

## ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОБ'ЄМУ СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

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

В статье затронуты вопросы определения удельного объема статических преобразователей для многосистемного электроподвижного состава железных дорог.

Issues of determination of the specific volume of steady-state converters for multi-system electric rolling stock of railways are discussed in the article.

**Вступ.** Питання використання асинхронного електроприводу на електрорухомому складі (ЕРС) не нове, йому присвячена значна кількість праць [1, 2, 3 та інш.]. В цих роботах статичний перетворювач частоти, який є невід'ємною частиною асинхронного тягового електроприводу (АТЕ), розглянуто в загальному вигляді. Більш детально проведено порівняльний аналіз різних варіантів побудови статичних перетворювачів для живлення тягових асинхронних двигунів (АТД) у роботі [4]. Дослідження, проведені авторами [4], базувались на можливостях елементної бази того часу. Сучасна елементна база [5] дозволяє будувати статичні перетворювачі з великими функціональними можливостями.

Але не варто забувати, що габарити статичного перетворювача для електровозу обмежена розмірами кузова, оскільки крім статичного перетворювача в кузові потрібно розташувати інше обладнання.

Особливо гостро це питання постає при роботі перспективного багатосистемного електрорухомого складу. Під багатосистемним мається на увазі ЕРС, який зможе працювати як при постійному, так і змінному струмах при різних рівнях напруги у контактній мережі.

Вітчизняні електровозобудівники вже мають досвід побудови тягового асинхронного електроприводу – електровоз змінного струму ДСЗ, у складі якого використовувався статичний перетворювач фірми Siemens [6]. На сучасному етапі ведуться розробки магістрального пасажирського електровозу постійного-змінного струму (3/25 кВ).

Але ж питання визначення взаємного зв'язку між потужністю тягового приводу та масо-габаритними показниками статичного перетворювача, що є невід'ємною його частиною,

не порушувалось, тому автором проведено аналіз промислових перетворювачів для розробки рекомендацій щодо раціональних конструктивних показників перетворювачів тягового приводу.

**Мета роботи.** Дослідити питання визначення питомого об'єму статичних перетворювачів для багатосистемного електрорухомого складу залізниць з асинхронними тяговими двигунами.

### Матеріал і результати дослідження.

Традиційного питомий об'єм визначаємо як:

$$V_p = \frac{V}{P} [\text{м}^3/\text{кВт}],$$

де  $V$  – об'єм статичного перетворювача,  $\text{м}^3$ ;  $P$  – потужність перетворювача, кВт [7].

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

У представленій роботі проаналізовані основні показники перетворювачів таких фірм та підприємств: Siemens, ABB, Rockwell Automation (Allen-Bradley).

Загалом проаналізовано 402 перетворювача, з них Siemens (176), ABB (154), Rockwell Automation (72).

Було проведено аналіз статичних перетворювачів частотно-регульованого асинхронного електроприводу з номінальними напругами з ряду 380, 400, 415, 440, 460, 480, 500, 525, 575, 600, 660, 690 В (низьковольтні) та високовольтні перетворювачі з напругами 2300, 3300, 4160, 6000, 6600 В (представлений ряд напруг є стандартним для фірм європейських виробників перетворювачів та частково співпадає з рядом номінальних напруг, діючим в країнах СНД [9]).

До уваги бралися 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 питомої маси  $M_p = f(P)$  та питомого об'єму  $V_p = f(P)$  від потужності перетворювачів враховують тип елементної бази, вид охолодження. Діапазон робочих напруг визначено після попереднього порівняння графічних залежностей. Наприклад, на рис. 1 представлена залежність  $V_p = f(P)$ , побудована за експериментальними даними для перетворювачів серії Simovert фірми Siemens (елементна база – IGBT, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг від 2,3 до 6 кВ.

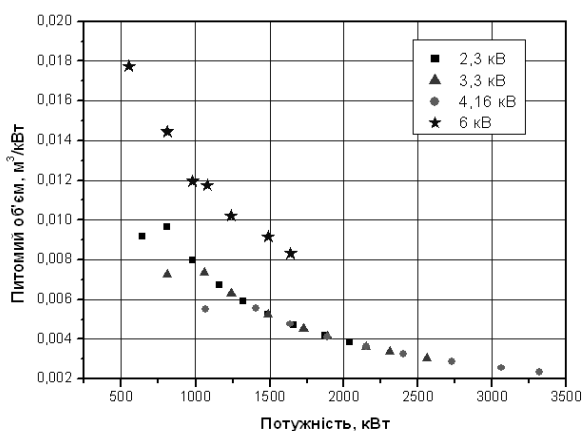


Рис. 1. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens від потужності перетворювачів

З представлених на рис. 1 залежностей бачимо, що в діапазоні номінальних напруг 2,3...4,16 кВ експериментальні дані, отримані по каталогових параметрах перетворювачів, знаходяться в приблизно одному діапазоні. Для перетворювачів з напругою 6 кВ експериментальні дані по питомій масі значно відрізняються від даних діапазону 2,3...4,16 кВ, тому в першому наближенні для отримання апроксимованих залежностей групуємо перетворювачі з напругами 2,3...4,16 кВ окремо від перетворювачів з напругою 6 кВ. Слід відмітити, що характер залежностей схожий, вони приблизно рівновіддалені одна від одної.

Питома маса перетворювача потужністю 980 кВт при напрузі 2,3 кВ (рис. 1) приблизно складає  $0,00798 \text{ м}^3/\text{кВт}$ , а при напрузі 6 кВ:  $0,01195 \text{ м}^3/\text{кВт}$ , в  $\frac{0,01195}{0,00798} = 1,497$  рази більше.

Така різниця в показниках питомого об'єму між перетворювачами з різною робочою напругою та однаковою потужністю пояснюється, в пер-

шу чергу, необхідністю підвищення відстані між елементами перетворювача.

Це твердження підтверджується аналізом залежності відстані по поверхні ізоляції та величини повітряного зазору від робочої напруги електроустаткування [8, стор. 112, черт. 1, крива 4]. При робочій напрузі 2,3 кВ мінімальна відстань між елементами та деталями електроустаткування по поверхні повинна складати не менш як 54 мм, а при 6 кВ – не менш як 82 мм, що в  $\frac{82}{54} = 1,52$  рази більше, а відповідно зрос-

тає і об'єм електроустаткування. Саме це співвідношення підтверджує отримане раніше співвідношення питомих об'ємів перетворювачів з робочими напругами 2,3 та 6 кВ.

Для отримання аналітичних залежностей для питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens від їх потужності проведемо апроксимацію експериментальних значень для перетворювачів діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ (рис. 2).

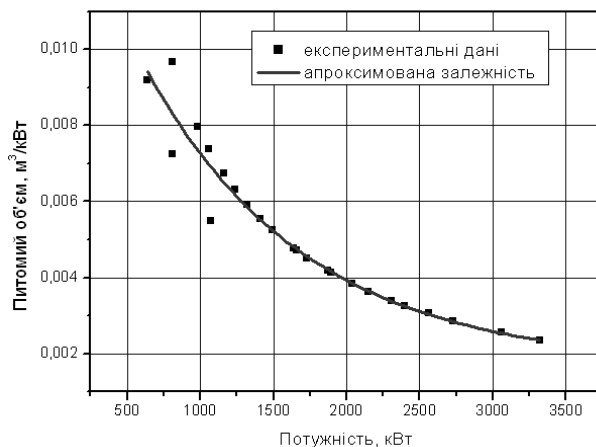


Рис. 2. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ від потужності перетворювачів

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:  $y_0 = 0,00169$ ,  $A_1 = 0,00902$ ,  $t_1 = 1089,60885$ ,  $A_2 = 0,00482$ ,  $t_2 = 1117,9204$ .

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

$$V_p(P) = 0,00169 + 0,00902 \cdot e^{\left(-\frac{P}{1089,60885}\right)} + 0,00482 \cdot e^{\left(-\frac{P}{1117,9204}\right)}$$

Аналогічно отримуємо аналітичні залежності питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 6...6,6 кВ від потужності перетворювачів (рис. 3).

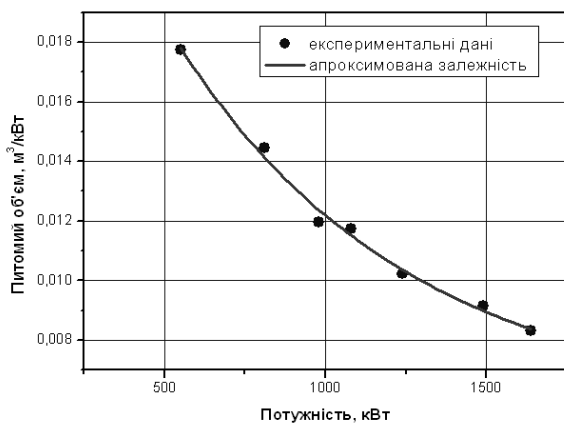


Рис. 3. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 6...6,6 кВ від потужності перетворювачів

Аналізуючи технічні характеристики та параметри перетворювачів серії Simovert фірми Siemens, крім стандартних перетворювачів до складу серії також входять пристрої з вбудованими у перетворювач засобами покращення електромагнітної сумісності (ЕМС). На рис. 4 представлені залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert з ЕМС фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ від потужності перетворювачів, як експериментальні, так і апроксимовані.

На рис. 5 наведені разом залежності  $V_p = f(P)$  для перетворювачів серії Simovert без пристроїв ЕМС та з пристроями ЕМС фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ та 6...6,6 кВ.

Як бачимо з рис.5, введення до складу перетворювачів пристроїв для покращення ЕМС значно підвищує об'єм перетворювача, наближаючи ці показники до перетворювачів з більшою номінальною напругою.

В сучасних умовах покращення якості електричної енергії в електричній (контактній) мережі та зменшення впливу на основні показники якості електроенергії зі сторони навантаження (електровозів та електропоїздів) є важливою проблемою, але у даній роботі ці питання не розглядаються, тому за базові при розра-

хунках приймаємо перетворювачі без пристроїв ЕМС. Номінальною напругою для перетворювачів у першому наближенні приймаємо 2,3 кВ, оскільки це відповідає рівню номінальної напруги сучасних тягових асинхронних двигунів (наприклад номінальна напруга асинхронного двигуна АД914, що встановлений на електровозі ДСЗ, дорівнює 1870 В).

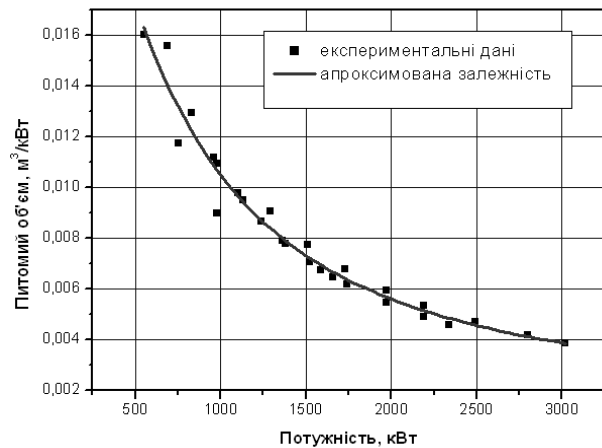


Рис. 4. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert з ЕМС фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ від потужності перетворювачів

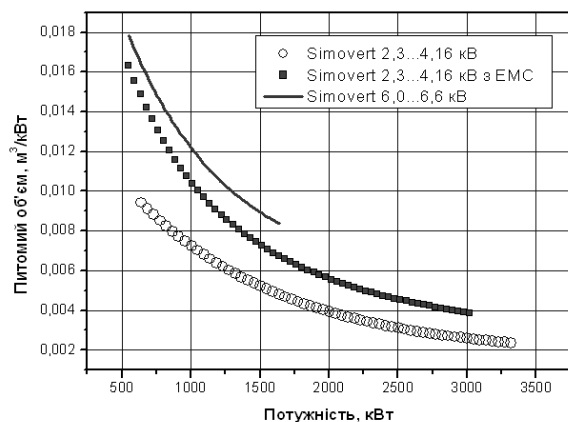


Рис. 5. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert без та з ЕМС фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ та 6...6,6 кВ від потужності перетворювачів

Дослідимо, яким чином впливає рівень напруги на основні конструктивні показники перетворювачів, для цього порівняємо залежності питомого об'єму  $V_p = f(P)$  від потужності перетворювачів серій Simovert та Sinamics фірми Siemens, побудованих з використанням IGBT з природним повітряним охолодженням. Оскільки перетворювачі розробки та виробництва однієї фірми, це в якійсь мірі виключає фактор впливу конструктивних особливостей перетво-

рювачів окремих виробників (що дослідимо надалі).

На рис. 6 представлена залежність  $V_p = f(P)$ , побудована за експериментальними даними та апроксимована експоненціальною залежністю другого порядку для перетворювачів серії Sinamics G150 ver. A фірми Siemens (елементна база – IGBT, охолодження – природне повітряне), діапазон номінальних напруг: 380...690 В.

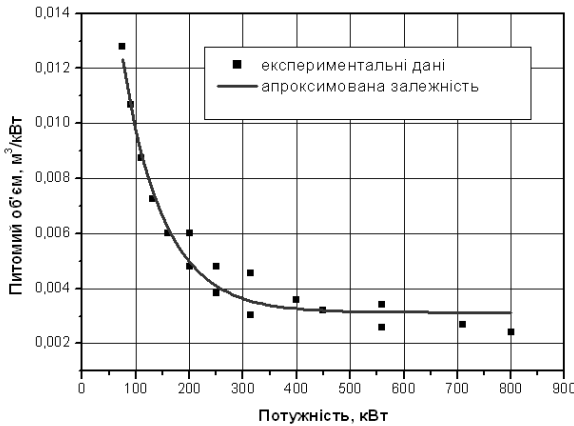


Рис. 6. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Sinamics G150 ver. A фірми Siemens від потужності перетворювачів  $V_p = f(P)$

Порівняємо між собою залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert (2,3...4,16 кВ) та Sinamics (380...690 В) фірми Siemens від потужності перетворювачів (рис. 7).

Аналіз представлених на рис. 7 залежностей показує їх різницю не тільки в числових значеннях, але й в характері – вони не рівновіддалені одна від одної. В цьому випадку пояснити їх різницю тільки відмінністю повітряного зазору між елементами перетворювача неможливо.

При цьому слід враховувати, що в розглянутих перетворювачах серії Simovert використовують примусове повітряне охолодження, а в перетворювачах серії Sinamics природне повітряне охолодження. Саме цим пояснюється різниця між величинами питомого об'єму при однаковій потужності та характер залежностей, представлених на рис. 7.

Представимо залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ з водяним охолодженням від потужності перетворювачів за методикою, яка використана раніше. Результати експериментальні та апроксимована залежність представлені на рис. 8.

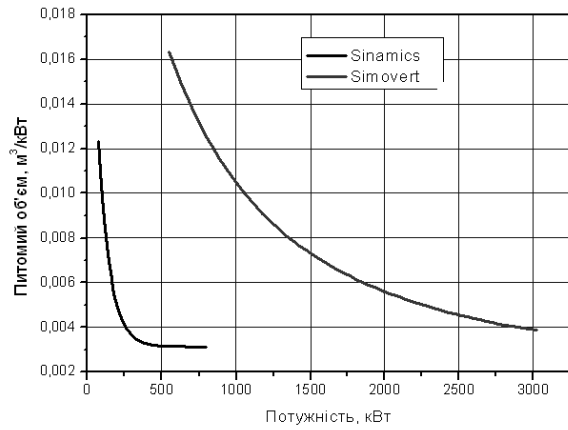


Рис. 7. Залежність питомого об'єму перетворювачів серій Sinamics (380...690 В) та Simovert (2,3...4,16 кВ) фірми Siemens від потужності перетворювачів

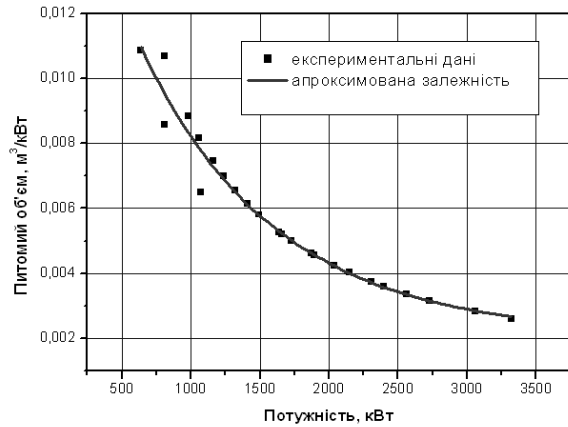


Рис. 8. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ з водяним охолодженням від потужності перетворювачів

Вплив виду охолодження на конструктивні параметри перетворювачів ілюструють залежності, представлені на рис. 9.

Аналіз представлених на рис. 9 залежностей показує, що залежності питомого об'єму перетворювачів від потужності при примусовому повітряному і водяному охолодженні приблизно рівновіддалені одна від одної. Так, перетворювач потужністю 1000 кВт при примусовому повітряному охолодженні характеризується питомим об'ємом приблизно  $0,01039 \text{ м}^3/\text{кВт}$ , а при водяному охолодженні –  $0,00819 \text{ м}^3/\text{кВт}$ , тобто в  $\frac{0,00819}{0,01039} = 0,79$  рази менше. Таким чи-

ном, використання водяного охолодження при побудові перетворювачів для багатосистемних електровозів дозволить зменшити габарити перетворювачів приблизно на 20...25 %, що є важливим в умовах обмеженого простору кузова електровоза.

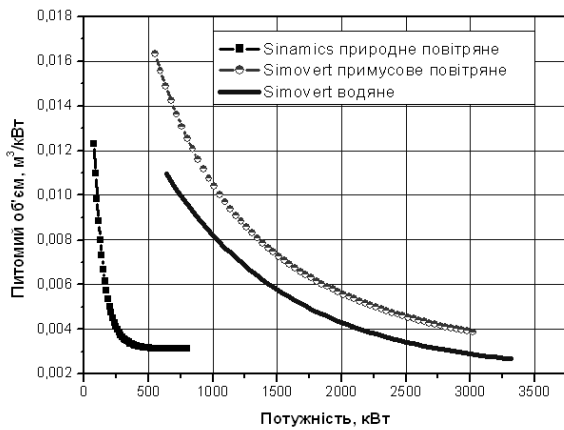


Рис. 9. Залежність питомого об'єму перетворювачів серій Sinamics (380...690 В) та Simovert (2,3...4,16 кВ) з примусовим повітряним та водяним охолодженням фірми Siemens від потужності перетворювачів

Значний вплив на масо-габаритні показники перетворювачів мають традиції проектування та готові інженерні рішення фірм-виробників, а також елементна база, яку використовують розробники перетворювачів. Проведемо дослідження впливу вищевказаних факторів на питомий об'єм перетворювачів різних виробників з урахуванням елементної бази перетворювачів. За базові приймаємо залежності, що характеризують перетворювачі фірми Siemens, що наведені вище.

На рис. 10 представлено залежність питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми ABB з номінальними напругами до одного кВ (елементна база – IGBT, охолодження – природне повітряне).

На рис. 11 для порівняння представлені залежності  $V_p = f(P)$  для перетворювачів фірм ABB та Siemens діапазону напруг до одного кВ, елементна база – IGBT, охолодження – природне повітряне.

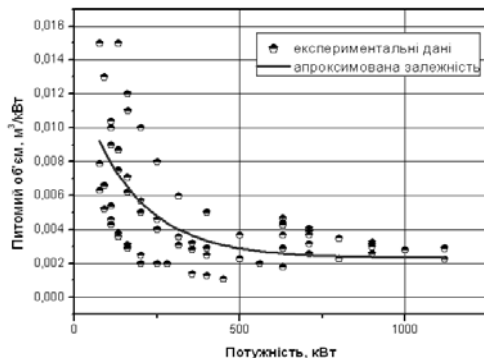


Рис. 10. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми ABB з номінальними напругами до одного кВ

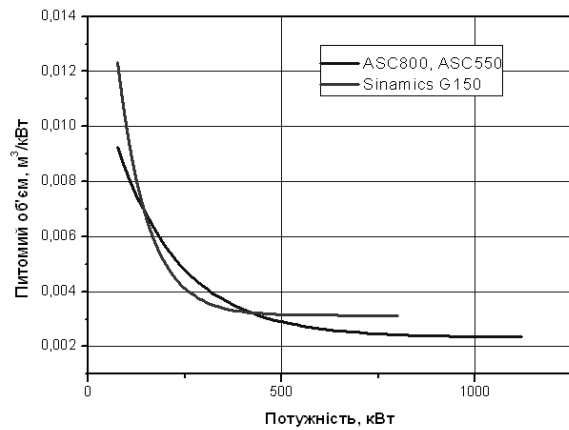


Рис. 11. Порівняння залежностей питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми ABB та перетворювачів серії Sinamics G150 ver. A фірми Siemens

Як бачимо з рис. 11, характер та числові значення залежностей питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми ABB та перетворювачів серії Sinamics G150 ver. A фірми Siemens є близькими, що може пояснюватися однаковими підходами до проектування перетворювачів, незмінною фізикою теплових та електричних процесів.

Високовольтні перетворювачі з використанням повітряного та водяного (рідинного) охолодження випускаються фірмою Rockwell Automation, елементною базою яких є SGCT тиристори.

На рис. 12 та 13 представлено залежність питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT, з примусовим повітряним (рис. 12) та водяним (рис. 13) охолодженням).

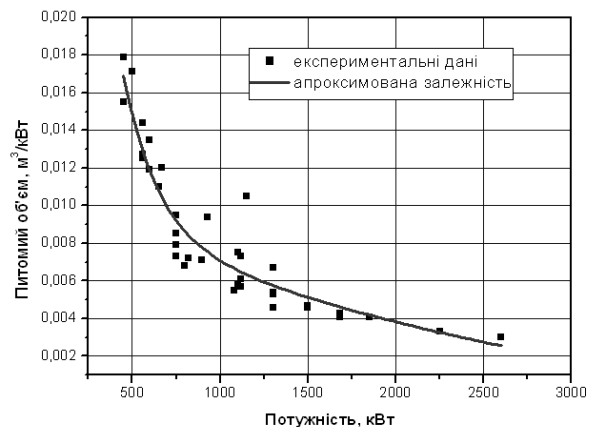


Рис. 12. Залежність питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT, з примусовим повітряним охолодженням)

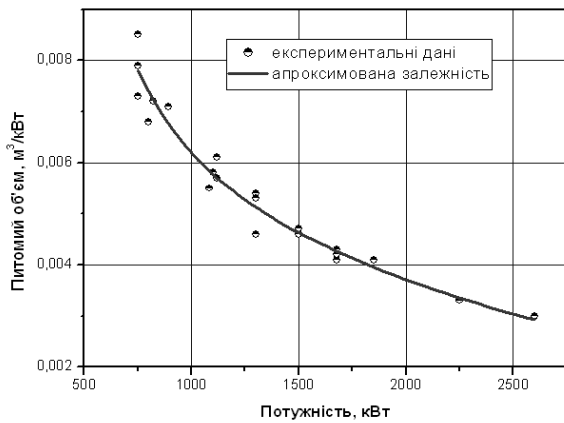


Рис. 13. Залежність питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT, з водяним охолодженням)

Порівняємо між собою залежності питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation та серії Simovert фірми Siemens з примусовим повітряним (рис. 14) та водяним (рис. 15) охолодженням).

Розбіжність отриманих залежностей можливо пояснити, в першу чергу, використанням у складі перетворювача різної елементної бази: SGCT та IGBT. Так, загальновідомим є той факт, що IGBT по відношенню до тиристорів (в тому числі SGCT) характеризуються більш високими втратами потужності [5], що веде до збільшення габаритних розмірів радіаторів системи охолодження та перетворювача у цілому.

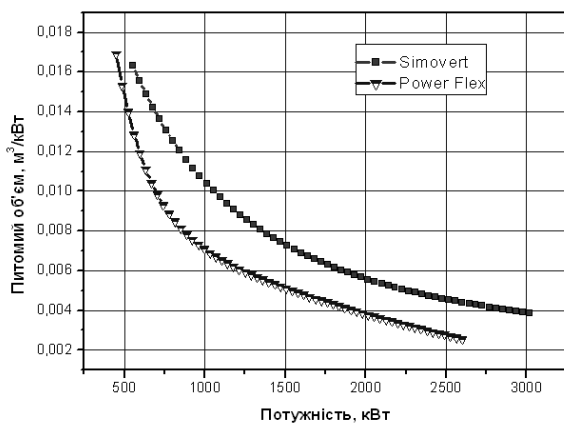


Рис. 14. Порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation та серії Simovert фірми Siemens з примусовим повітряним охолодженням

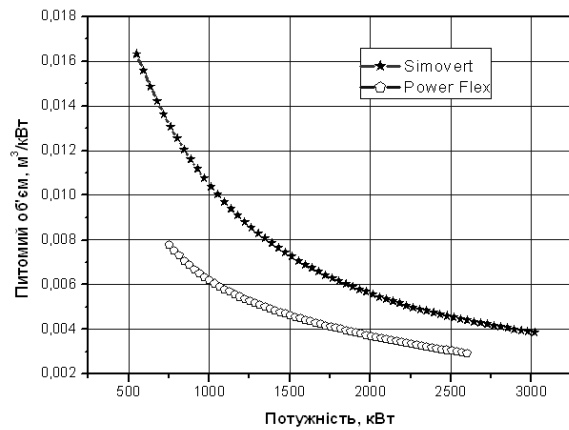


Рис. 15. Порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation та серії Simovert фірми Siemens з водяним охолодженням

Переваги використання тиристорів у складі перетворювачів, з точки зору масо-габаритних показників, ілюструє порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation з примусовим повітряним охолодженням (елементна база – SGCT) та серії Simovert фірми Siemens з водяним охолодженням (елементна база – IGBT) (рис. 16).

Як бачимо з рис. 16, перетворювачі, які побудовані з використанням SGCT та мають примусове повітряне охолодження, характеризуються меншими габаритними показниками у порівнянні з перетворювачами, які побудовані з використанням IGBT та мають водяне охолодження (при однакових потужностях).

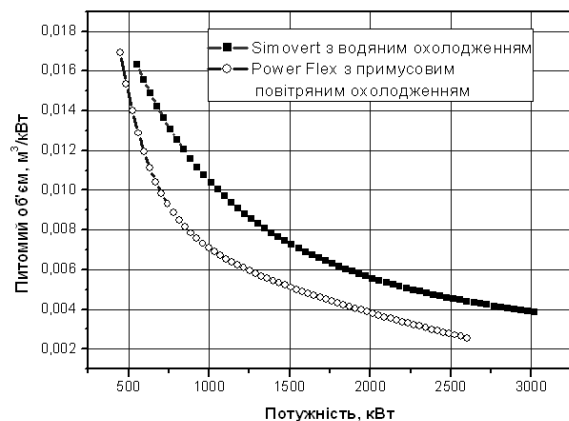


Рис. 16. Порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation з примусовим повітряним охолодженням (елементна база – SGCT) та серії Simovert фірми Siemens з водяним охолодженням (елементна база – IGBT)

### Загальні висновки.

1. Проведений аналіз габаритних показників перетворювачів різної потужності для асинхронного електроприводу дозволив визначити аналітичні залежності питомого об'єму перетворювача від потужності.

2. При проведенні аналізу перетворювачі групувались за наступними критеріями: виробник, діапазон робочих напруг, елементна база, система охолодження.

3. Вплив інженерної школи та готових технічних рішень, які відповідають різним виробникам, на залежність питомого об'єму перетворювача від потужності є мінімальним. Це можливо пояснити однаковими підходами до проектування перетворювачів, незмінною фізикою теплових та електричних процесів.

4. Вплив діапазону робочих напруг на габаритні показники перетворювачів є досить значним, оскільки з ростом напруги зростає мінімальна допустима відстань між елементами перетворювача.

5. 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. Тому, з цієї точки зору, використання SGCT, IGCT приладів у складі перетворювачів є більш зручним по відношенню до IGBT приладів.

6. Вплив системи охолодження на габаритні розміри перетворювачів напряму залежить від виду елементної бази. Як показав порівняльний аналіз залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів від потужності, при використанні різної елементної бази перетворювач на базі IGBT з водяним охолодженням має приблизно такі ж показники, як і перетворювач з примусовим охолодженням на базі SGCT.

7. Отримані результати досліджень є базою для визначення конструктивних показників перетворювачів тягового електроприводу з використанням АТД.

### 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] / под ред. А. М. Солодунова. – Рига: Зинантне, 1991. – 351 с.
5. Муха, А. М. Перспективна елементна база електричних кіл електрорухомого складу залізниць України [Текст] / А. М. Муха, Д. С. Білухін // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2006. – Вип. 4/2006 (39), част. 1. – Кременчук: КДПУ, 2006. – С. 32-34.
6. 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.
7. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст]: учебник. – Ч. 1 / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
8. Проектирование и изготовление электрооборудования для электрической тяги. Руководящие технические материалы [Текст]. – М.: ВНИИ-ЭМ, 1968. – 276 с.
9. Электротехнический справочник [Текст]: в 3-х т. – Т. 1 / под ред. В. Г. Герасимова и др. – М.: Энергия, 1980. – 520 с.

Надійшла до редколегії 25.09.2008.