

**А.В. Петров**

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

## **ЗГЛАДЖУЮЧИЙ РЕАКТОР З ОПТИМАЛЬНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**Вступ.** Як відомо, одним із шляхів підвищення ефективності роботи залізничного транспорту є розробка та впровадження ресурсо- та енергозберігаючих технологій та пристроїв. Це стосується усіх складових цього виду транспорту і, в першу чергу, системи електропостачання як джерела електроенергії, необхідного для нормального функціонування всієї залізниці в комплексі. Сьогодні на тягових підстанціях (ТП) постійного струму залізниць України застосовують громіздкі індуктивні реактори, які необхідні, по-перше, для згладжування вихідної випрямленої напруги та тягового струму [1], що, в свою чергу сприяє зниженню втрат електроенергії від їх вищих гармонійних складових, меншому впливу на суміжні з тяговою мережею (ТМ) лінії «низького струму», більш надійній роботі апаратури захисту та автоматики тощо. По-друге, для сповільнення часу зростання кривої струму короткого замикання і, тим самим, полегшення умов спрацьовування швидкодіючих автоматичних вимикачів. Найбільш розповсюдженим на сьогоднішній день є реактор типу РБФА-У. Він став типовим рішенням майже на всіх ТП постійного струму, які були встановлені на території сучасної України за радянських часів. Це обумовлене їх універсальністю, що проявлялася в швидкому отриманні необхідного рівня індуктивності на тій чи іншій ТП шляхом використання різної кількості типових блоків. Проте, останнім часом, коли кількість ТП збільшується не дуже великими темпами та загострилась боротьба за економію ресурсів і зниження втрат електроенергії, застосування радянського досвіду з використання громіздких реакторів РБФА-У не є припустимим. При цьому активізувалися дослідження з розробки реакторів з кращими техніко-економічними показниками.

**Основна частина.** Сучасне проектування нових ТП постійного струму має тенденцію на будівництво модульних тягових підстанцій. Такий підхід передбачає використання комплектних розподільчих пристроїв, які складають основу ТП, і дозволяє суттєво економити простір, на якому потрібно її спорудити. Сьогодні на ТП залізниць практикується встановлення реактора у закритій металевій камері. Для цього його необхідно максимально ефективно спроектувати як за геометричними розмірами та використанням матеріалів, так і за енергетичними характеристиками. Спрощений вигляд реактора наведено на рис. 1.

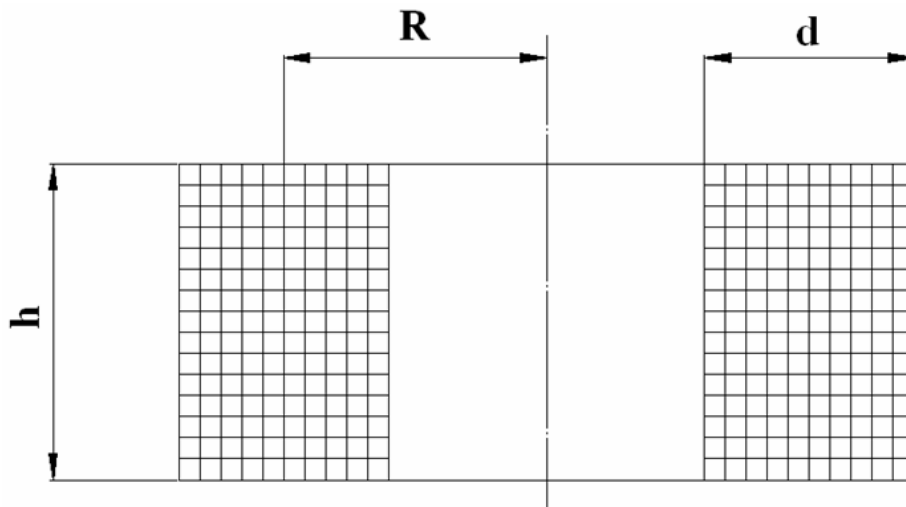


Рис. 1. Спрощений вигляд реактора

Задача виготовлення індуктивних котушок з високими економічними показниками вперше поставлена в роботах [2-3]. При проектуванні значної кількості котушок індуктивності на струми від 1 до 6 кА та індуктивність 1–10 мГн було співставлено різні рекомендації за їх розрахунками. Найбільш високу східність розрахунків за дослідними даними [4], а також можливість використання математичних методів аналізу дає формула:

$$L = \frac{0.32R_{cp}^2 W^2}{6R_{cp} + 9h + 10d} \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

де  $L$  – індуктивність котушки, Гн;  $R_{cp}$  – середній радіус котушки, см;  $W$  – число витків котушки;  $h$  – висота котушки, см;  $d$  – товщина обмотки котушки, см.

Формула (1) у довіднику приведена без конкретних рекомендацій, а в ній бачимо свободу вибору параметрів котушки, яку потрібно розрахувати на задану індуктивність. Однак, як це впливає нижче наведеного, від вибору параметрів залежать витрати матеріалів на таку котушку та її економічність. Знайдемо умови, при яких із проводу заданої довжини та перерізу може бути сконструйована котушка з максимальною індуктивністю.

Використаємо для аналізу формулу (1), замінивши в ній параметри. За основні змінні візьмемо довжину проводу, м ( $l$ ), переріз проводу, мм<sup>2</sup> ( $S$ ), кількість витків ( $W$ ), коефіцієнт заповнення обмоткового простору ( $K_{зан} = \frac{WS}{hd} \cdot 10^{-2}$ ), коефіцієнт форми котушки ( $K_{\phi} = \frac{hd}{(9h+10d)^2}$ ). Після заміни змінних та спрощення отримаємо:

$$L = \frac{0.8}{p^2} \cdot \frac{l^2}{3 \frac{l \cdot 10^2}{pW} + \sqrt{\frac{WS10^{-2}}{K_{зан} K_{\phi}}}}. \quad (2)$$

Нескладно встановити, що при інших рівних умовах максимальна індуктивність буде досягнута при найбільшому значенні  $K_\phi$ . Воно буде отримане при  $\frac{h}{d} = 1.1$  та буде дорівнювати  $K_{\phi \max} = 2.78 \cdot 10^{-3}$ .

При цьому значення  $K_{\phi \max}$  та заданих довжині та перерізу проводу індуктивність котушки буде залежати тільки від коефіцієнта заповнення обмоткового простору та від кількості витків. Знайдемо кількість витків, що відповідає максимуму індуктивності при будь-якому фіксованому значенні коефіцієнта заповнення обмоткового простору, відповідно до обраної конструкції котушки. Для цього покладемо  $\frac{dL}{dW} = 0$ . Звідки

$$W_{L \max} = 10^2 \sqrt[3]{\frac{36}{\rho^2} l^2 \frac{K_{зан} K_\phi}{S}}. \quad (3)$$

Підставимо у вираз (2) формулу (3) та значення  $K_{\phi \max}$ . Після спрощення отримаємо:

$$L_{opt} = L_{\max} = 6.12 \cdot 10^{-6} l^{5/3} \left( \frac{K_{зан}}{S} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Із рівнянь (3) та (4) визначаємо інші параметри при оптимальних умовах:

$$l_{opt} = 21.25 L^{3/5} \left( \frac{S}{K_{зан}} \right)^{1/5}; \quad (5)$$

$$W_{opt} = 166.1 L^{2/5} \left( \frac{K_{зан}}{S} \right)^{1/5}; \quad (6)$$

$$R_{opt} = 2.029 L^{1/5} \left( \frac{S}{K_{зан}} \right)^{2/5}; \quad (7)$$

$$h_{opt} = 0.667 R_{opt}; \quad (8)$$

$$d_{opt} = 0.6 R_{opt}. \quad (9)$$

Якщо для котушки, яку необхідно спроектувати, задано її опір постійному струму, то розрахунок стає ще більш визначеним. В цьому випадку опір проводу буде дорівнювати:

$$r = r \frac{l}{S} \text{ або } l = \frac{rS}{r} \text{ та } S = r \frac{l}{r},$$

де  $r$  – питомий опір в  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

Підставляючи ці залежності в рівняння (5), отримаємо

$$S_{opt} = 45.63 \left( \frac{r}{r} \right)^{5/4} \left( \frac{1}{K_{зан}} \right)^{1/4} L^{3/4}; \quad (10)$$

$$l_{opt} = 45.63 \left( \frac{r}{r} \right)^{1/4} \left( \frac{1}{K_{зан}} \right)^{1/4} L^{3/4}; \quad (11)$$

$$V_{opt} = 2080 \left( \frac{r}{r} \right)^{3/2} \left( \frac{1}{K_{зан}} \right)^{1/2} L^{3/2}; \quad (12)$$

$$R_{opt} = 9.357 \left( \frac{r}{r} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{K_{зан}} \right)^{1/2} L^{1/2}, \quad (13)$$

де  $V_{opt}$  – оптимальний об'єм проводу котушки, см<sup>3</sup>. Інші позначення ті ж самі.

Формули (10)-(13) дозволяють більш чітко та наглядно представити вплив на параметри котушки матеріалу ( $r$ ), що використовується, та різних конструктивних рішень ( $K_{зан}$ ).

Існуючі бетонні реактори, що використовуються у стаціонарних установках, мають крок намотки 35×45 мм. При проводі перерізом від 185 до 320 мм<sup>2</sup> це дає коефіцієнт заповнення обмоткового простору від 0,1174 до 0,203. Якщо, наприклад, підвищити коефіцієнт заповнення  $K_{зан}$  обмоткового простору в 3 рази, то при збереженні незмінним опору котушки витрата матеріалу на них буде знижена в  $\sqrt{3}$  раз. Низькі коефіцієнти заповнення обмоткового простору існуючих конструкцій звичайно не дозволяють виготовити котушку із оптимальним співвідношенням параметрів. Як правило, в цих конструкціях зменшений радіус намотки реактора та збільшене відношення  $\frac{h}{d}$ . Отже, задача створення мало-

габаритних та високо економічних котушок індуктивності зводиться до вибору конструкції котушки, при якій буде забезпечено найвищий коефіцієнт заповнення  $K_{зан}$  обмоткового простору. Розглянемо цю задачу.

Для досягнення високого значення  $K_{зан}$  передусім відмовимося від традиційного виконання котушок круглим проводом та перейдемо до використання спеціальних проводів прямокутного перерізу із транспозицією жил. При постійному струмі можливе виконання котушок голими шинами. Одночасно відмовимося від використання бетону у як конструктивного матеріалу.

При проводі прямокутного перерізу котушки можуть виготовлятися у вигляді дисків або циліндрів. Так як реактори в основному проектують на значні струми, а отже, і великі перерізи проводів, то дискові котушки в цьому випадку з технологічних причин використовувати більш доцільно, ніж циліндричні. При групуванні дисків з голих шин виконаємо по два транспозиційних з'єднання з внутрішньої сторони дисків ще при намотці котушок. В цьому випадку монтажні з'єднання котушок будуть виконуватися тільки з їх зовнішньої сторони. Кріплення дисків виконуємо бандажами із діелектричної стрічки. Ці ж бандажі використаємо як дистанційні прокладки між дисками. Кількість дистанційних прокладок уточнюється за міцнісним розрахунком.

При збереженні втрат в малогабаритних котушках на рівні існуючих подібних пристроїв густина струму не повинна перевищувати  $1-2 \text{ А/мм}^2$  для алюмінію та  $3-4 \text{ А/мм}^2$  – для міді [3].

**Результати чисельних розрахунків.** Користуючись вищенаведеними рекомендаціями та формулами, спроектуємо в першому наближенні реактор для комплектної тягової підстанції постійного струму з оптимальним співвідношенням параметрів, тобто таким, при якому із виконанням умов мінімальних габаритів зберігаються виконаними також і умови мінімізації втрат електроенергії та витрату матеріалу.

За вихідні дані були прийняті: номінальна напруга 3 кВ; максимальна напруга реактора 8 кВ; номінальний струм 6500 кА; індуктивність 5,5 мГн.

Згідно з формулами (5)...(9) був розрахований реактор з наступними параметрами:

- середній радіус 900 мм;
- висота 600 мм;
- товщина обмотки 550 мм;
- кількість витків 55;
- кількість дисків 11;
- кількість витків у диску 5;
- відстань між витками в диску 6 мм;
- відстань між дисками в реакторі 16 мм.

Порівняння характеристик реактора РБФА-У з вище спроектованим подано у таблиці.

Тип	Номінальна напруга, кВ	Номінальний струм, А	Габаритні розміри, мм						Дані обмотки				Маса намоткового матеріалу, кг				
			Індуктивність, мГн		Зовнішній діаметр		Внутрішній діаметр		Діаметр по осях ізоляторів	Висота		Тип та довжина обмоткового проводу, м		Число паралельних віток	Число проводів у пазу	Число витків у ряду	Число горизонтальних рядів
			По бетону	По проводу	По бетону	По проводу	По бетону	По проводу		По бетону	По проводу						
РБФА-У-6500/3000 (два блока)	3,3	6500	5,5	2540	2438	1590	1500	2000	2700	2240	А-240, 5600	4	4	8	28	6400	

Малогобаритний ре- актор	8	6500	5,5	-	2350	-	700	1800	-	600	ПАТ-12,5×40, 2000	6	1	5	11	5600
-----------------------------	---	------	-----	---	------	---	-----	------	---	-----	-------------------	---	---	---	----	------

**Висновки.** Отже, на сьогодні навіть в таких нескладних, але важливих пристроях, як згладжуючі реактори, існують шляхи підвищення їх техніко-економічних характеристик. Це досягається можливістю проведення для них розрахунків за оптимальними умовами та параметрами і дає змогу знизити як витрати на виробництво, так і втрати електроенергії. У порівнянні з реакторами, що застосовуються сьогодні, економія намоткового матеріалу в реакторах з оптимальними параметрами становить більше 10%. В стільки ж разів знижуються і втрати електроенергії, при умові однакової перепускної спроможності по струму. Тому проектування згладжуючих реакторів для нових ТП постійного струму або у випадку заміни старих необхідно виконувати із застосуванням вищенаведених рекомендацій.

#### Список літератури

1. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник для техникумов – М.: Желдориздат, 2001. – 512с.
2. Ансберг Г.А. Переходные процессы в выпрямительных установках электровозов. – М.: Транспорт, 1966. – 144 с.
3. Ансберг Г.А. Проектирование реакторов //Тр. ДИИТ. – 1968. – Вып. 77. – С.3-21.
4. Электротехнический справочник: В 3-х т. Том 2. Электротехнические изделия и устройства/Под общ. ред. В.Г.Герасимова, И.Н. Орлова и др.– 7-е изд., исправл. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 518 с.
5. Стернин В.Г., Карпенский А.К. Токоограничивающие реакторы. – М.: Энергия, 1965. – 256 с.