

УДК 629.423.31

Юрій Дубравін

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РІВЕНЬ
КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО
СТРУМУ**

В статті розглядається методика розробки дослідницької моделі електровоза змінного струму з некерованими випрямлячами та питання визначення параметрів математичної моделі. Приведені результати моделювання залежності коефіцієнта потужності електровоза серії ВЛ80^К від параметрів режиму роботи та амплітудний спектр струму в первинній обмотці тягового трансформатора.

В статье рассматривается методика разработки модели электровоза переменного тока с неуправляемыми выпрямителями и вопросы определения параметров математической модели. Приведены результаты моделирования зависимости коэффициента мощности электровоза серии ВЛ80^К от параметров режима работы и амплитудный спектр тока в первичной обмотке тягового трансформатора.

The article researches methodology of development model for AC electric locomotive with unmanaged rectifiers and questions definitions parameters of mathematical model. The results of modeling power factor for series of electric locomotive VL80K from parameters of mode and the amplitude spectrum of the current in the primary winding of traction transformer.

Ключові слова: ЕРС змінного струму, тяговий трансформатор, випрямна установка, коефіцієнт потужності, математична модель, амплітудний спектр, моделювання.

Втрати в системах енергозабезпечення електрифікованих залізниць у значній мірі пов'язані з рівнями коефіцієнтів потужності та корисної дії, що реалізуються при експлуатації електровозів. В даний час ділянки залізниць України, що електрифіковані по системі змінного струму з напругою в контактній мережі 25кВ, обслуговуються головним чином ЕРС змінного струму з некерованими випрямлячами.

При випрямленні напруги відбувається спотворення форми струму, несинусоїдальний струм містить значну кількість вищих гармонік. Разом з тим індуктивність розсіювання обмоток трансформатора випрямляча та пульсації випрямленого струму зумовлюють зсув по фазі на кут φ першої гармоніки струму $i_{1(1)}$, що споживається з контактної мережі, відносно напруги живлення U_1 . Все це

© Дубравін Ю. Ф., 2012

зменшує коефіцієнт потужності $\chi = v \cdot \cos(\varphi)$, що негативно впливає на енергетичні показники всієї системи енергозабезпечення [3]. На сьогодні контроль якості електроенергії на ЕРС не виконується. Для дослідження електромагнітних процесів у тягових електроприводах електровозів змінного струму розроблена математична модель елементів системи управління, що включає в себе моделі тягового трансформатора, випрямної установки (ВУ) та кола випрямленого струму. Математична модель дає змогу досліджувати характер зміни коефіцієнта потужності, спектральний склад струму та напруги залежно від режимів роботи ЕРС та параметрів випрямляча. В якості об'єкта моделювання вибрано магістральний електровоз ВЛ80, оскільки електровози цієї серії складають основу локомотивного парку вантажних електровозів змінного струму.

Розрахункова схема системи наведена на рис.1. Схематичне подання тягового трансформатора електровоза включає первинну обмотку з включеними послідовно резистивними r_1, r_M і індуктивними елементами x_1, x_M та одне плече вторинної обмотки з опорами r_2, x_2 . В схемі розглянуто випрямний міст VD1-VD4 із замкненими плечима, що цілком припустимо при розгляді ходових позицій електровоза. Електрорушійні сили, що індукуються в обмотках трансформатора позначені як E_1, E_2 . Випрямляч навантажений активно-індуктивними опорами R_d, X_d та проти е.р.с. тягового двигуна E_d .

Активний опір обмоток трансформатора та тягової мережі, приведені до фази вторинної обмотки

$$R_T = r_2 + (r_1 + r_M) \left(\frac{1}{K_T}\right)^2 \quad (1)$$

де K_T – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Індуктивності розсіювання обмоток трансформатора L_{S1}, L_{S2} і тягової мережі L_M враховані індуктивністю $L_a = L_{S2} + (L_{S1} + L_M) K_T^2$,

приведеною до вторинної обмотки.

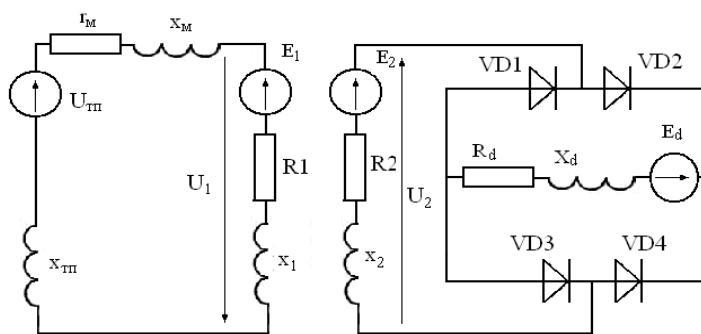


Рис.1. Розрахункова схема тягового електроприводу електровоза змінного струму

Значення активних опорів обмоток трансформатора приведені в паспортних даних трансформатора ОДЦЕ-5000/25Б. Для визначення індуктивностей обмоток трансформатора використані співвідношення досліду короткого замикання (КЗ):

$$Z_{K3} = \frac{U_{IK}}{I_{IH}}; \quad (3)$$

$$\cos \varphi_{K3} = \frac{P_{K3}}{I_{IH} U_{K3}}; \quad (4)$$

$$R_{K3} = \cos \varphi_{K3} * Z_{K3}; \quad (5)$$

$$X_{K3} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{K3}} * Z_{K3}; \quad (6)$$

$$x_1 = x_2 = \frac{X_{K3}}{2 R_B} = X_a; \quad (7)$$

$$L_a = \frac{X_a}{2\pi f} \quad (8)$$

де U_{IK} – напруга короткого замикання первинної обмотки, %;

U_{IK} – напруга короткого замикання первинної обмотки, В;

Z_{K3} – модуль комплексного опору в досліді КЗ;

$\cos \varphi_{K3}$ – кут зсуву між напругою і струмом в досліді КЗ;

R_B – базовий опір обмоток трансформатора, Ом;

P_{K3} – втрати короткого замикання при номінальній напрузі трансформатора, ВА;

X_{K3} – реактивний опір при КЗ, Ом;

x_1, x_2 – відносні реактивні опори первинної і вторинної обмоток трансформатора, Ом;

f – частота струму, Гц;

L_a – індуктивність трансформатора, приведена до вентильної обмотки, Гн.

Індуктивність трансформатора L_a , обумовлена потоками розсіювання первинної та вторинної обмоток, як відомо, призводить до подовження процесу комутації вентилів, що характеризується кутом комутації γ [2,4].

При розробці математичної моделі ВУ електровоза, укомплектованої вентилями типу ВЛ200, використана вольт-амперна характеристика ідеалізованого вентиля з втратами і порогом випрямлення. Поріг випрямлення прийнято рівним 0,5 В. Випрямляч працює з проти е.р.с. E_d , що індукується в обмотках якорів паралельно включених тягових електродвигунів (ТЕД).

Математична модель ВУ включає наступні рівняння:

Рівняння для миттєвих значень випрямленої напруги

$$u_d = e_2 - L_a \frac{di_d}{d\omega t} - R_T i_d = E_{2m} \cos \omega t - L_a \frac{di_d}{d\omega t} - R_T i_d, \quad (9)$$

де e_2 – миттєве значення напруги вентильної обмотки при неробочому ході (НХ);

i_d – миттєве значення випрямленого струму;

E_{2m} - амплітудне значення е.р.с. вентильної обмотки при НХ.

Миттєве значення випрямленого струму

$$\frac{di_d}{d\omega t} = \frac{E_{2m} \cos \omega t - R_T i_d - E_d}{L_a + L_d}, \quad (10)$$

де $L_d = L_{зр} + L_{ТД}$ - сумарна індуктивність кола випрямленого струму, що складається з індуктивності згладжуючого реактора і обмоток ТЕД. Випрямлена напруга u_d урівноважена е.р.с. E_d якорів ТЕД, падінням напруги $R_d i_d$ в активному опорі кола навантаження і е.р.с. самоіндукції, $e_S = -L_d \frac{di_d}{d\omega t}$, що виникає при пульсації випрямленого струму

$$u_d = e_S + R_d i_d + L_d \frac{di_d}{d\omega t} \quad (11)$$

Початком комутації вентилів є момент, коли випрямлена напруга в контурі вентилів, що закінчують роботу, зрівняється з напругою в контурі вентилів, що вступають в роботу

$$e_{21} - R_T i_T - L_d \frac{di_d}{d\omega t} = e_{22} - L_d \frac{di_d}{d\omega t} \quad (12)$$

Початок комутації вентилів визначається кутом ψ

$$\cos \psi = \frac{E_d L_a + R_T i_d (L_a + L_d)}{E_{2m} (2L_a + L_d)}. \quad (13)$$

Рівняння для визначення кута комутації γ

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2I_d X_a}{E_{2m}}. \quad (14)$$

Коефіцієнт пульсації напруги першої гармоніки

$$K_{u1} = \frac{U_{m1}}{U_0} \quad (15)$$

де U_{m1} – амплітудне значення напруги першої гармоніки напруги;

U_0 – середнє значення напруги.

Наявність пульсації випрямленого струму додатково знижує коефіцієнт потужності

$$\chi = \frac{\nu}{k_d} \cos(\gamma/2), \quad (16)$$

де k_d – коефіцієнт форми пульсуючого струму,

$$k_d = \sqrt{1 + 0.13 k_{ПВ}^2}, \quad (17)$$

Де $k_{ПВ}$ – коефіцієнт пульсації струму,

$$K_{ПВ} = \frac{\Delta i_d}{I_d}. \quad (18)$$

Результати моделювання свідчать, що випрямлена напруга (рис.2) складається з постійної та змінної складової зі значними втратами на комутацію.

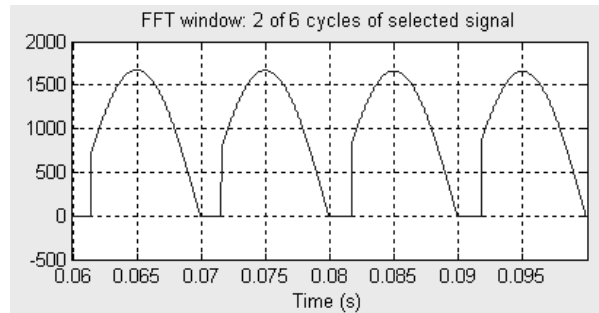


Рис.2. Крива миттєвої випрямленої напруги в колі ТЕД

Результати гармонічного аналізу випрямленої напруги (рис.3) свідчать про наявність у випрямленій напрузі крім постійної складової 0, 2-ї, 4-ї, 6-ї і т.д. парних гармонік з частотою відповідно 100,200,300 Гц. Для прикладу на 17-й позиції контролера постійна складова напруги складала 565 В при середньому значенні випрямленого струму 556 А і амплітудному значенні першої гармоніки напруги $U_1 = 390$ В коефіцієнт пульсації напруги (15) мав значення рівне 0,69.

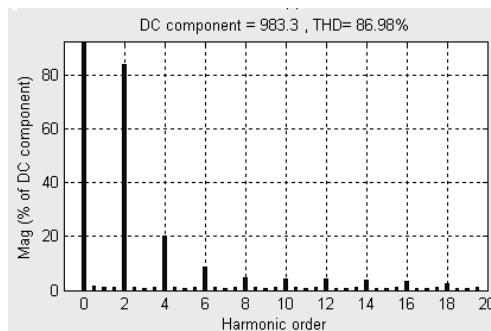


Рис.3. Амплітудний спектр випрямленої напруги в колі ТЕД

Змінна складова випрямленої напруги при обмеженій індуктивності в колі ТЕД спричиняє пульсацію випрямленого струму, який має ті ж гармоніки, що і випрямлена напруга. Перша, основна гармоніка напруги має подвійну частоту 100 Гц.

Результати моделювання свідчать, що струм в первинній обмотці тягового трансформатора (рис.4) в значній мірі відрізняється від синусоїдальної форми, і відстає по фазі відносно напруги контактної мережі. Наприклад, на 17-й позиції контролера при випрямленому струмі 556 А кут зсуву φ першої гармоніки струму відносно напруги живлення мав значення $10,94^\circ$, а його максимальне значення дорівнювало $75,18^\circ$.

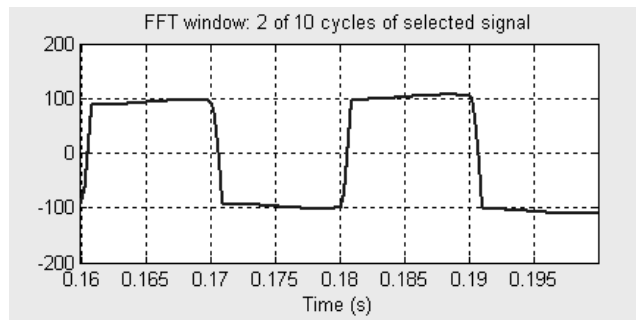


Рис.4. Крива струму в первинній обмотці тягового трансформатора

Крива струму симетрична відносно осі X , тому її постійна і косинусна складові дорівнюють нулю. В криву струму входять лише гармоніки синусного ряду. Із рис. 5 видно, що всі парні гармоніки кривої струму практично дорівнюють нулю. Крім основної (першої) гармоніки поріг в 5% перевищують гармоніки: 3-тя (32%), 5-та (18%), 7ма (12%), 9та (8%) та 11та (6%).

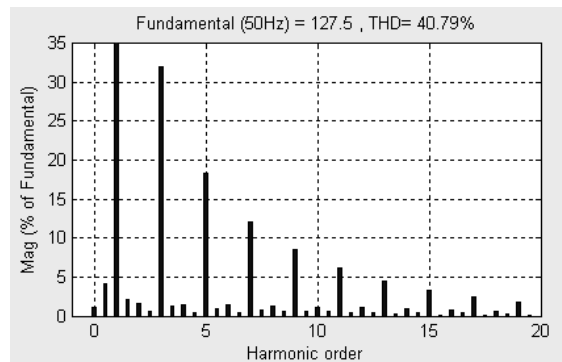


Рис.5. Амплітудний спектр струму в первинній обмотці тягового трансформатора

В ході дослідження встановлена залежність коефіцієнта потужності від пульсації струму, напруги та навантаження. Із залежності коефіцієнта потужності від струму (рис.6) можна зробити висновок, що напруга вентиляційної обмотки має більший вплив на рівень коефіцієнта потужності у порівнянні з індуктивністю обмоток трансформатора. В зв'язку з чим коефіцієнт потужності більш інтенсивно зменшується з ростом навантаження на позиціях контролера машиніста нижчих сімнадцятої.

Згідно з технічними даними електровоза [1] значення коефіцієнта потужності тривалого режиму дорівнює 0,886, що відповідає одній точці характеристики при роботі на 33-й позиції. Отримані результати дають змогу одержати характер зміни коефіцієнта потужності у межах всього діапазону зміни параметрів навантаження.

Аналіз результатів дослідження дає змогу зробити висновок, що параметри, одержані за допомогою моделювання з достатньою точністю відображають процеси в працюючому електроприводі, а математична модель може бути використана при розробці схемотехнічних та організаційних заходів, направлених на зниження витрат електроенергії на тягу поїздів.

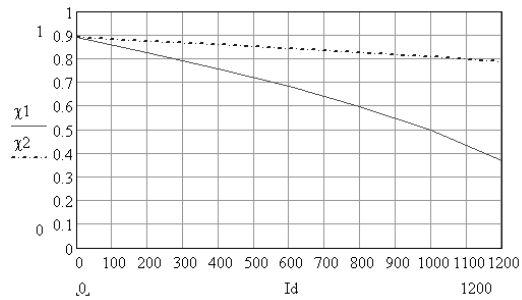


Рис.6. Залежності коефіцієнтів потужності χ_1 , χ_2 електровоза ВЛ80^к від струму навантаження вторинної обмотки трансформатора. На графіку χ_1, χ_2 – відповідно коефіцієнти потужності при роботі електровоза на 33-й та 17-й позиціях контролера машиніста

ЛІТЕРАТУРА

1. Дубровский З.М., Попов В.И., Тушканов Б.А. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1998. – 503 с.
2. Преобразовательная техника. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 431 с.
3. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. Учебник для вузов ж.-д. трансп. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
4. Электронная и ионная техника. Засорин С.Н. и др. Изд. 2-е. – М.: Транспорт, 1973. – 440 с.