

Забарило Д. О., інженер, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

УДК 629.423.3

Перспективи застосування аморфних сплавів для тягового рухомого складу

Розглянуто можливий варіант економії коштів на тягових трансформаторах за рахунок зниження втрат холостого ходу при заміні магнітопроводів з електротехнічної сталі на магнітопроводи з аморфних сплавів.

Залізниця України електрифікована змінним і постійним струмом майже в рівних частинах, відповідно й інвентарний парк електропружного складу розподілений таким самим чином. Інвентарний парк електропружів змінного струму складає більше 500 од. На таких електропружах застосовуються як двигуни пульсуючого струму, так й асинхронні тягові двигуни. Основні схеми, які застосовуються на електропружному складі залізниць України, показано на рис. 1–3.

На рис. 1–2 зображено схеми живлення тягових електродвигунів (ТЕД) пульсуючого струму. Вони отримують живлення з контактної мережі через тяговий трансформатор ТТ, випрямляч В та згладжуючий реактор ЗР. Регулювання напруги відбувається як на вторинній (рис. 1), так і на первинній (рис. 2) стороні ТТ.

На рис. 3 зображено схему живлення асинхронних тягових двигунів (АТД). Вони отримують живлення від контактної мережі через тяговий трансформатор ТТ, випрямляч В (як правило, чотириквadrantний перетворювач), фільтр Ф та автономний інвертор напруги АІН. Регулювання напруги та частоти АТД здійснюється за допомогою АІН.

Незалежно від схеми живлення та типу двигуна головним компонентом тягового привода являється трансформатор. На шляху вдосконалення електромагнітних характеристик ТТ основним напрямком була заміна електротехнічної сталі однієї марки на іншу, з більш низькими питомими втратами. Так, наприклад, для виготовлення трансфор-

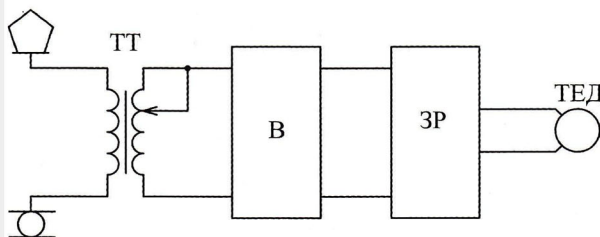


Рис. 1. Схема регулювання напруги на вторинній стороні трансформатора: ТТ — тяговий трансформатор; В — випрямляч; ЗР — згладжуючий реактор; ТЕД — тяговий електричний двигун

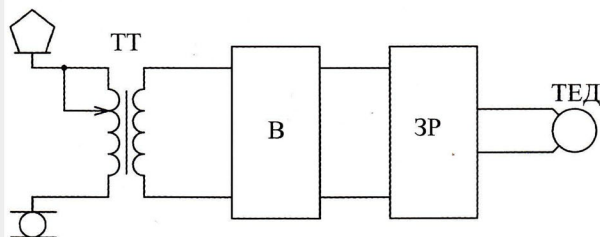


Рис. 2. Схема регулювання напруги на первинній стороні трансформатора: ТТ — тяговий трансформатор; В — випрямляч; ЗР — згладжуючий реактор; ТЕД — тяговий електричний двигун

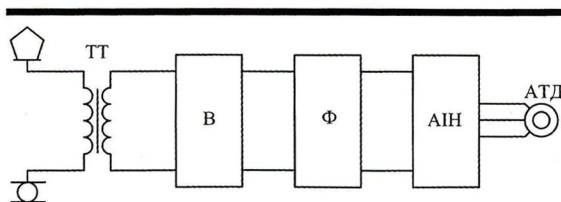


Рис. 3. Схема регулювання частоти обертання вала АТД: ТТ — тяговий трансформатор; В — випрямляч; Ф — фільтр; АІН — автономний інвертор напруги; АТД — асинхронний тяговий двигун

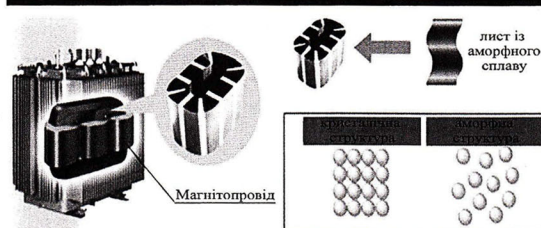


Рис. 4. Магнітопровід трансформатора із аморфного сплаву

маторів типу ОДНЦЗ-5000/25Б електро-
возів серії ВЛ80^а, ВЛ80^б, ВЛ80^в ви-
користовується сталь електротехніч-
ної холоднокатана анізотропа мар-
ки 3414 товщиною листа 0,35 мм [1].
У магнітопроводах трансформатора
типу ОДНЦЗД-6316/25 електроваза ДСЗ
використовується електротехнічна сталь
марки 3407 товщиною листа 0,30 мм [2].

Застосування сталі марки 3407 то-
вщиною листа 0,30 мм замість сталі мар-
ки 3414 товщиною листа 0,35 мм до-
зволить знизити питомі втрати в сталі
з 1,50 до 1,26 Вт/кг (при індукції
1,7 Тл) [3], тобто менше ніж на 20%, що
в порівнянні з можливостями сучасних
магнітних матеріалів являється не-
значною економією. Подальші перспек-

тиви зниження питомих втрат у ТТ, ма-
гнітопроводах яких виконано з електро-
технічної сталі, майже вичерпані.

Максимальний коефіцієнт корисної
дії трансформатора досягається при рів-
ному співвідношенні електричних і ма-
гнітних втрат [4]. Особливістю ТТ елек-
тродвухомого складу, як і тягових дви-
гунів, є те, що більшість часу його наван-
таження менше номінального або він
працює в режимі холостого ходу. Тому
трансформатор проектується таким чи-
ном, щоб електричні втрати значно пе-
ревижували магнітні [5].

Середньостатистичний час знахо-
дження ЕРС, а отже, й трансформато-
ра під тяговою мережею протягом до-
би складає 18 год. Тоді втрати холостого

ходу за рік для тягового трансформато-
ра типу ОДНЦЗ-5000/25Б електроваза
ВЛ80к складають 72 270 кВт·год на рік.

Для суттєвого зниження втрат холос-
того ходу трансформаторів потрібно в їх
магнітопроводах застосовувати сучас-
ні магнітні матеріали. На-
приклад, в країнах Західної Європи в тя-
говій мережі використовуються транс-
форматори, магнітопроводи яких виго-
товляються з пермалойв. Застосуван-
ня пермалойв замість електротехнічної
сталі дозволяє значно знизити втрати
в сталі. Проте застосування таких спла-
вів в якості магнітопроводів для транс-
форматорів електродвухомого складу
практично неможливо, оскільки перма-
лой мають відносно низькі показники
механічної стійкості. Крім того, перма-
лой мають значно більшу вартість унаслі-
док додавання в сплав нікелю. Більш су-
часними, дешевшими та механічно стій-
кішими являються аморфні сплави.

Аморфні сплави — це сплави, які ма-
ють випадкову (некристалічну) струк-
туру. Типовий приклад аморфного ста-
ну — скло. Тому часто такі сплави назива-
ють склоподібними. До складу сплаву
входять дві групи елементів: перехід-
ні метали (Fe, Co...) і так звані аморфо-
утворюючі елементи (В, С, Si...). Аморф-
на структура сплаву виходить тільки при
визначеній швидкості його охолодження
— сотні й тисячі градусів за секунду.

Сьогодні найбільше розповсюджен-
ня отримали магнітні аморфні сплави,
у яких дозволяє значно знизити магнітні
й механічні властивості. Магнітні амор-
фні сплави — феромагнітні сплави з
вузькою петлею гістерезису. Особли-
вістю таких сплавів у відношенні до
кристалічних являється наявність вели-
кої (близько 20%) кількості немагнітних
елементів, таких як бор, кремній, фос-
фор та ін., які необхідні для збереження
аморфної структури. Наявність цих еле-
ментів знижує максимальне значення
індукції насичення в аморфних сплавах
у порівнянні з кристалічними, але збіль-
шує температурний коефіцієнт магніт-
них властивостей. Ці ж елементи збіль-
шують електроопір, підвищують твер-
дість, міцність та корозійну стійкість.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики аморфних магнітних матеріалів відносно традиційних

Показники	Матеріал					
	Електротехнічна сталь	Пермалой		Ферити Mn — Zn	Аморфні сплави	
		50 Ni	80 Ni		на основі Co	на основі Fe
Амплітуда маг. інд., Т	2,0	1,55	0,74	0,5	0,58	1,56
Коерцитивна сила, Е	0,5	0,15	0,03	0,1	0,005	0,03
Початкова проникність	1500	6000	40 000	3000	60 000	5000
Максимальна проникність	20 000	60 000	200 000	6000	1 000 000	50 000
Питомий опір, Ом/см	50	30	60	1 000 000	120	130

Таблиця 2. Середні втрати холостого ходу для силових трансформаторів з різними магнітопроводами

Потужність трифазного трансформатора з напругою 10 кВ, кВ · А	Втрати холостого ходу, Вт		Відносне зниження втрат, %
	магнітопровід — трансформаторна сталь SiFe	магнітопровід — аморфний сплав	
25	100	28	72
40	140	39	72
63	180	50	72
100	260	66	75
250	520	150	71
630	1000	280	77
1000	1700	350	80
1600	2100	490	77
2500	2700	550	80

Таблиця 3. Основні характеристики розповсюджених аморфних сплавів

Марка аморфного сплаву	Магнітна індукція насичення, В, Тл	Питомі втрати P, Вт/кг	Температура Кюрі, °С
7421	1,61	$P_{1,45/400} = 5,0$ $P_{1,45/1000} = 16$	370
7411	1,61	$P_{1,45/50} = 0,4$ $P_{1,45/400} = 5,0$	370
2HCP	1,45	$P_{0,2/20000} = 10$	420
2XCP	1,10	$P_{0,2/20000} = 10$	350
AMAG225	1,15	$P_{0,5/1000} = 6$	435
9KCP	1,61	$P_{1,8/400} = 5,0$ $P_{1,8/1000} = 10$	460
AMAG325	1,45	$P_{0,2/1000} = 8$	535
2605S2 (Metglas)	1,56	$P_{1/1000} = 0,75$	415
2605SC (Metglas)	1,61	$P_{1/1000} = 6,0$	370
2605C (Metglas)	1,60	$P_{1,25/90} = 0,26$	—
Fe ₈₂ Si ₈ B ₁₀ (Amomet)	1,60	$P_{1,8/60} = 0,24$	—
2605SA1 (Metglas)	1,56	$P_{1,3/60} = 0,098$	395
2605HB1M (Metglas)	1,63	$P_{1,3/60} = 0,083$	364

Таблиця 4. Порівняння питомих втрат в електротехнічній сталі та аморфному сплаві

Марка сталі (сплаву)	3414	3407	2605HB1M
Питомі втрати, Вт/кг	0,878	0,737	0,083
Відношення питомих втрат у сталі до аморфного сплаву	10,6	8,5	—

Із початку 80-х рр. XX ст. аморфні сплави почали широко застосовуватися в радіо- й електротехнічних виробках замість пермалойів, феритів, електротехнічних сталей, магнітодіелектриків.

Аморфні сплави на основі заліза, які мають найбільшу магнітну індукцію насичення (1,5–1,6 Тл), та порівняно (у відношенні до кристалічної сталі) низькі втрати, можуть успішно використовуватися в якості магнітопроводів силових трансформаторів (рис. 3–4), що працюють як на промислових час-

тотах змінної напруги, так і на більш високих частотах. Це обумовлено низькими сумарними втратами, які в кращих аморфних сплавах даного класу на порядок нижчі, ніж у кремнієвих електротехнічних сталей. Для виготовлення високочастотних трансформаторів найбільш перспективні кобальтовмісні сплави, які мають мале значення коерцитивної сили та низькі питомі втрати на високих частотах [6]. Незалежно від варіанта застосування при використанні аморфних осердь в індуктив-

них компонентах забезпечуються такі переваги:

- зменшена маса;
- розширений температурний діапазон від -60 до 125 °С;
- підвищена стабільність властивостей та надійність;
- висока точність для вимірювальних пристроїв;
- підвищення ККД пристрою.

Порівняльні характеристики аморфних магнітних матеріалів відносно традиційних наведено в табл. 1.

Таблиця 5. Результати розрахунків питомих втрат та економія від застосування аморфних сплавів

Тип трансформатора	ОДЦ9-5000/255 (ВЛ80°, ВЛ80°, ВЛ80°)	LTS 7,85/25 (ЧС4)	ОНДЦЭД-6316/25 (ДС3)
Втрати холостого ходу, кВт	11	9,6	3,8
Втрати холостого ходу за рік, кВт • год	72 270	63 072	24 966
Вартість втрат холостого ходу за рік, грн	61 430	53 611	21 221
При заміні електротехнічної сталі на аморфний сплав марки 2605НВ1М			
Втрати холостого ходу, кВт	1,04	0,91	0,45
Втрати холостого ходу за рік, кВт • год	6833	5979	2805
Вартість втрат холостого ходу за рік, грн	5808	5082	2384
Очікувана економія за рік, грн	55 622	48 529	18 837

За даними компанії Metglas, втрати за рік в силових трансформаторах розподільних мереж, у яких використовуються магнітопровід з електротехнічної сталі, складають близько 8% від закупівельної вартості. У табл. 2 наведено середні втрати холостого ходу для силових трансформаторів номінальної напруги 10 кВ і потужністю від 25 до 2500 кВ • А [6].

Як слідує з табл. 2, використання в магнітопроводах аморфних матеріалів замість традиційної трансформаторної сталі дозволяє знизити втрати холостого ходу в 4–5 разів. І хоча такі трансформатори мають більшу вартість, за рахунок своєї економічності в довгостроковій перспективі вони є більш вигідними.

Аморфні сплави, які виробляються в промислових масштабах, у США називаються Metglas, у Німеччині — Vitrovas, у Японії — Amomet.

Широке використання аморфних сплавів за кордоном пояснюється тим, що з підвищенням цін на електроенергію втрати на перемагничення стають суттєвим джерелом затрат й їх зниження підвищує економічну ефективність використання аморфних сплавів. Таким чином, застосування їх у якості трансформаторного матеріалу визнано доцільним.

Серед широкої номенклатури аморфних сплавів основна увага приділяється магнітом'яким аморфним сплавам, які рекомендовано виробниками для застосування в силових трансформаторах (табл. 3). Головною відмінністю таких сплавів являється високе значення магнітної індукції.

Як видно з табл. 3, кожен виробник приводить питомі втрати аморфного сплаву для певної частоти та індукції, значення яких відрізняються від питомих втрат електротехнічних сталей нормованих ГОСТ 21427.1-83. У дано-

му випадку здійснюється порівняння аморфного сплаву марки 2605НВ1М з електротехнічною сталлю марок 3414 та 3407.

Питомі втрати аморфного сплаву приводяться при індукції 1,3 Тл, а для електротехнічної сталі при індукції 1,7 Тл. Необхідно порівняти питомі втрати в сталі при індукції 1,3 Тл.

Для електротехнічної сталі марки 3414 товщиною листа 0,35 мм питомі втрати складають 0,878 Вт/кг.

Для електротехнічної сталі марки 3407 товщиною листа 0,27 мм питомі втрати складають 0,737 Вт/кг.

Питомі втрати в електротехнічній сталі зазначених марок та аморфного сплаву при індукції 1,3 Тл зведено до табл. 4.

Як слідує з табл. 4, питомі втрати аморфного сплаву в порівнянні з електротехнічною сталлю марок 3414 та 3407 нижчі відповідно в 10,6 та в 8,9 разів.

Оскільки втрати в магнітопроводі трансформатора пропорційні масі й питомим втратам магнітного матеріалу, то застосування аморфного матеріалу замість електротехнічної сталі дозволить знизити втрати холостого ходу в 10,6 та в 8,9 рази відповідно.

Вартість витрат, які обумовлені втратами холостого ходу за рік, визначаються як добуток вартості електроенергії та річних втрат холостого ходу.

Результати розрахунків витрат електроенергії, затрат коштів та можлива економія електроенергії при використанні аморфних сплавів для деяких видів тягових трансформаторів зведені до табл. 5.

При заміні в тягових трансформаторах магнітопроводу з електротехнічної сталі на магнітопровід з аморфного сплаву можна отримати економію за рік на одному електровозі серії ДС3 18 837 грн, для електроваго ЧС4 — 48 529 грн. Оскільки електровази серії

ВЛ80°, ВЛ80°, ВЛ80° двосекційні, то очікувана економія на одному електровозі складає 111 244 грн.

Локомотив

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Электровоз ВЛ80Т. Руководство по эксплуатации; под ред. Б. Р. Бондаренко. — М.: Транспорт, 1977. — 568 с.
2. Соколов Ю. Н. Конспект для локомотивных бригад. Электровоз ДС3. Устройство, управление, обслуживание. — Киев, 2011. — 299 с.
3. Сталь электротехническая тонколистовая ГОСТ 21427.183. Комитет стандартизации и метрологии СССР. — М.: Издательство стандартов, 1992. — 17 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений. — 3-е изд., перераб. — Л.: Энергия, 1978. — 832 с.
5. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков. — М.: Транспорт, 1979. — 303 с.
6. Електропозитив ресурс. Режим доступу: URL: www.forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html.

УДК 629.423.3

Забарильо Д. А.

Перспективы применения аморфных сплавов для тягового подвижного состава

Рассмотрен возможный вариант экономии денежных средств на тяговых трансформаторах за счет снижения потерь холостого хода при замене сердечников с электротехнической стали на сердечники с аморфными сплавами.

УДК 629.423.3

D. Zabarlyo

The prospects of amorphous alloys application for traction rolling stock

The article considers a possible variant of saving money for traction transformers by no-load losses reducing by electrical steel cores replacing to amorphous alloys cores.

Отримано 10.06.2014