

Т.М. Міщенко, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна)

ВПЛИВ НАПРУГИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ НА ПЕРЕХІДНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ В СИЛОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОВОЗА ДЕ-1

Дослідження перехідних електромагнітних процесів у тягових електродвигунах (ТЕД) при різних аварійних режимах необхідні для визначення припустимих значень їх струмів та вибору оптимальних засобів захисту від переважень. В існуючих публікаціях [1 – 4], присвячених цьому питанню, не відображено врахування нелінійностей елементів тягових електродвигунів. При експлуатації електровозів ДЕ-1 на залізницях України виникли питання, пов'язані з погіршенням комутаційних та потенційних умов на колекторах тягових двигунів. Тому отримання результатів розрахунку перехідних електромагнітних величин є задачею не тільки актуальною, бо перехідні процеси для цього електровозу не були досліджені, але і корисною для використання заводами виробниками при доробці конструкції першого українського електровозу ДЕ-1.

Найбільш часто зустрічаються при експлуатації електрорухомого складу два аварійних режими: пробій на землю (тобто зовнішнє коротке замикання) і перекид по колектору (внутрішнє коротке замикання).

У цій статті розглядається зовнішнє коротке замикання. Схема заміщення тягового електродвигуна ЕД141 У1 електровоза представлена на рис. 1, а схема заміщення однієї секції електровоза ДЕ-1 при зовнішньому короткому замиканні подана на рис. 2. Аналізуються процеси у режимі тяги на паралельному з'єднанні тягових двигунів (ТЕД).

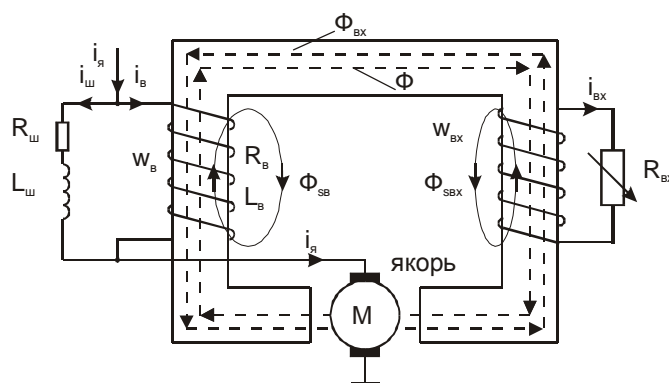


Рис. 1. Електромагнітна схема заміщення тягового двигуна ЕД141 У1.

З урахуванням зазначених вище зауважень математична модель електромагнітних процесів приймає вигляд:

$$i_{я1} - i_{кз} - i_{я2} = 0, \quad (1)$$

$$i_{я1} = i_{я},$$

$$i_{я2} - i_3 - i_{и} = 0, \quad (2)$$

$$W_3 i_3 + W_{exp} i_{exp} = W_3 i_m,$$

або при умові, що $W_3 = W_{exp}$,

$$i_3 + i_{exp} = i_m; \quad (3)$$

$$R_я i_{я1} + L_я \frac{di_{я1}}{dt} + C_w w \Phi(t) = U; \quad (4)$$

$$-2R_3 i_3 - 2 \cdot 2 p s w_3 \frac{d\Phi}{dt} + R_{и} i_{и} + L_{и} \frac{di_{и}}{dt} = 0; \quad (5)$$

$$2s w_3 \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{exp}(t) i_{exp} = 0; \quad (6)$$

$$R_{я1} i_{я1} + L_я \frac{di_{я1}}{dt} + 2C_w w \Phi(t) + R_{я2} i_{я2} + L_я \frac{di_{я2}}{dt} + 2R_3 i_3 + 2 \cdot 2 p s w_3 \frac{d\Phi}{dt} = U. \quad (7)$$

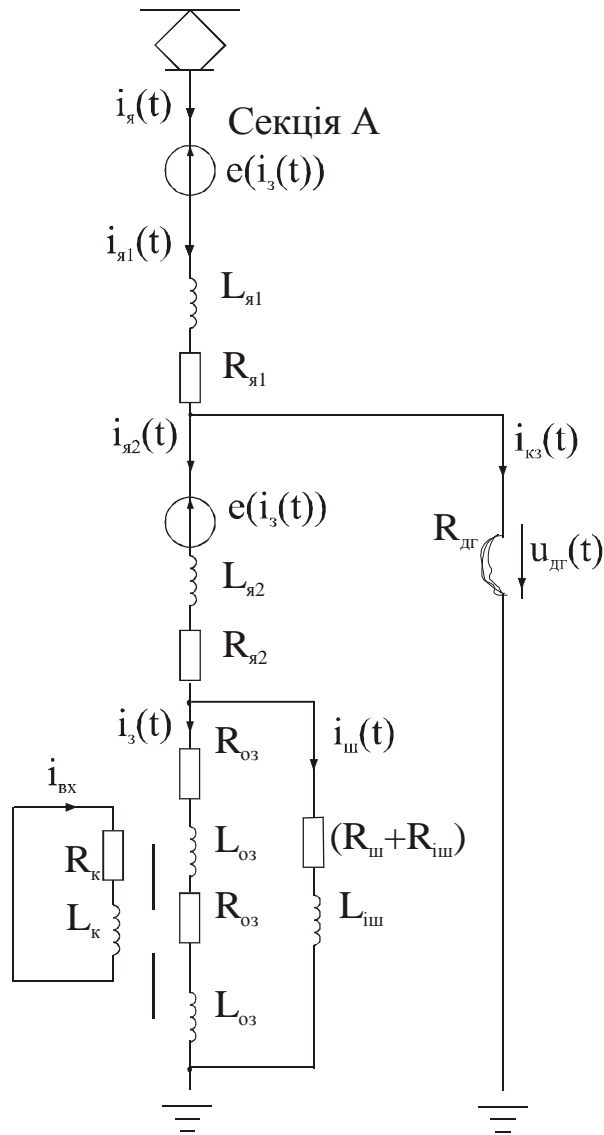


Рис. 2. Схема заміщення електровоза ДЕ-1 при зовнішньому короткому замиканні

Після спрацьовування швидкодіючого вимикача (ШВ) електровоза, тобто коли $i_{я1}(t) = i_{я}(t) = 0$ і $U = 0$, математична модель спрощується до рівнянь:

$$i_{я2} - i_3 - i_{шт} = 0; \quad (8)$$

$$i_3 + i_{exp} = i_m; \quad (9)$$

$$-2R_3 i_3 - 2 \cdot 2p s w_3 \frac{d\Phi}{dt} + R_{шт} i_{шт} + L_{шт} \frac{di_{шт}}{dt} = 0; \quad (10)$$

$$2s w_3 \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{exp}(t) i_{exp} = 0; \quad (11)$$

$$R_я i_{я2} + L_{я2} \frac{di_{я2}}{dt} + C_w w \Phi(t) + 2R_3 i_3 + 2 \cdot 2p s w_3 \frac{d\Phi}{dt} = 0, \quad (12)$$

де $i_{я1}$, $i_{я2}$, i_3 , $i_{ш}$, i_{ex} , $i_{кз}$ – струми якоря відповідно у першому двигуні і другому двигунах, в обмотці збудження, шунтувальному контурі, вихровий струм та струм в короткозамкненому контурі; $R_{\partial z}$ – активний опір в дузі, який складає 2...3 % від напруги в мережі; $R_я$ – активний опір якоря; R_{O3} – активний опір обмотки збудження; $R_{ш}$ – активний опір шунта; $R_{iш}$ – активний опір власне шунта; R_{ex} – активний опір вихрового контура, що, згідно з [5] розраховується за формулою:

$$R_{ex}^{HK}(t) = \frac{6w_3}{\sigma_3 A \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{HP}}} \right)};$$

$L_я$ – індуктивність обмотки якоря; $L_{iш}$ – індуктивність шунта; L_{O3} – індуктивність обмотки збудження; $L_к$ – індуктивність вихрового контура; σ_3 , σ_{ex} та w_3 , w_{ex} – коефіцієнти розсіювання та число витків відповідно обмотки збудження (головних полюсів) та контура вихрових струмів; i_{μ} – струм намагнічування станини, який є нелінійною функцією основного магнітного потоку Φ (рис. 2):

$$i_{\mu} = 33,601 - 2536,387\Phi(t) + 2,518 \cdot 10^5 \Phi^2(t) - 4,031 \cdot 10^6 \Phi^3(t) + 2,269 \cdot 10^7 \Phi^4(t);$$

$i_{я1}$ – струм у замкненому дугою контурі; $i_{я2}$ – струм в якорі другого двигуна; Φ_{sg} , Φ_{sgg} – магнітні потоки відповідно в станині, розсіювання в обмотці збудження, та у вихровому контурі.

Систему нелінійних рівнянь (1) – (7), (8) – (12) розраховували чисельно для різних значень напруги в контактній мережі, для номінальних початкових умов вхідного струму та при різних ступені послаблення поля (рис. 3).

У розглянутому режимі короткого замикання (рис. 2) якір першого двигуна до вимикання ШВ працює у різко небезпечному режимі, оскільки знаходиться під повною напругою контактної мережі. Цим і обумовлюється швидке (за 1,5...2,5 мс залежно від напруги) зростання його струму $i_{я1}(t)$ до уставки ШВ, яка дорівнює 2500 А (рис. 3, а і табл. 1). При цьому швидкість зростання $i_{я1}(t)$ вище при більш високій напрузі в контактній мережі, наприклад, від $0,86 \cdot 10^6$ А/с при $U = 2700$ В до $1,29 \cdot 10^6$ А/с при $U = 3980$ В у режимі послаблення збудження ПЗ-4.

Зовсім інакше змінюється струм в якорі другого двигуна. Внаслідок короткого замикання ділянка з цим якорем не живиться від контактної мережі. Тоді

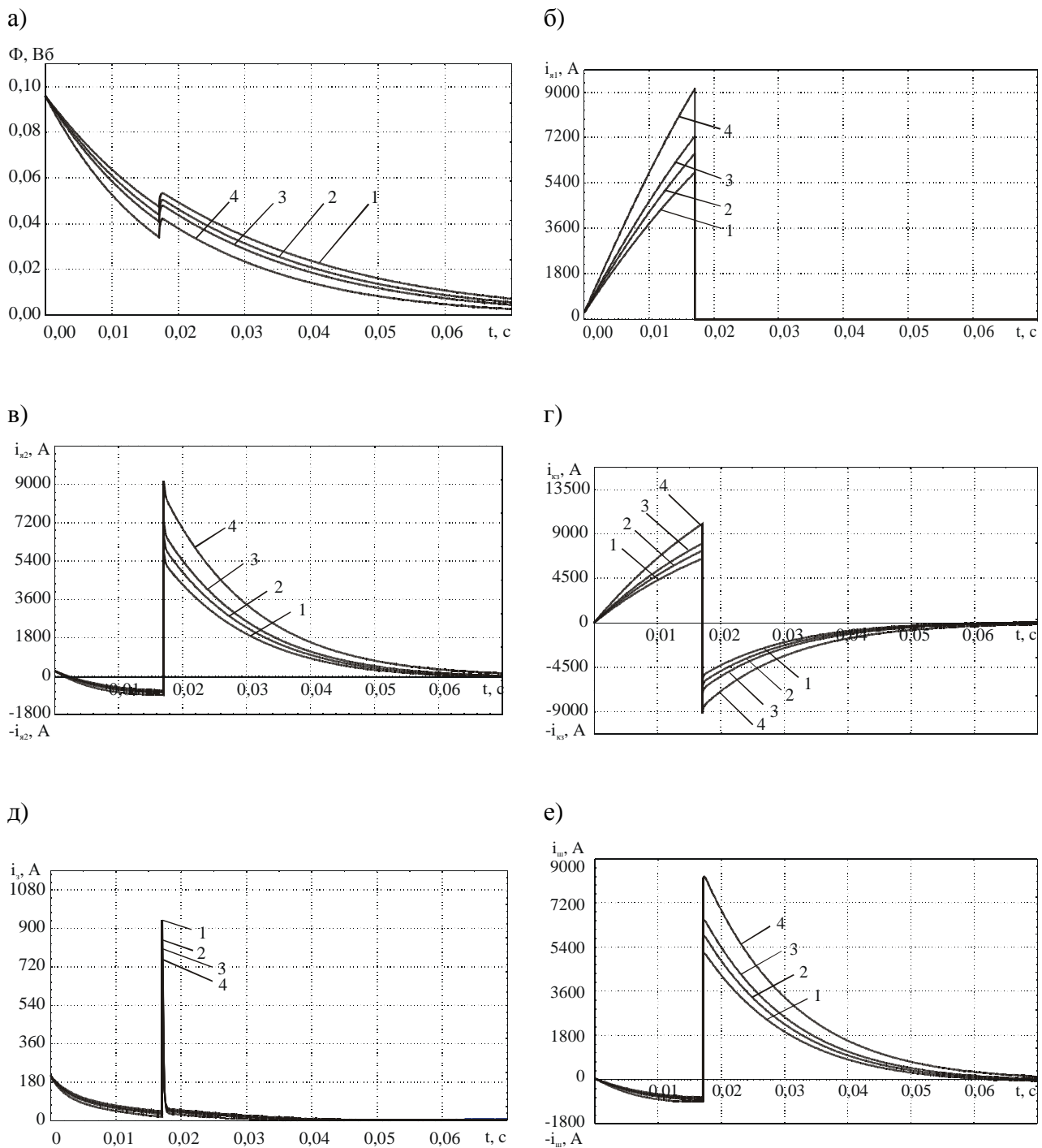


Рис. 3. Часові залежності перехідних величин магнітного потоку $\Phi(t)$ (а), струмів якоря першого двигуна $i_{я1}(t)$ (б), другого двигуна $i_{я2}(t)$ (в), струму у закороченій вітці $i_{кз}(t)$ (г), в обмотці збудження $i_3(t)$ (д), у шунтувальній вітці $i_{ш}(t)$ (е) в режимі зовнішнього короткого замикання при ПЗ-1, для номінальних початкових умов при різних значеннях напруги в контактній мережі, В: 1 – 2700; 2 – 3000; 3 – 3270; 4 – 3980

проти-ЕРС якоря та ЕРС самоіндукції $\frac{d(\psi_{я} + \psi_{ш})}{dt}$ обумовлюють зміну напруги струмів $i_{я2}(t)$ (рис. 3, в) та $i_{ш}(t)$ (рис. 3, е), які експоненціально збільшують-

Таблиця 1.

Значення перехідних величин при зовнішньому короткому замиканні в момент досягнення струмом $i_{ел} = i_{я1} = 2500$ А у режимі: ПЗ-1 – чисельник, ПЗ-4 – знаменник

Величина напруги, В		3980	3270	3000	2700
Час досягнення струмом якоря $i_{я1} = 2500$ А, с		$\frac{0,0015}{0,0015}$	$\frac{0,00185}{0,00185}$	$\frac{0,00205}{0,002}$	$\frac{0,0023}{0,00225}$
Перехідні величини в момент досягнення струмом у першому двигуні значення 2500 А	$i_{кз}, А$	$\frac{2275,15}{2260,42}$	$\frac{2278,1}{2265,1}$	$\frac{2300,8}{2234,8}$	$\frac{2306,97}{2248,25}$
	$i_{я2}, А$	$\frac{-31,35}{7,2}$	$\frac{-33,0}{4,166}$	$\frac{-38,6}{9,074}$	$\frac{-41,067}{4,383}$
	$i_3, А$	$\frac{289,95}{157,52}$	$\frac{292,32}{161,1}$	$\frac{292,3}{163,08}$	$\frac{292,94}{164,52}$
	$i_{ш}, А$	$\frac{-321,3}{-150,3}$	$\frac{-325,3}{-156,94}$	$\frac{-330,9}{-154,01}$	$\frac{-334,08}{-160,14}$
	$i_{вхр}, А$	$\frac{46,95}{45,73}$	$\frac{43,056}{41,679}$	$\frac{41,65}{39,8}$	$\frac{39,86}{37,98}$
	$\Phi, Вб$	$\frac{0,088}{0,0638}$	$\frac{0,08786}{0,06367}$	$\frac{0,0877}{0,0637}$	$\frac{0,08757}{0,06359}$

ся відповідно до 900 і 950 А. У той же час, оскільки $\frac{d\psi_{ш}}{dt} < \frac{d\psi_3}{dt}$, то $i_3(t)$ свого знаку не змінює, однак поступово зі зменшенням $\psi_{ш}(t)$ також зменшується майже до нуля, до 15 А (рис. 3, д). Відповідно, зі зменшенням $i_3(t)$ за тим же законом загасає і магнітний потік (рис. 3, а).

Як видно із аналізу розрахунків лише $i_{я2}(t)$ має високократні значення: $(4,36...4,46)I_{ном}$, які можуть привести до колового вогню ТЕД 1 навіть ще до вимикання ШВ. Тобто, існуючий вид захисту ТЕД від зовнішнього короткого замикання розглядуваного виду не задовольняє необхідні вимоги достатнього захисту.

Однак, найбільшу небезпеку представляє саме відключення ШВ у кінці вимикання ШВ (а це десь 17 мс) усі перехідні струми стрибком збільшуються до великих небезпечних значень, наприклад, $i_{я2}$ досягає 6820 А при $U_H = 3000$ В і ПЗ-4. Тобто ШВ, який має власний термін вимикання 15 мс, не є ефективним захистом від зовнішнього короткого замикання розглянутого виду.

Висновки

1. Створена математична модель дозволяє проводити багатofакторний аналіз перехідних електромагнітних процесів у силових колах електровозу ДЕ-1.

2. У режимі зовнішнього короткого замикання в момент досягнення струмом $i_{я1}(t)$ уставки 2500 А струм $i_{я2}(t)$ у закороченому якорі змінює напрямок на зворотній і має малі, до 950 А, значення. У подальшому за термін часу спрацьовування ШВ значення цього струму досягає $(4,4...4,5)I_{ном}$, що може призвести до колового вогню ТЕД 1 навіть ще до повного вимикання ШВ.

3. Аналіз отриманих максимальних значень струмів якорів свідчить про те, що існуючий вид захисту чи швидкодія застосованого ШВ є недостатніми при можливих коротких замиканнях розглянутого виду.

Список літератури

1. Лозановский А.Л. Исследование токовых нестационарных режимов в силовых цепях электровозов методом физического моделирования: Автореф. дис...канд. техн. наук. – М., 1963. – 20 с.
2. Клейменов В.В., Золотарев П.А., Назикян А.Г. Использование электронной вычислительной машины для исследования переходных процессов в цепи тяговых электродвигателей //Электровозостроение. – 1964. – Т. 4. – С. 14-27.
3. Хоменко Б.И., Копанев А.С., Логинов И.Я. Исследование на электронной модели режима короткого замыкания в цепи выпрямительного тока на электровозах со статическими преобразователями //Электровозостроение. – 1965. – Т. 6. – С. 104-116.
4. Лозановский А.Л., Янов В.П. Переходные процессы в электрических цепях электровозов переменного тока со статическими преобразователями и принципы защиты в наиболее тяжелых режимах //Электровозостроение: Сб. науч. тр. Сев.-Кавказ. центр. бюро техн. информ. – 1967. – Т. 9. – С. 118-132.
5. Рунов Ю.А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава //Труды ЦНИИ МПС. – 1974. – Вып. 516. – С.78-92.