

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЇ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ

Проведено аналітичне дослідження комутації тягових двигунів електровозів. Встановлено, що отримані криві зміни струму секцій, що комутують, відповідають теорії середньопрямолинійної комутації. За допомогою запропонованого методу можливо на стадії проектування тягових двигунів спрогнозувати якість комутації і своєчасно її скоректувати.

Проведено аналитическое исследование коммутации тяговых двигателей электровозов. Установлено, что полученные кривые изменения тока коммутируемых секций соответствуют теории среднепрямолинейной коммутации. С помощью предлагаемого метода возможно на стадии проектирования тяговых двигателей прогнозировать качество коммутации и своевременно ее корректировать.

The analytical study of switching of the tractive engines of electric locomotives is conducted. It is found that the obtained curves of change of current of the sections commuted correspond to the theory of average rectilinear switching. By means of the proposed method it is possible on the stage of design of tractive engines to forecast the quality of switching and to correct it timely.

Як відомо, процес зміни струму в секціях обмотки якоря при переході з однієї паралельної вітки в іншу називають комутацією, якість якої в значній мірі визначає надійність тягових електродвигунів (ТЕД) і вартість їх експлуатації.

Одним із головних етапів дослідження комутації ТЕД було осцилографування струмів препаративних комутуючих секцій. Велика кількість осцилограм [1, 2], які були одержані в різних режимах роботи тягових машин дозволяє відмітити наступне. Форми перехідних струмів комутації різних секцій хаотичні, несхожі одна на одну й не підтверджують класичну умову прямолинійної комутації: $di/dt = const$. Форма кривої струму комутації зберігається весь час незмінною, тобто її викривлення не є випадковим і відповідає тільки даному періоду комутації. Збіжність форм кривих струмів комутації даної секції спостерігається навіть при підживленні додаткових полюсів (ДП) ТЕД. Форма кривих струмів комутації наглядно показує, що щітка працює з нерівномірною густиною струму, що також не відповідає класичній теорії комутації.

Л. Дрейфус відмічає [3, 4], що форма кривої перехідного струму визначається майже виключно індуктивністю короткозамкнених витків, що хоч прямолинійна комутація являє собою ідеальний випадок комутації, вона неможлива не тільки практично, але і теоретично. Л. Дрейфус стверджує, що під комутацією «в середньому прямолинійною» розуміється комутація, при якій в кожний момент часу сума

швидкості зміни усіх струмів, що комутують, є постійною.

Середньо прямолинійна комутація задовольняє умові:

$$\sum \frac{di_K}{dt} = const, \quad (1)$$

Відсутність в роботах Л. Дрейфуса експериментального матеріалу, що відноситься до осцилографічному дослідженню комутації, дозволяє проводити дослідження теорії середньопрямолинійної комутації.

Оскільки час оберту якоря на 1 паз дорівнює $t_{\Pi} = u_{\Pi} \beta_K / v_K$, то

$$\sum \frac{di_K}{dt} = \frac{4iu_{\Pi}}{t_{\Pi}} = \frac{4i_A v_K}{\beta_K}, \quad (2)$$

де v_K – швидкість обертання колектора, м/с; β_K – колекторна поділка, м; u_{Π} – кількість провідників на паз; i_A – струм паралельної вітки обмотки якоря; i_K – струм секції, що комутує, А.

Якщо комутація не є в середньому прямолинійною, то сума $\sum \frac{di_K}{dt}$ коливається біля середнього значення $4iv/\beta$. Відхилення від цього середнього значення є часткою, що приходить на «додаткові поперечні струми комутації (додаткові струми короткого замикання)», і вони можуть бути визначені диференціальним рівнянням:

$$\frac{di_{\text{Д}}}{dt} = \sum \frac{di_{\text{К}}}{dt} - \frac{4i_{\text{А}}v_{\text{К}}}{\beta_{\text{К}}} \quad (3)$$

У відповідності з класичною теорією комутації, перехідний струм комутації може бути представлений як струм, що змінюється прямо-лінійно, і струм додатковий (поперечний). Якщо б останнього не існувало, то густина струму під щіткою була б рівномірною. Щітка розриває додатковий поперечний струм і це викликає іскріння на колекторі.

Важливість вивчення електромагнітних причин іскріння під щітками підтверджується й характером отриманих осцилограм струмів комутації, незакономірність і хаотичність форм кривих струмів можуть бути пояснені саме дискретним характером щіткового контакту, що не враховує класична теорія комутації.

При проведенні великої кількості дослідів осцилографування струмів комутації в якорях обмоток різних типів не спостерігалось, щоб ці криві струмів були схожі на криві струмів класичної теорії комутації.

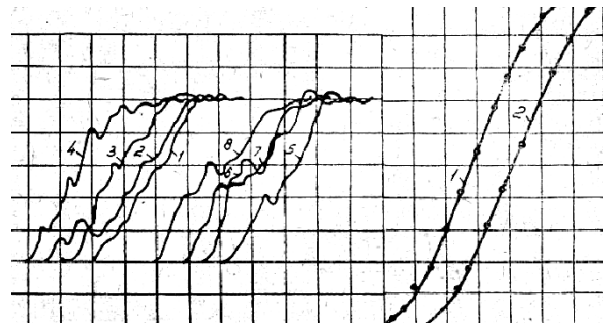


Рис. 1. Перехідні криві комутації секцій

На рис. 1 наведено перехідні криві комутації, що були отримані експериментальним шляхом, і побудовані залежності струмів комутації шару, пазу та декількох пазів в зоні комутації, причому з існуючих різних варіантів, наводяться тільки два варіанта при різних режимах роботи машини з номінальним струмом навантаження.

Фізичні процеси, які відбуваються в комутуючих секціях тягових двигунів, можливо описати наступною системою диференціальних рівнянь (4), з урахуванням ЕРС самоіндукцій та взаємоіндукцій комутуючих секцій. Для прикладу наводиться 4 етап комутації секцій 2-го пазу (шару).

$$\begin{cases} L_c \frac{di_4}{dt} = -e_{\kappa} - A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_4 - i_3) \cdot 4}{S} \right] + A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_a - i_4) \cdot 4}{S} \cdot \frac{T}{t} \right] - M \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_3}{dt}; \\ L_c \frac{di_3}{dt} = -e_{\kappa} - A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_3 - i_2) \cdot 4}{S} \right] + A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_4 - i_3) \cdot 4}{S} \right] - M \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_4}{dt}; \\ L_c \frac{di_2}{dt} = -e_{\kappa} - A \arctg \left[\frac{B(i_2 - i_1) \cdot 4}{S} \right] + A \arctg \left[\frac{B(i_3 - i_2) \cdot 4}{S} \right] - M \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_3}{dt} - M \frac{di_4}{dt}; \\ L_c \frac{di_1}{dt} = -e_{\kappa} - A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_1 + i_a) \cdot 4}{S} \cdot \frac{T}{(T-t)} \right] + A \cdot \arctg \left[\frac{B(i_2 - i_1) \cdot 4}{S} \right] - M \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_3}{dt} - M \frac{di_4}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

де e_{κ} – комутаційна ЕРС, В;

$L_c (di_n / dt)$, $M (di_n / dt)$ – ЕРС самоіндукції та взаємоіндукції секцій, що комутують, відповідно, В;

$A \cdot \arctg [B(i_n - i_k) \cdot 4 / S]$ – апроксимація нелінійної ВАХ контакту щітка-колектор, що набігає, з коефіцієнтами A та B ;

$A \cdot \arctg [B(i_a - i_n) \cdot 4T / S \cdot t]$ – апроксимація нелінійної ВАХ контакту щітка-колектор, що збігає, з коефіцієнтами A та B .

Результати розрахунків системи рівнянь (4) для комутації 12-ти секцій, що знаходяться в 3-х сусідніх пазях якоря, наведені на рис. 2.

На рис. 2 показані криві комутації секцій, які знаходяться у трьох сусідніх пазях (у кож-

ному пазу знаходяться частини чотирьох секцій).

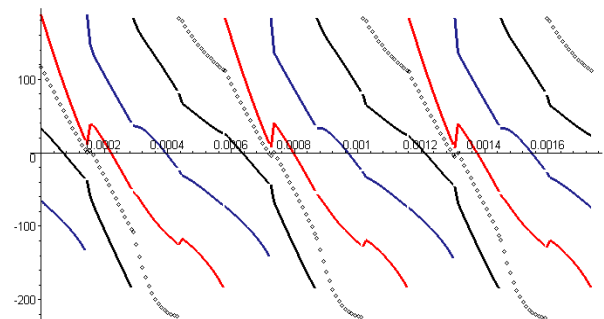


Рис. 2. Криві комутації секцій, які знаходяться у трьох сусідніх пазях якоря

Секція 1, яка знаходиться в першому пазу, починає комутувати першою; секція 4 – комутує остання в першому пазу. Секції 5 та 9 комутують першими в другому та третьому пазах, відповідно

Отже, форма кривої на рис. 3 наглядно підтверджує наявність середньопрямолінійної комутації, яка була отримана шляхом розв'язків системи рівнянь (3). Вона практично збігається з отриманими експериментально кривими рис. 1.

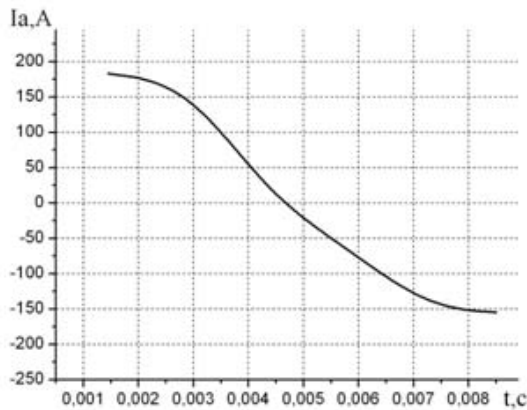


Рис. 3. Криві залежності струмів комутації пазу

Отже, за допомогою сучасних засобів аналітичних досліджень можливо на стадії проектування ТЕД визначати якість комутації, яка прогнозується, і своєчасно її коректувати.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Безрученко, В. Н. Экспериментальное подтверждение теории коммутации прямолинейной в среднем [Текст] / В. Н. Безрученко // Электромеханика, Изв. высш. учеб. заведений. – 1968. – № 4. – С. 454-457.
2. Безрученко, В. Н. Современные представления о критериях коммутационной надежности электрических машин постоянного тока [Текст] / В. Н. Безрученко // Транспорт. Труды ДИИТ. – 1969. – Вып. 82. – С. 10-25.
3. Дрейфус, Л. А. Коммутация крупных машин постоянного тока [Текст] / Л. А. Дрейфус. – Стокгольм: Springer, 1929. – 228 с.
4. Дрейфус, Л. А. Теория чувствительности якорных обмоток машин постоянного тока к расстройству условий коммутации [Текст] / Л. А. Дрейфус. – Стокгольм: Acta Polytechnica, 1954. – 176 с.

Надійшла до редколегії 31.03.2010.

Прийнята до друку 08.04.2010.