

*Т.М. Міщенко, канд. техн. наук, В.О. Браташ, д-р техн. наук
(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет
Залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна)*

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАЛОГАБАРИТНОГО ІНДУКТИВНОГО ШУНТА ДЛЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Великі значення амплітуд струмів тягових двигунів у перехідних аварійних режимах роботи електровоза постійного струму ДЕ 1 обумовлені малою величиною індуктивності $L_{ш}$ індуктивних шунтів типу ІШ-87 Д [1], величина $L_{ш}$ яких складає лише $4 \cdot 10^{-3}$ Гн на послідовно з'єднані обмотки збудження двох тягових двигунів (ТЕД). За нашою думкою, значення $L_{ш}$ повинно бути збільшене щонайменше у 2...2,5 рази. Дійсно, як показують розрахунки [2], при $L_{ш} = 8 \cdot 10^{-3}$ Гн максимальне значення струму якоря знижується до $1695 \text{ А} = 3I_{ном}$, тобто до значення, безпечного для тягового двигуна, оскільки виникнення колового вогню по колекторі двигуна можливо при $(4...4,5)I_{ном}$ [3, 4].

Отже, одним із заходів зниження струмових перевантажень у аварійних режимах є збільшення індуктивності індуктивних шунтів [2]. Але збільшення до необхідних величин індуктивності $L_{ш}$ існуючих на електровозах індуктивних шунтів ІШ-87Д обумовлює суттєве зростання їх габаритів і маси. Вже при $L_{ш} = 4 \cdot 10^{-3}$ Гн індуктивний шунт ІШ-87Д має достатньо великі габаритні розміри (515 x 655 x 605) та масу 565 кг.

Методика та чисельні розрахунки

Виходячи з вищезазначеного, потрібна розробка методики розрахунку параметрів малогабаритного, маловагового індуктивного шунта на основі шихтованого магнітопровода зі стрічкової сталі, яка не насичується, що й здійснюється в цій роботі.

Алгоритм цієї методики викладено далі для індуктивного шунта тягового двигуна ЕД 141У1 електровоза ДЕ 1 і полягає у наступному.

1. Величину $L_{ш}$ визначаємо в залежності від індуктивності обмотки збудження $L_з$ тягового двигуна зі співвідношення [5, с.45]

$$L_{ш} = 0,6L_з.$$

З огляду на те, що для двигуна ЕД 141У1 величина $L_з = 4,9 \cdot 10^{-3}$ Гн, а індуктивний шунт увімкнено на дві обмотки збудження, то попередньо

$$L_{ш} = 0,6 \cdot 2 \cdot 4,9 \cdot 10^{-3} = 5,88 \cdot 10^{-3} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

2. Максимальний [6] (номінальний [5]) струм індуктивного шунта дорівнює

$$I_{ш} = I_{трив} (1 - \beta_{\min}),$$

де $I_{трив}$ – тривалий струм ТЕД, рівний 520 А; β_{\min} – мінімальний коефіцієнт послаблення збудження, рівний 0,43.

Тоді

$$I_{ш} = 520(1 - 0,43) = 296,4 \approx 300 \text{ А.}$$

3. Магнітну індукцію в сталі $B_{ст}$ магнітопроводу приймають не більше 1,6 Тл [5, с.47]; прийемо, що $B_{ст} = 1,35 \text{ Тл}$.

4. Співвідношення геометричних розмірів перерізу магнітної системи шунта задають у межах 1,5...2,2 [5]; прийемо це співвідношення рівним 2. Тоді приймаємо, що магнітопровід намотують зі сталеві стрічки сталі 3423 (Э360) з наступними розмірами поперечного перерізу (рис. 1): $a = 80 \text{ мм}$, $b = 160 \text{ мм}$.

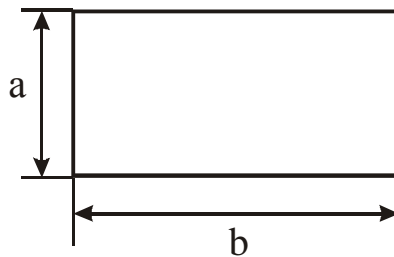


Рис. 1. Геометричні розміри поперечного перерізу магнітопроводу

Тоді площа поперечного перерізу сталі (магнітопроводу) дорівнює:

$$S_{ст} = a \cdot b = 80 \cdot 160 = 12800 \text{ мм}^2 = 12,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

5. Число витків W_{κ} однієї котушки знаходимо відповідно до відомого [7] виразу магнітного поточосцеплення котушки:

$$\Psi_{\kappa} = W_{\kappa} \Phi_{ст} = L_{\kappa} I_{ш}.$$

Звідки

$$W_{\kappa} = \frac{L_{\kappa} I_{ш}}{\Phi_{ст}} = \frac{L_{\kappa} I_{ш}}{B_{ст} S_{ст} K_3},$$

де L_{κ} – індуктивність, що попередньо розрахована для однієї котушки; $K_3 = 0,93$ – коефіцієнт заповнення пакета сталлю.

Тоді

$$W_{\kappa} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 300}{1,35 \cdot 12,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,93} = 56 \text{ витков.}$$

6. Поперечний переріз повітряного проміжку знаходимо за формулою [8, с.366]

$$S_{\delta} = (a + \delta)(b + \delta),$$

де $\delta = 8$ мм – попередньо прийнятий розмір одиничного повітряного проміжку.

Тоді

$$S_{\delta} = (80 + 8)(160 + 8) \approx 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

7. Індукція в повітряному проміжку

$$\begin{aligned} B_{\delta} &= \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}} = \frac{\Phi_{cm}}{S_{\delta}} = \frac{B_{cm} \cdot S_{cm}}{S_{\delta}} = \\ &= 1,35 \cdot \frac{12,8 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} = 1,15 \text{ Тл,} \end{aligned}$$

де $\Phi_{\delta} = \Phi_{cm} = B_{cm} \cdot S_{cm}$ – магнітний потік, що протікає у сталі і повітряному проміжку магнітопроводу.

8. Сумарний повітряний зазор δ_{Σ} визначаємо, виходячи з рівняння Кірхгофа для магнітного кола дроселя:

$$H_{cm} \cdot l_{cm} + H_{\delta} \cdot \delta_{\Sigma} = I_{uu} \cdot W_{\kappa},$$

де H_{cm} , H_{δ} – напруженість магнітного поля відповідно в сталі і в повітряному проміжку; l_{cm} – середня довжина магнітної лінії в сталі дроселя.

З огляду на, те що $H_{cm} \ll H_{\delta}$, у першому наближенні нехтуємо падінням магнітної напруги в сталі $H_{cm} \cdot l_{cm}$, тоді сумарний повітряний проміжок дорівнює

$$\begin{aligned} \delta_{\Sigma} &= \frac{I_{uu} \cdot W_{\kappa}}{H_{\delta}} = \frac{I_{uu} \cdot W_{\kappa} \cdot \mu_0}{B_{\delta}} = \\ &= \frac{300 \cdot 56 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{1,15} = 18,3 \text{ мм.} \end{aligned}$$

9. Кількість одиничних повітряних проміжків

$$n_{\delta} = \frac{\delta_{\Sigma}}{\delta} = \frac{18,3}{8} = 2,28,$$

приймаємо 2 проміжки по 9 мм.

10. Перевірка отриманої величини індуктивності однієї котушки за формулою [7, с. 399]

$$L_{\kappa} = \frac{\mu_0 \cdot S_{\delta} \cdot W_{\kappa}^2}{\delta_{\Sigma}},$$

отримуємо

$$\begin{aligned} L_{\kappa} &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 56^2}{18 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 3,693 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 3,693 \text{ мГн}. \end{aligned}$$

Тоді індуктивність індуктивного шунта буде

$$L_{ш} = 2 \cdot 3,693 = 7,386 \text{ мГн},$$

приймаємо $L_{ш} = 8 \text{ мГн}$.

11. Визначаємо густину струму в провідниках котушки. Приймаємо провід марки ЛЕНП з перерізом $S_{np} = 7,2 \times 11,1 = 79,92 \text{ мм}^2$ (рис. 2).

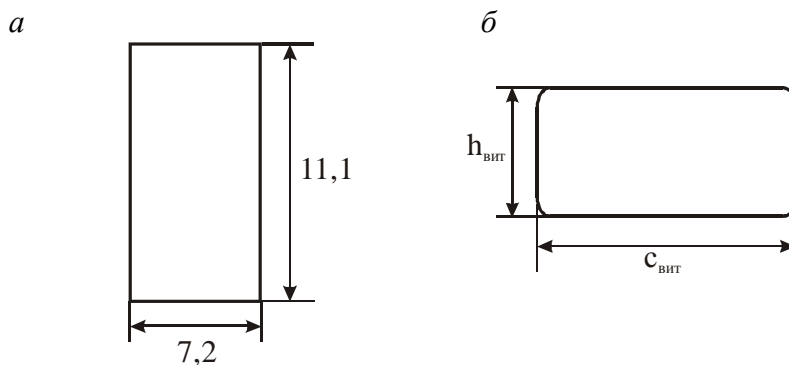


Рис. 2. Геометричні розміри перерізу провода ЛЕНП

Товщина шара ізоляції провода $d_{із} = 0,11 \text{ мм}$. Тоді розміри перерізу провода:

$$11,1 + 0,11 \cdot 2 \cdot 2 = 11,54 \text{ мм},$$

$$7,2 + 0,11 \cdot 2 \cdot 2 = 7,64 \text{ мм},$$

а густина струму в проводах витка

$$J_{\text{вум}} = \frac{I_{\text{ш}}}{S_{\text{пр.вум}}} = \frac{300}{79,92} = 3,75 \text{ А/мм}^2.$$

12. Визначаємо геометричні розміри дроселя (рис. 3)

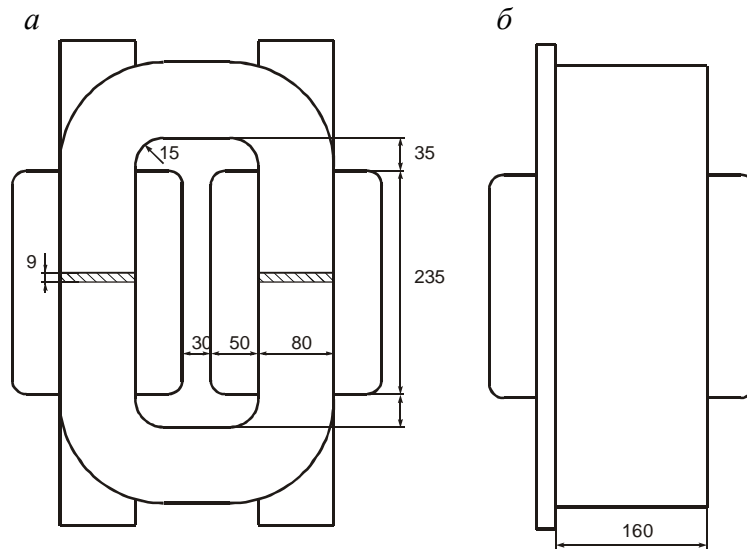


Рис. 3. Геометричні розміри індуктивного шунта

На кожному стрижні встановлюємо по одній котушці з кількістю витків $W_{\kappa} = 56$ витків.

Висота витка (рис. 2, б)

$$\begin{aligned} h_{\text{вум}} &= 7,2 \cdot 1 + d_{\text{із}} = \\ &= 7,2 \cdot 1 + 0,11 \cdot 2 \cdot 2 = 7,64 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Ширина витка (рис. 2, б)

$$\begin{aligned} c_{\text{вум}} &= 11,1 \cdot 1 + d_{\text{із}} = \\ &= 11,1 \cdot 1 + 0,11 \cdot 2 \cdot 2 = 11,54 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Приймаємо, що кожна (із двох) котушок намотується в 2 шари по 28 витків у шарі ($W_{\text{сл}} = 28$ витков).

Тоді висота котушки (рис. 3, а)

$$\begin{aligned} H_{\kappa} &= [(W_{\text{сл}} + 1) \cdot h_{\text{вум}} + d_{\text{із}}] \cdot K_{\text{расп}} = \\ &= [(28 + 1) \cdot 7,64 + 0,4 + 0,11 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 + 0,4] \cdot 1,045 = \\ &= 233,3 \text{ мм} \approx 235 \text{ мм,} \end{aligned}$$

де $K_{\text{расп}} = 1,045$ – коефіцієнт, що враховує розпушення витків за висотою котушки.

Товщина (намотування) котушки (рис. 3, а)

$$\begin{aligned}
 D_{\kappa} &= (c_{\text{вум}} \cdot 4 + d_{\text{із}}) \cdot K_{\text{росн}} = \\
 &= (11,54 \cdot 4 + 0,4 + 0,11 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 + 0,4) \cdot 1,045 = \\
 &= 49,99 \approx 50 \text{ мм.}
 \end{aligned}$$

Основні розміри дроселя (індуктивного шунта) подані на рис. 3.

13. Визначаємо загальну масу індуктивного шунта. Для цього спочатку знайдемо середню довжину магнітної силової лінії згідно з рис. 3:

$$\begin{aligned}
 l_{\text{ст.ср}} &= 265 \cdot 2 + 30 \cdot 2 + 2\pi \cdot 20 \cdot 4 = \\
 &= 1092 \text{ мм} = 1,092 \text{ м.}
 \end{aligned}$$

Тоді маса сталі магнітопроводу

$$\begin{aligned}
 G_{\text{ст}} &= V_{\text{ст}} \cdot g_{\text{ост}} = S_{\text{ст}} \cdot l_{\text{ср.ст}} \cdot g_{\text{ост}} = \\
 &= 12,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,092 \cdot 7,6 \cdot 10^3 = 106,2 \text{ кг,}
 \end{aligned}$$

де $g_{\text{ост}} = 7,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – питома вага сталі.

Середня довжина витка котушки

$$l_{\text{ср.вум}} = 2 \cdot 84 + 2 \cdot 166 + \pi \cdot 46 = 644,4 \text{ мм.}$$

Маса міді котушки

$$\begin{aligned}
 G_{\text{мк}} &= S_{\text{пр.вум}} \cdot l_{\text{ср.вум}} \cdot W_{\kappa} \cdot g_{\text{м}} = \\
 &= 79,92 \cdot 10^{-6} \cdot 0,644 \cdot 56 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 25,65 \text{ кг.}
 \end{aligned}$$

Маса міді всього шунта

$$G_{\text{м}} = 2 \cdot 25,65 = 51,3 \text{ кг.}$$

Тоді загальна маса індуктивного шунта зі стрічковим осердям на два двигуни

$$\begin{aligned}
 G_{\text{ш}} &= (G_{\text{ст}} + G_{\text{м}}) \cdot 1,05 = \\
 &= (106,2 + 51,3) \cdot 1,05 = 165 \text{ кг.}
 \end{aligned}$$

Загальна ж маса індуктивного шунта ІШ-87Д на один двигун дорівнює:

$$\begin{aligned}
 G_{\text{ш ІШ-87Д}} &= (G_{\text{ст ІШ-87Д}} + G_{\text{м ІШ-87Д}} \cdot n_{\kappa \text{ ІШ-87Д}}) \cdot 1,05 = \\
 &= (153,3 + 26,7 \cdot 8) \cdot 1,05 = 367 \text{ кг.}
 \end{aligned}$$

де $G_{cm III-87D} = 153,3$ кг – маса магнітопровода; $G_{mk III-87D} = 26,7$ кг – маса катушки; $n_k III-87D = 8$ – кількість катушок.

14. Визначаємо основну робочу характеристику шунта, тобто залежність його динамічної індуктивності $L_{ш.д}$ від струму навантаження (рис. 4).

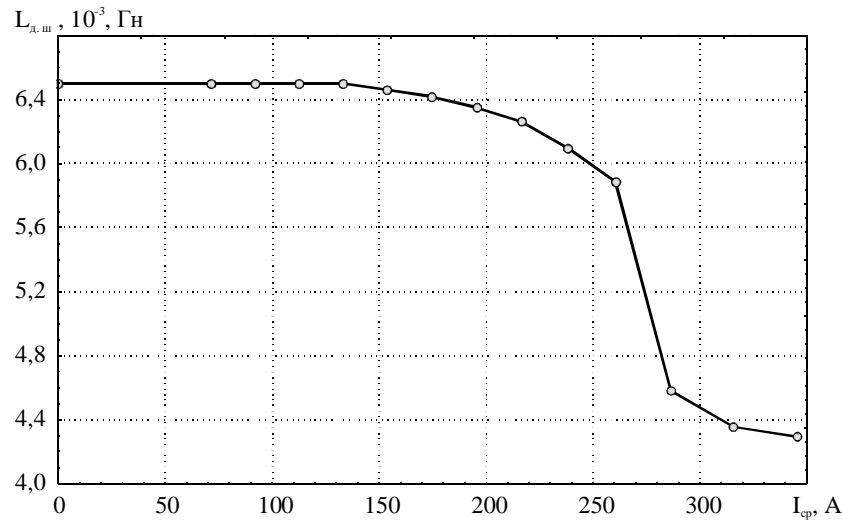


Рис. 4. Залежність динамічної індуктивності шунта від струму в ньому

Як відомо [7, 8], у загальному випадку динамічну індуктивність визначають за виразом

$$L_{ш.д} = \frac{d\Psi}{dI} = W_k \frac{d\Phi}{dI} \approx W_k \frac{\Delta\Phi}{\Delta I},$$

де $\Delta\Phi$, ΔI – кінцеві прирости магнітного потоку і струму в ряді точок залежності $I(\Phi)$. Останню одержимо, склавши рівняння за другим законом Кірхгофа для магнітного кола (рис. 3):

$$H_{cm} \cdot l_{cm.sp} + R_{m\delta} \cdot \Phi = W_k \cdot I,$$

де $R_{m\delta}$ – магнітний опір повітряного проміжку, рівний

$$R_{m\delta} = \frac{\delta_{\Sigma}}{\mu_0 \cdot S_{\delta}}.$$

Тоді

$$I = \frac{H_{cm} \cdot l_{cm.sp}}{W_k} + \frac{\delta_{\Sigma} \cdot \Phi}{\mu_0 \cdot S_{\delta} \cdot W_k}$$

чи після підстановки числових даних маємо

$$I = \frac{1,092}{56} H_{cm} + \frac{18 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 56} \Phi =$$

$$= 19,5 \cdot 10^{-3} H_{cm} + 17061 \Phi.$$

Далі виконуємо чисельні розрахунки (див. таблицю) залежності $I(\Phi)$ за останньою формулою, задаючись значеннями магнітної індукції B в сталі шунта.

Чисельні розрахунки індуктивності шунта

B , Тл	$\Phi \cdot 10^{-3}$, Вб	H_{cm} , А/м	$19,5 \times$ $\times 10^{-3} \times$ $\times H_{cm}$, А	$17061 \cdot \Phi$, А	I , А	ΔI , А	$\Delta \Phi \times$ $\times 10^{-3}$, Вб	$L_{ш.д} \cdot 10^{-3}$, Гн	I_{cp} , А
0,3	3,571	20	0,39	60,9	61,3	20,5	1,19	6,502	71,57
0,4	4,762	30	0,585	81,2	81,8	20,5	1,19	6,502	92,07
0,5	5,952	40	0,78	101,5	102,3	20,5	1,19	6,502	112,57
0,6	7,142	50	0,975	121,8	122,8	20,5	1,19	6,502	133,08
0,7	8,333	60	1,17	142,1	143,3	20,7	1,19	6,441	153,68
0,8	9,523	80	1,56	162,47	164,03	21,1	1,19	6,322	174,58
0,9	10,714	120	2,34	182,78	185,12	20,9	1,19	6,381	195,57
1,0	11,904	150	2,925	203,09	206,02	21,3	1,19	6,264	216,66
1,1	13,094	200	3,9	223,4	227,3	21,9	1,19	6,096	238,24
1,2	14,285	280	5,46	243,7	249,17	22,6	1,19	5,886	260,50
1,3	15,475	400	7,8	264,02	271,82	29,08	1,19	4,584	286,36
1,4	16,666	850	16,575	284,33	300,90	29,08	1,19	4,584	315,45
1,5	17,856	1300	25,35	304,64	329,99	31,03	1,19	4,296	345,51
1,6	19,046	1850	36,075	324,95	361,02			4,185	375,57

На рис. 4 за даними двох основних стовпців побудовано залежність динамічної індуктивності шунта від струму в ньому.

Висновок

1. Запропоновано ефективну методику параметрів малогабаритного, малогазового індуктивного шунта на основі шихтованого магнітопроводу зі стрічкової сталі.

2. Індуктивний шунт зі стрічковим осердям з $L_{ш} = 6,5 \cdot 10^{-3}$ Гн має габаритні розміри приблизно в 2,5 раза менші у порівняно з існуючим індуктивним шунтом ІШ-87Д з $L_{ш} = 4 \cdot 10^{-3}$ Гн.

3. При встановленні чотирьох шунтів на електровоз ДЕ 1 (по одному на кожні два двигуни) потрібно: 424,8 кг сталі та 106,6 кг міді при встановленні індуктивного шунта зі стрічковим осердям; 613,2 кг сталі та 854,4 кг міді при встановленні індуктивного шунта типу ІШ-87Д.

Список літератури

1. Мищенко Т.Н. Математическое моделирование влияния толчков случайной функции напряжения на токоприемнике на переходные электромагнитные процессы в электровозе ДЭ 1// Вісник ДНУЗТ. – 2005. – Вип. 9. – С. 61-68.
2. Мищенко Т.Н. Некоторые рекомендации по дополнительной защите от токовых перегрузок силовой тяговой электрической цепи электровоза ДЭ 1// Вісник ДНУЗТ. – 2007. – Вип. 14. – С. 64-66.
3. Клейменов В.В., Золотарев П.А., Назикян А.Г. Использование электронной вычислительной машины для исследования переходных процессов в цепи тяговых электродвигателей //Электровозостроение. –1964. –Том 4. – С. 14-27.
4. Хоменко Б.И., Логинов И.Я. Нестационарные токовые режимы в силовой цепи электровоза ВЛ 80К при тяге //Электровозостроение. –1966. –Том 7. – С. 23-26.
5. Проектирование систем управления электроподвижным составом/ Н.А. Ротанов, Д.Д. Захарченко, А.В. Плакс, В.И. Некрасов, Ю.М. Иньков; Под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1986. – 327с.
6. Шунт индуктивный ИШ-87Д. Расчет параметров 6ТП.271.087 РР. – Д.: 1993. – 4 с.
7. Теоретические основы электротехники. / К.С. Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – М.–С.Пб., 2004. – 576 с.
8. Сукачев А.П. Теоретические основы электротехники. – Харьков: Изд-во гос. ун-та, 1956. – Ч. 1. – 459 с.