

УДК 621.314

Ю. В. Черняк  
М. О. Ревчук  
А. Є. Пилипенко

## АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ДРОСЕЛЯХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

*На сьогоднішній день більша частина тягового електрорухомого складу залізниць вимагає модернізації, оскільки параметри енергоефективності роботи електронних перетворювачів застарілої конструкції не задовольняють сучасним вимогам по коефіцієнту корисної дії і коефіцієнту потужності. Більшість електромеханічних перетворювачів, за своїм призначенням є морально застарілими. Перехід на електростатичні перетворювачі енергії, також як і заміна реостатного пуску імпульсним регулюванням, є одними з ключових моментів підвищення енергоефективності існуючого електрорухомого складу.*

*На сегодняшний день большая часть тягового электроподвижного состава железных дорог требует модернизации, поскольку параметры энергоэффективности работы электронных преобразователей устаревшей конструкции не удовлетворяют современным требованиям по коэффициенту полезного действия и коэффициенту мощности. Большинство электромеханических преобразователей, по своему назначению являются морально устаревшими. Переход на электростатические преобразователи энергии, также как и замена реостатного пуска импульсным регулированием, являются одними из ключевых моментов повышения энергоэффективности существующего электроподвижного состава.*

*To date, most of the electromotive traction of railways requires modernization, energy efficiency options as electronic converters obsolete structures do not meet current requirements for efficiency and power factor. Most electromechanical transducers in its purpose is obsolete. Go to the electrostatic energy converters, as well as replacement rheostat start impulse control is one of the key points electromotive energy efficiency of existing stock.*

**Ключові слова:** перетворення, реостатного пуску, індуктивність дроселя, підвищення енергоефективності.

**Вступ.** У зв'язку зі стрімким розвитком силових повністю керованих електронних ключів таких як: IGBT-транзистори і GTO-тиристори, і конструюванням силових перетворювачів на їх основі, виникає проблема оптимального вибору матеріалу і конструкції силового дроселя. Магнітні характеристики сучасних матеріалів дозволяють значно зменшити втрати під час фільтрації вихідного сигналу широтно-імпульсної

© Черняк Ю. В., Ревчук М. О., Пилипенко А. Є., 2013

модуляції для досягнення допустимих відхилень від синусоїдальної форми напруги в перетворювачах змінного струму і коливань напруги в перетворювачах постійного струму.

**Аналіз проблеми.** Вимоги до дроселя залежать від конкретного місця застосування. Наприклад, для багатьох перетворювачів індуктивність дроселя може бути обрана більшою ніж потрібно за розрахунком. При цьому якість роботи перетворювача стає краще. Водночас дроселі для інвертуючих перетворювачів повинні мати певну, досить строго задану розрахунком, величину індуктивності. У таких випадках суттєве відхилення індуктивності від необхідної – як її зменшення, так і збільшення – призводить до небажаних режимів роботи ІСН, зайвих втрат і перевантажень напівпровідникових приладів.

**Розрахунок дроселя.** При виборі дроселя ключовим показником є індуктивність.

Якщо через котушку з сердечником протікає великий струм, то магнітний матеріал сердечника може увійти в насичення. При насиченні сердечника його відносна магнітна проникність різко зменшується, що тягне за собою пропорційне зменшення індуктивності. Зменшення індуктивності викликає подальше прискорене зростання струму дроселя тощо. У більшості перетворювачів насичення сердечника вскрай небажано і може призводити до таких негативних явищ:

- збільшений рівень втрат в матеріалі сердечника і збільшений рівень омичних втрат в проводі обмотки призводять до невиправдано низького ККД;
- додаткові втрати викликають перегрів дроселя, а також розташованих поблизу радіодеталей
- прискорено наростаючий струм викликає ударні струмові перевантаження ключів перетворювача, підвищені омичні втрати в ключах, їх перегрів і передчасний вихід з ладу;
- ненормально великі імпульсні струми тягнуть за собою перегрів електролітичних конденсаторів фільтрів живлення, а також збільшений рівень перешкод випромінюваних проводами і доріжками друкованої плати.

Зважаючи на викладене, слід уникати роботи сердечника в режимі насичення. Ферити входять в насичення, якщо величина щільності потоку магнітної індукції перевищує 300 мТ, причому ця величина не так вже дуже залежить від марки фериту. Тобто 300 мТ є властивістю саме феритів, інші магнітні матеріали мають інші величини порогу насичення. Наприклад, трансформаторне залізо і порошок залізо насичуються при величині щільності потоку магнітної індукції приблизно 1Т, тобто можуть працювати в набагато більш сильних полях. Величина щільності потоку магнітної індукції в сердечнику розраховується за такою формулою:

$$B = 1000 * m_0 * m_e * I * N / l_e \text{ (мТ)} \quad (1)$$

де  $m_0$  – абсолютна магнітна проникність вакууму,  $1,257 \times 10^{-3}$ , мкГн / мм;  $m_e$  – відносна магнітна проникність сердечника (не плутати з проникністю матеріалу сердечника);  $I$  – струм через обмотку, А;  $N$  – кількість витків в обмотці;  $l_e$  – довжина середньої магнітної лінії сердечника, мм.

Виходячи з формули (3) максимальний струм через дросель до того, як сердечник увійде в насичення.

$$I_{\text{макс}} = 0,001 * (b_{\text{макс}} * I) / (m_0 * m_e * N) \text{ (А)} \quad (2)$$

де  $b_{\text{макс}}$  – табличне значення, замість якого можна використовувати значення 300 мТ для будь-яких силових феритів. Після скорочень отримуємо:

$$I_{\text{макс}} = 0,001 * (b_{\text{макс}} * g) / (m_0 * N) \text{ (А)} \quad (3)$$

Звідси величина максимального струму через дросель із зазором визначається відношенням розміру зазору до кількості витків обмотки і не залежить від розмірів і типу сердечника. Однак це пояснюється просто. Феритовий сердечник настільки добре проводить магнітне поле, що все падіння напруженості магнітного поля припадає на зазор. При цьому величина потоку магнітної індукції, однакова і для зазору, і для сердечника, залежить лише від ширини зазору, струму через обмотку і кількості витків в обмотці і не повинна перевищувати 300 мТ для звичайних силових феритів. Для відповіді на питання, якої величини сумарний зазор  $g$  треба ввести в сердечник, щоб він витримав без насичення заданий струм, перетворимо вираз (3) до наступного вигляду:

$$g = (m_0 * I * N) / (0.001 * b_{\text{макс}}) \text{ (мм)}. \quad (4)$$

Тепер введемо в сердечник прокладку товщиною 1мм, зазор складе  $g = 2\text{мм}$ . Ефективна магнітна проникність зменшиться. Після нескладних розрахунків за формулою (4) визначаємо максимальний струм дроселя, він збільшився до 3,8А, тобто більш ніж в 5 разів. Однак не всі сердечники дозволяють вводити прокладки. Кільцеві сердечники виконані нероз'ємними, і замість того, щоб «регулювати» еквівалентну магнітну проникність за допомогою зазору, доводиться вибирати кільце з певною магнітною проникністю фериту.

Зазор в осерді дроселя грає виключно важливу роль. Оптимальним за вартістю матеріалом для створення дроселів без зазорів є залізо. Сердечники з заліза завдяки своїм унікальним магнітним властивостям, зокрема висока індукція насичення, і низькою вартістю є кращим матеріалом для застосування в згладжуючих дроселях, диференціальних мережевих фільтрах, коректорах коефіцієнта потужності та інших індуктивних елементах. Сердечники виготовляються на основі порошку оксиду заліза з органічним наповнювачем. Структура сердечника являє собою магнітопровід з розподіленим по всьому об'єму немагнітним зазором.

У деяких застосуваннях такі матеріали є альтернативою молібден-пермалоя.

*Таблиця 1. Порівняльні характеристики матеріалів*

Параметри, матеріал	Iron Powder Розпилене залізо	High Flux	Kool Mр, Sendust, Альсифер	MPP, молібден-пермалой	Ferrite, Феррит
Склад матеріалу	100% Fe	50% Fe, 50% Ni	85% Fe, 9% Si, 6% Al	81% Ni, 17% Fe, 2% Mo	MnZn.Fe oxide
Проникність	3-100	14-160	26-125	14-550	Визначається величиною зазору
Насичення	1,5 Тл	1,5 Тл	1,05 Тл	0,75 Тл	0,5 Тл
Потужність втрат на 100 КГц, 0,05 Тл, (мВт/см <sup>3</sup> )	800	260	200	120	0,5 Тл
Питома вартість	найнижча	висока	середня	висока	середня

## ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

Таблиця 2. Параметри матеріалів

Номер матеріалу	60 Гц	1 кГц	10 кГц	50 кГц	100 кГц	500 кГц	Проникність при $H_{oc}=4000$ А/м	
	0,5 Тл	0,15 Тл	0,05 Тл	0,0225 Тл	0,014 Тл	0,005 Тл	% $\mu$	Ефект
-2	19	32	32	28	19	12	100	10,0
-8	45	64	59	48	32	15	91	31,9
-14	19	32	32	29	21	17	100	14,0
-18	48	72	70	63	46	37	74	40,7
-19	31	60	72	71	54	49	74	40,7
-26	32	60	75	89	83	139	51	38,3
-30	37	80	120	149	129	129	91	20,0
-34	29	61	87	100	82	78	84	27,7
-35	33	73	109	137	119	123	84	27,7
-38	31	57	72	99	103	217	51	43,4
-40	29	62	93	130	127	223	62	37,2
-45	26	49	60	69	61	92	46	46,0
-52	30	56	68	72	58	63	59	44,3

-2/-14 – Матеріали з низькою початковою магнітною проникністю, застосовуються у високочастотних пристроях.

-8 – Матеріал з низькою потужністю втрат і хорошою лінійністю при високих струмах підмагнічування.

-18 – Цей матеріал так само як і -8 характеризується низькими втратами, при цьому має більш високу проникність і меншу вартість. Хороша характеристика насичення по постійному струму.

-19 – Недорога альтернатива -18 матеріалу, з такою ж проникністю і з трохи більшими втратами.

-26 – Один з найпопулярніших матеріалів, який добре підходить для використання в широкому діапазоні силових перетворювачів і для мережевих фільтрів.

-30 – Хороша лінійність, низька ціна, і відносно низька проникність цього матеріалу, робить його популярним в джерелах живлення.

-34/-35 – Недорогі матеріали, альтернатива «-8». Ці матеріали використовуються в пристроях де втрати на високих частотах не є критичними. Надійна лінійність з високим струмом підмагнічування.

-38 – Високопроникний матеріал, альтернатива -26. Суміш з низькою вартістю, відмінно підходить для пристроїв які працюють на мережевий частоті.

-40 – Дешева альтернатива 26-й суміші, використовується в основному для великих типорозмірів.

-45 – Матеріал з найбільшою початковою магнітною проникністю, альтернатива -52-й суміші, але характеризується набагато більшою потужністю втрат .

-52 – Матеріал характеризується набагато меншими втратами на високих частотах ніж у суміші -26 при однаковій проникності. Часто використовуються у високочастотних дроселях .

Для конструювання перетворювачів, зокрема для тягового рухомого складу, оптимально використовувати матеріал -52, у зв'язку з найменшими втратами.

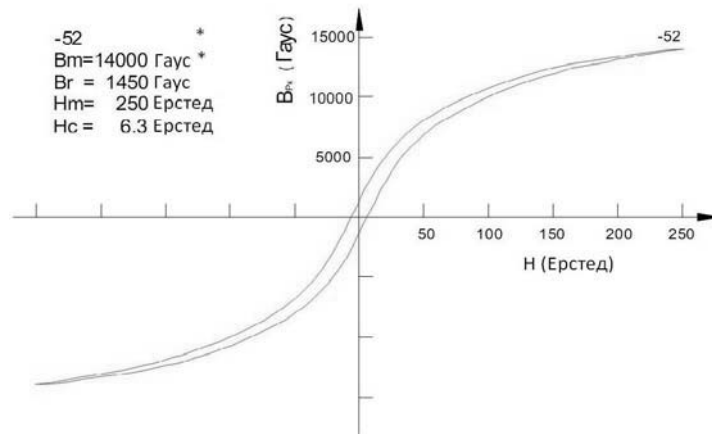
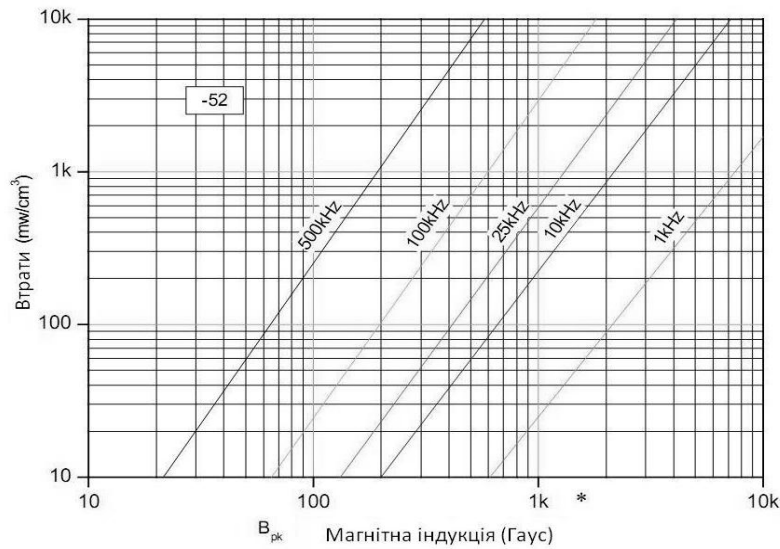


Рис. 1. Крива В-Н для матеріалу -52

Розрахунок потрібної кількості витків дроту N для досягнення бажаної індуктивності L виходячи з параметра  $A_L$  сердечника здійснюється за формулою:

$$N = \sqrt{\frac{L(nH)}{A_L \left(\frac{nH}{N^2}\right)}} \quad (5)$$



\* 1Тл=10000 Гаус

Рис. 2. Потужність втрат в осерді від величини індукції для -52

**Висновок.** Використовуючи інформацію подану у статті, авторами проводиться конструювання стенду широтно-імпульсного перетворювача. Був зроблений висновок про використання дроселя з порошкового заліза матеріалу 52 - Т650 -52, з дові-

дковим значенням  $A_L = 405 \text{ нН/Н}^2$  і габаритами  $D = 165,0 \text{ мм}$ ,  $d = 88,90 \text{ мм}$ ,  $h = 50,80 \text{ мм}$ .

Для необхідної індуктивності  $128 \text{ мкГн}$ , шляхом підставлення значень в формулу (7), було визначено кількість у 18 витків, які з легкістю укладаються в даний типорозмір сердечника без необхідності підбору немагнітного зазору в розрізних сердечниках.

Дана рекомендація для конструювання перетворювачів тягового рухомого складу, оптимально використовувати сердечники з розпиленого заліза з початковою магнітною проникністю  $75 \text{ Гн/м}$  і щільністю  $7 \text{ г/см}^2$ , у зв'язку з найменшими втратами для режимів роботи обладнання ЕРС.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Бамдас А. М., Савиновский Ю. А. Дроссели переменного тока радиоэлектронной аппаратуры Москва, Издательство «Советское радио», 1969.
2. Кузнецов А. Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания. // Схемотехника. – 2000. – №1. – С. 30 – 33.
3. Сидоров И. Н., Мукосеев В. В., Христинин. А. А. Малогабаритные трансформаторы и дроссели. – М.: Радио и связь, 1985. – 416 с.