип. 27. – Д.: ДНУЗТ. - 2009. - С. 93 - 98.
3. Муха, А. М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами.[Текст] // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Вип. 28 – Д.: ДНУЗТ. - 2009. - С. 40–47.
4. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75. – [чинний від 1977-01-01]. – М.: Изд-тво стандартов, 1978. – 6 с.
5. Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови: ДСТУ 2773-94 (ГОСТ 9219-95). – [чинний від 1996-01-07]. - К.: Держстандарт України, 1996. - 74 с.
6. Горский, А. Н. Расчет электромагнитных элементов вторичного электропитания [Текст] / А. Н. Горский, Ю. С. Русин, Н. Р. Иванов, Л. А. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
7. Дубровский, З. М. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. / В. И. Попов, Б. А. Тушканов / - М.: Транспорт, 1991. – 471 с.
8. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации. / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова, В. П. Ярош и др. - М.: Транспорт, 192. – 480 с.
9. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов. [Текст] / П. М. Тихомиров . – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
10. Захарченко, Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины и трансформаторы. [Текст] / Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. - М.: Транспорт, 1968. - 296 с.
11. Безрученко, В. Н. Электрические машины. [Текст] / В. Н. Безрученко, А. С. Хотян. – К.: Вища шк., 1987. - 215 с.
12. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника [Текст] / Ю. С. Забродин. – М.: Высш. шк., 1982. – 496 с.
13. Ротанов, Н. А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко; под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
14. Электровоз ВЛ-8. Руководство по эксплуатации. [Текст] / под ред. О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1982. - 320 с.

15. Электровозы ВЛ-10 и ВЛ-10У. Руководство по эксплуатации. [Текст] / под ред. О. А. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1981. - 519 с.

Надійшла до редколегії 01.12.10.