

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОБ'ЄМУ СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

У статті порушені питання визначення питомого об'єму статичних перетворювачів для багатосистемного електрорухомого складу залізниць.

В статті затронуті питання визначення удельного об'єму статических преобразователей для многосистемного электроподвижного состава железных дорог.

The issues of determination of specific volume of static converters for multisystem railway electric rolling stock are touched on in the article.

Вступ

Основою сучасного тягового електроприводу є статичні перетворювачі, структура яких визначається видом тягового двигуна. Основні структури і схеми технічні рішення для традиційного електрорухомого складу (ЕРС) досить повно представлені у літературі [1, 2, 3, 4 та ін.]. Але ж загально відомі недоліки системи тягового електропостачання напругою 3 кВ постійного струму [5 та ін.] та необхідність забезпечення процесу перевезень на електрифікованих залізницях незалежно від роду струму та значення напруги у контактній мережі без заміни електровозів на станціях стикування вимагає використання тягового електрорухомого складу який може працювати як при постійному так і змінному струмах при різних рівнях напруги у контактній мережі. Такий тяговий електрорухомий склад називаємо багатосистемним.

Створення багатосистемних електровозів стало можливим дякуючи успіхам силової напівпровідникової техніки – появі повністю керованих вентилів, підвищення класу приладів та їх робочих струмів.

Поява нової елементної бази призвела до удосконалення існуючих та створення нових схемних та конструктивних рішень для перетворювачів. Ведучими фірмами-виробниками статичних перетворювачів зокрема були створені загальнопромислові приводи з двигунами постійного та змінного струмів та перетворювачі іншого функціонального призначення.

Безумовно, такі зміни не обминули й тягові статичні перетворювачі, які живлять тягові двигуни електровозів та електропоїздів.

Але ж питання визначення взаємного зв'язку між потужністю тягового приводу та масо-габаритними показниками статичного пе-

ретворювача, що є невід'ємною його частиною, не порушувалось, тому автором проведено аналіз промислових перетворювачів для розробки рекомендацій по раціональних конструктивних показниках перетворювачів тягового приводу.

Мета роботи

Дослідити питання визначення питомого об'єму статичних перетворювачів для багатосистемного електрорухомого складу залізниць з тяговими двигунами постійного струму.

Матеріал і результати дослідження

Традиційно питомий об'єм визначаємо як: $V_p = \frac{V}{P} [\text{м}^3/\text{кВт}]$, де V – об'єм статичного перетворювача, м^3 ; P – потужність перетворювача, кВт [6].

Вихідними даними є: потужність, габарити, елементна база та вид охолодження напівпровідникових ключів існуючих перетворювачів.

У представленій роботі проаналізовані основні показники перетворювачів таких фірм та підприємств: Siemens, ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (Запоріжжя, Україна), ВАТ НДІ «Преобразователь» (Запоріжжя, Україна), ВО «Электровыпрямитель» (Саранськ, Росія), «Харківський електромеханічний завод» (Харків, Україна) та інших підприємств країн СНД (колишнього СРСР).

Загалом проаналізовано 322 перетворювача, з них: фірми Siemens (60), ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (163), підприємств колишнього СРСР (99).

Було проведено аналіз статичних перетворювачів електроприводу постійного струму з номінальними напругами з ряду 230, 460, 660,

825 (низьковольтні) та високовольтні перетворювачі з напругами 1050, 2500, 3000, 3300 В.

До уваги приймалися перетворювачі з потужністю понад 75 кВт включно, оскільки аналіз конструкцій існуючих перетворювачів ведучих фірм виробників показав, що саме з цієї потужності починається ряд конструктивного виконання всіх потужних перетворювачів.

Представлені надалі залежності питомого об'єму $V_p = f(P)$ від потужності перетворювачів враховують тип елементної бази, вид охолодження.

По-перше, розглянемо конструктивні показники перетворювачів виробництва країн СНД, оскільки вони мають ту ж саму інженерну школу, а тому схожі технічні рішення.

На рис. 1 представлена залежність $V_p = f(P)$, побудована за експериментальними даними для перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ.

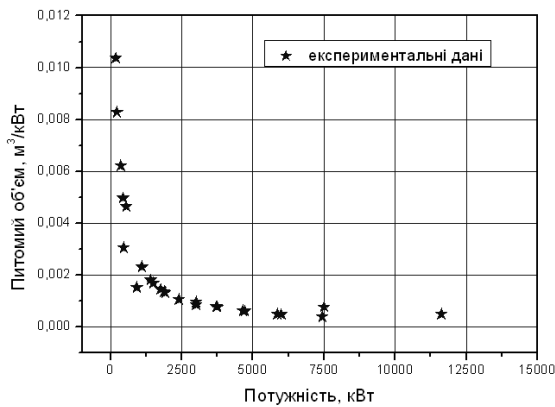


Рис. 1. Залежність питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ, від потужності перетворювачів

Для отримання аналітичних залежностей для питомого об'єму від їх потужності проведемо апроксимацію експериментальних значень (рис. 2).

Залежність питомого об'єму перетворювачів від потужності апроксимувались за допомогою наступних виразів (у загальному вигляді):

$$y(x) = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-x}{t_1}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{-x}{t_2}\right)} \quad (\text{експоненціальна другого порядку}).$$

При цьому коефіцієнти апроксимації мають наступні значення: $y_0 = 0$; $A_1 = 0,00223$; $t_1 = 3942,92663$; $A_2 = 0,01657$; $t_2 = 239,70193$.

Тоді вираз для апроксимованої залежності $V_p = f(P)$ має вигляд:

$$V_p(P) = 0 + 0,00223 \cdot e^{\left(\frac{-P}{3942,92663}\right)} + 0,01657 \cdot e^{\left(\frac{-P}{239,70193}\right)}.$$

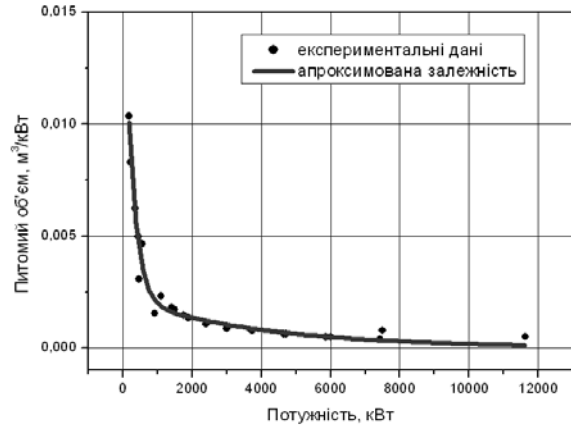


Рис. 2. Результати апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ, від потужності перетворювачів

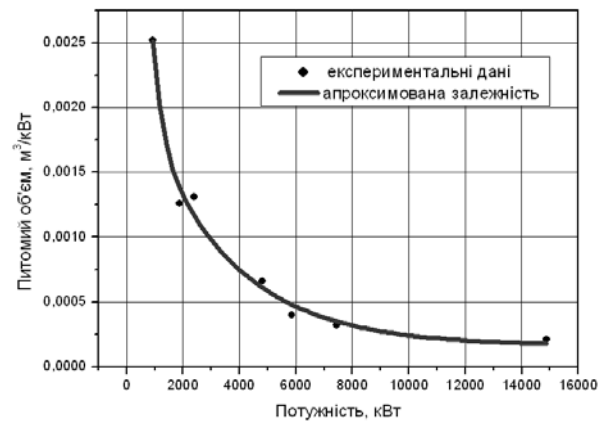


Рис. 3. Результати апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження – водяне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ, від потужності перетворювачів

Аналогічно отримуємо аналітичні залежності питомого об'єму для інших перетворювачів.

Представимо коефіцієнти апроксимації за експоненціальною залежністю другого порядку для залежності $V_p = f(P)$ по кожному з типів перетворювачів у вигляді табл. 1.

Отримані залежності дозволяють у першому наближенні оцінити вплив системи охолодження перетворювача на його габаритні розміри, для цього представимо апроксимовані залежно-

сті з рис. 2 та рис. 3 в одній системі координат (рис. 4).

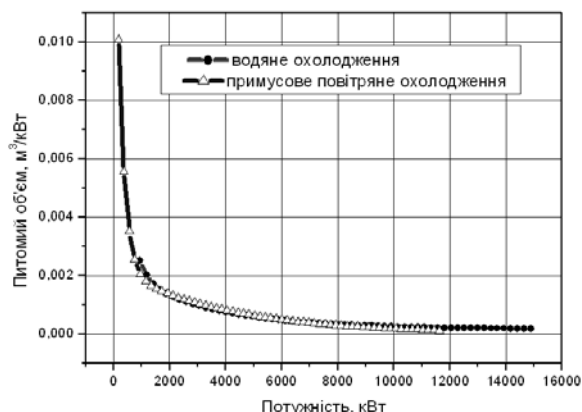


Рис. 4. Вплив виду охолодження на габаритні розміри перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор) з діапазоном робочих напруг до одного кВ

Аналіз представлених на рис. 4 залежностей та використання представлених у табл. 1 коефіцієнтів апроксимації дозволяє порівняти, у відсотках, виграш від використання водяного охолодження в перетворювачах, які живлять двигуни постійного струму.

Так, використання водяного (рідинного) охолодження для перетворювачем потужністю 4000 кВт дозволяє виграти приблизно 7,4 % від загального об'єму перетворювача, у порівнянні з таким самим за потужністю перетворювачем, який побудовано з використанням примусового повітряного охолодження.

Представимо цей розрахунок.

Питомий об'єм перетворювача потужністю 4000 кВт, на базі тиристорів з примусовим охолодженням дорівнює:

$$V_{\text{РПП}}(4000) = 0 + 0,00223 \cdot e^{\left(-\frac{4000}{3942,92663}\right)} + 0,01657 \cdot e^{\left(-\frac{4000}{239,70193}\right)} = 8,086 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{кВт}} \right].$$

Питомий об'єм перетворювача потужністю 4000 кВт на базі тиристорів з водяним охолодженням дорівнює:

$$V_{\text{РВод}}(4000) = 0,000158 + 0,01263 \cdot e^{\left(-\frac{4000}{331,48236}\right)} + 0,00218 \cdot e^{\left(-\frac{4000}{3063,27429}\right)} = 7,488 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{кВт}} \right].$$

Приймаючи показники системи з примусовим повітряним охолодженням за 100 %, отримуємо наступну відносну зміну питомого об'єму перетворювача:

$$\Delta V_p = \frac{V_{\text{РПП}} - V_{\text{РВод}}}{V_{\text{РПП}}} \cdot 100 \% = \frac{8,086 \cdot 10^{-4} - 7,488 \cdot 10^{-4}}{8,086 \cdot 10^{-4}} \cdot 100 \% = 7,39 \%$$

Проаналізуємо конструктивні показники інших перетворювачів виробництва підприємств колишнього СРСР [7]. На рис. 5 представлені результати апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів виробництва підприємств колишнього СРСР (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ.

На рис. 6. представлено порівняння результатів апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів підприємств колишнього СРСР та перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь».

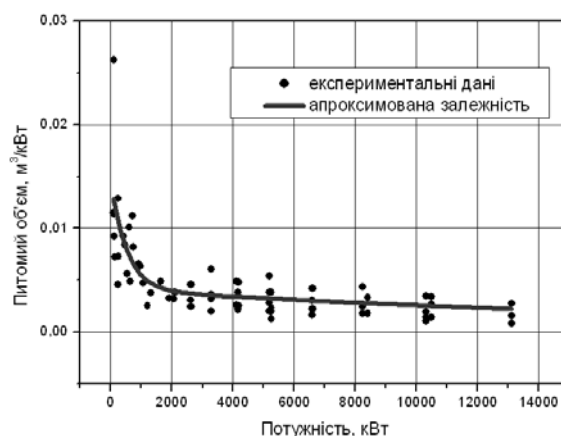


Рис.5. Результати апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів виробництва підприємств колишнього СРСР (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ, від потужності перетворювачів

При аналізі розглянуто перетворювачі для живлення двигунів постійного струму напругою до одного кВ.

Як бачимо (рис. 6), показники питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» є кращими у порівнянні з аналогічними показниками перетворювачів інших підприємств колишнього СРСР.

Саме тому для подальшого дослідження впливу типу елементної бази та призначення перетворювачів (загальнопромислового або тягового виконання) за базові показники приймаємо показники перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь».

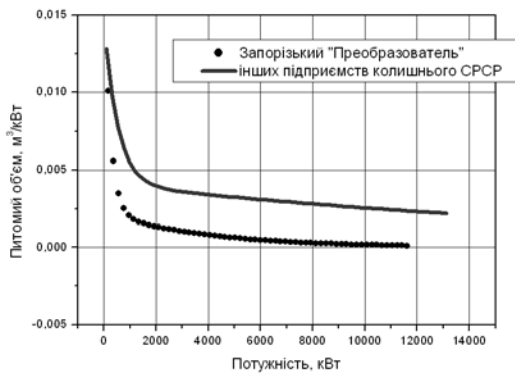


Рис. 6. Порівняння результатів апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів підприємств колишнього СРСР та перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь»

Розглянемо вплив тягового виконання на конструктивні показники перетворювачів, побудованих з використанням тиристорів та примусового повітряного охолодження (яке використовується на тягових перетворювачах рухомого складу виробництва колишнього СРСР, що експлуатується на залізницях України).

На рис. 7 та у табл. 1 представлені результати апроксимації показників питомого об'єму тягових перетворювачів для рухомого складу виробництва колишнього СРСР (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне).

На рис. 8 представимо порівняння питомого об'єму перетворювачів тягового виконання та загальнопромислового (на прикладі перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь»» (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне).

Використовуючи методику визначення кількісної оцінки вигаду від використання водяного охолодження, визначимо на скільки відсотків відрізняються габаритні розміри загальнопромислових та тягових перетворювачів на прикладі перетворювача потужністю 4000 кВт.

Питомий об'єм загальнопромислового перетворювача потужністю 4000 кВт, на базі тиристорів з примусовим охолодженням дорівнює:

$$V_{PЗарПром}(4000) = 0 + 0,00223 \cdot e^{\left(-\frac{4000}{3942,92663}\right)} + 0,01657 \cdot e^{\left(-\frac{4000}{239,70193}\right)} = 8,086 \cdot 10^{-4} \left[\frac{M^3}{kWh} \right].$$

Питомий об'єм тягового перетворювача потужністю 4000 кВт на базі тиристорів з примусовим охолодженням дорівнює:

$$V_{PТяг}(4000) = 0 + 0,00273 \cdot e^{\left(-\frac{4000}{2778,60249}\right)} - 7,18075 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\left(-\frac{4000}{4378,89879}\right)} = 3,59 \cdot 10^{-4} \left[\frac{M^3}{kWh} \right].$$

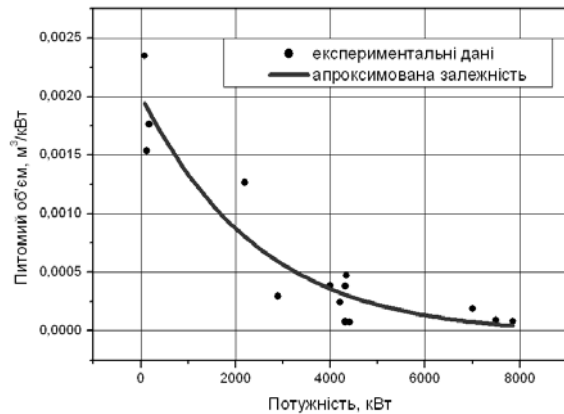


Рис. 7. Результати апроксимації показників питомого об'єму тягових перетворювачів для рухомого складу виробництва колишнього СРСР (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне)

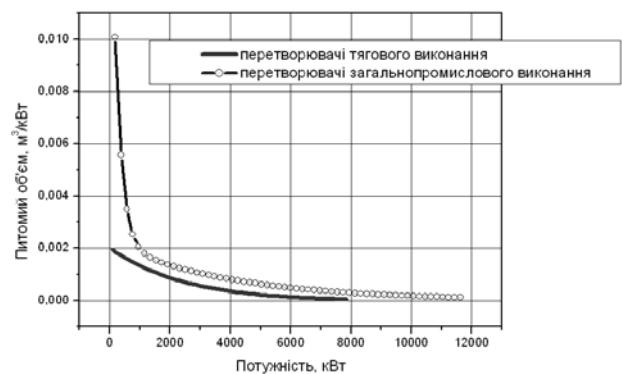


Рис. 8. Порівняння питомого об'єму перетворювачів тягового виконання та загальнопромислового (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне)

Приймаючи показники загальнопромислового перетворювача з примусовим повітряним охолодженням за 100 %, отримаємо наступну відносну зміну питомого об'єму перетворювача:

$$\Delta V_p = \frac{V_{PЗарПром} - V_{PТяг}}{V_{PЗарПром}} \cdot 100 \% = \frac{8,086 \cdot 10^{-4} - 3,59 \cdot 10^{-4}}{8,086 \cdot 10^{-4}} \cdot 100 \% = 55,6 \%.$$

Тобто тягові перетворювачі займають приблизно на 50...60 % менший об'єм у порівнянні з загальнопромисловими перетворювачами, що

обумовлено обмеженістю кузовного простору електровозу.

Слід відмітити, що перетворювачі, конструктивні показники яких досліджував автор, побудовані за класичною структурою: трансформатор – керований випрямляч (з відповідними фільтрами), живлення цих перетворювачів, в т.ч. тягових, здійснюється від мережі змінного струму.

Тому при використанні неklasичної структури перетворювача або при живленні від мережі постійного струму конструктивні показники можуть змінюватися.

Перетворювачі вітчизняного виробництва та виробництва країн колишнього СРСР, проаналізовані автором, побудовані з використанням елементної бази свого часу.

На сучасному рівні розвитку силової напівпровідникової техніки параметри приладів дозволяють будувати перетворювачі без використання групового з'єднання приладів. Крупні світові компанії, наприклад Siemens, мають готові технічні рішення з використанням найсучасніших силових напівпровідникових вентилів. Виходячи з вищезазначеного, доцільним є проаналізувати, яким чином тип елементної бази впливає на конструктивні показники перетворювачів.

Для виконання цього завдання порівнюємо питомі об'єми загальнопромислових перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» та перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне).

На рис. 9 представлена залежність $V_p = f(P)$ для перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження - примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ.

Провести порівняння показників питомого об'єму між перетворювачами заводу «Преобразователь» та перетворювачами серії Simoreg DC Master фірми Siemens на підставі отриманих залежностей можливо тільки в обмеженому діапазоні потужностей (Simoreg тільки до 2000 кВт). Але ж якщо розташувати отримані апроксимовані залежності в одній системі координат (рис. 10), то підтверджується загальновідомий факт доцільності використання сучасних потужних напівпровідникових елементів.

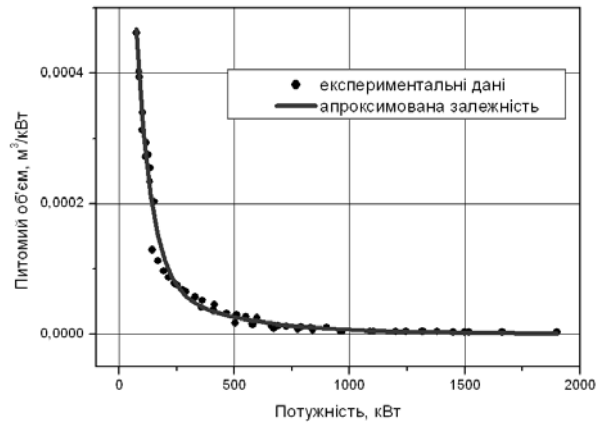


Рис. 9. Результати апроксимації показників питомого об'єму перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ

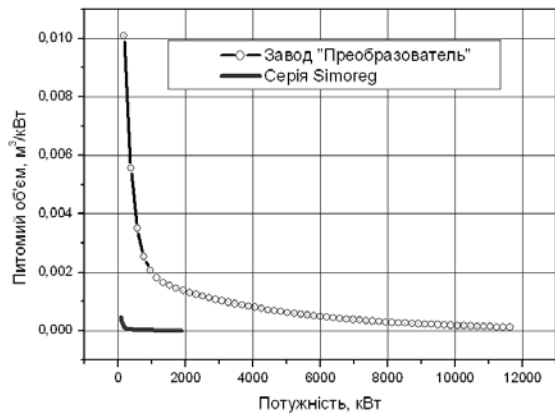


Рис. 10. Порівняння питомого об'єму перетворювачів загальнопромислових перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» та перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens

Загальні висновки

1. Проведений аналіз габаритних показників перетворювачів різної потужності для тягового електроприводу з двигунами постійного струму дозволив визначити аналітичні залежності питомого об'єму тягового перетворювача від потужності.
2. При проведенні аналізу перетворювачі групувались за наступними критеріями: виробник, діапазон робочих напруг, елементна база, система охолодження.
3. Проведений аналіз конструктивних показників показав, що тягові перетворювачі займають приблизно на 50...60 % менший об'єм, у порівнянні з загальнопромисловими перетворювачами, що обумовлено обмеженістю кузовного простору електровозу.

Коефіцієнти апроксимації для залежності $V_p = f(P)$ для різних перетворювачів

Тип перетворювача	Коефіцієнти				
	y_0	A_1	t_1	A_2	t_2
Перетворювачі ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (тиристор, примусове повітряне охолодження), до одного кВ	0	0,00223	3942,9266	0,01657	239,70193
Перетворювачі ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (тиристор, водяне охолодження), до одного кВ	1,580E-4	0,01263	331,48236	0,00218	3063,2712
Перетворювачі підприємств колишнього СРСР (тиристор, примусове повітряне охолодження), до одного кВ	0	0,01041	525,68619	0,00412	20755,954
Тягові перетворювачі підприємств колишнього СРСР (тиристор, примусове повітряне охолодження), до одного кВ	0	0,00273	2778,6024	-7,1807E-4	4378,8987
Перетворювачі серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне), до одного кВ	0	1,0221E-4	361,08463	0,00127	62,8627

4. Вплив елементної бази перетворювача на залежність питомого об'єму перетворювача від потужності пояснюється, в першу чергу, залежністю габаритних розмірів системи охолодження від втрат потужності на силових елементах перетворювача. Так, перетворювачі виробників країн колишнього СРСР характеризуються гіршими показниками у порівнянні з перетворювачами західних виробників, оскільки елементною базою цих перетворювачів є прилади з меншим класом та номінальним струмом.

5. Перетворювачі, конструктивні показники яких досліджував автор, побудовані за класичною структурою: трансформатор – керований випрямляч (з відповідними фільтрами), живлення цих перетворювачів, в тому числі тягових, здійснюється від мережі змінного струму.

6. При використанні некласичної структури перетворювача або при живленні від мережі постійного струму отримані конструктивні показники є базовими для визначення відповідних показників нетрадиційних перетворювачів.

7. Отримані результати досліджень є базою для визначення конструктивних показників перетворювачів тягового електроприводу на базі тягових двигунів постійного струму.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Романов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
2. Калинин, В. К. Электровозы и электропоезда. [Текст] / В. К. Калинин. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
3. Безрученко, В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу [Текст]: навч. посібник / В. М. Безрученко, В. К. Марченко, В. В. Чумак. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2003. – 252 с.
4. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. [Текст] / А. М. Солодунов и др.; под ред. А. М. Солодунова. – Рига: Зинантне, 1991. – 351 с.
5. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы [Текст] / А. В. Котельников. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.
6. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст]: учебник. – Ч. 1 / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
7. Чиженко, И. М. Справочник по преобразовательной технике [Текст] / И. М. Чиженко, П. Д. Андриенко; под ред. И. М. Чиженко. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.

Надійшла до редколегії 30.11.2008.