

УДК 621.313.3

СПРОЩЕНА ТЕПЛОВА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВИГУНА

Пчелінцев А.В., студент; Шумяцький В.М., доцент, к.т.н.

(Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна)

Відомо, вищі гармоніки напруги перетворювача частоти (ПЧ), породжують ні стільки додаткові постійні складові моменту, скільки змінні складові, обумовлені взаємодією вищих гармонік з першою гармонікою моменту і між собою. Найбільш значним у механізмі утворення пульсацій є взаємодія п’ятої і сьомої гармонік струму з основною гармонікою.

При номінальній частоті напруги, внаслідок підвищеної частоти пульсацій моменту і інерційності механічної частини приводу, пульсації швидкості є порівняно незначними. Однак, при зниженні частоти напруги, нерівномірність обертання ротору зростає, так як ротор встигає “відпрацювати” пульсації моменту. Крім цього наявність додаткових втрат від вищих гармонік призводить до зниження припустимих корисних навантажень на валу двигуна за умов нагріву. Все це обмежує припустимі діапазони регулювання швидкості електроприводів і як відмічають різні автори, це зв’язано з використанням “базового” закону комутації ключів [2].

Для усунення відмічених вище недоліків необхідно використовувати удосконалені закони комутації ключів. Найбільш розповсюдженим в теперішній час є ПЧ з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Для цього необхідно розробити модель системи електропривода, яка дасть можливість зробити порівняння різних законів комутації.

Складання математичного опису теплового стану асинхронного двигуна в повторно-короткочасному режимі з випадковими величинами навантажень і тривалості включень – складна задача, тому що в кожній частині робочого циклу (пуск, робота під навантаженням, пауза) змінюються в часі умови охолодження, виділювані втрати тривалості, що гріють, включень і т.д. Найбільш достовірні результати досяжні при прямому моделюванні теплового стану електродвигуна в різних частинах циклу з урахуванням законів зміни навантажень, тривалості включення (тривалості часу роботи і пауз).

У дослідженні використовувався двигун серії ЭДКО. Тепловий стан двигуна досліджувався за допомогою чотирьох-тільної схеми заміщення двигуна (рис.1) [1]. У приведеній схемі заміщення: вузол 1– пазова частина обмотки статора; вузол 2– лобова частина обмотки статора; вузол 3– ротор; вузол 4– залізо статора і корпус.

Значення електромагнітного моменту і струму двигуна були отримані за допомогою використання стандартної (віртуальної) моделі двигуна пакету Matlab додатку Power System Blockset.

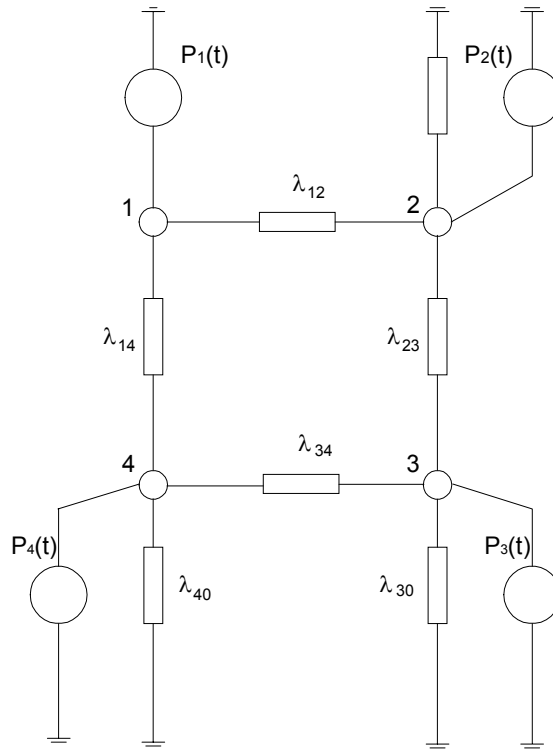


Рисунок 1. – Теплова чотирьох-тільна схема заміщення ЭДКО2–4МУ5

Система рівнянь, що описує теплову чотирьох-тільну схему заміщення двигуна [1]:

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + \Theta_1(\lambda_{12} + \lambda_{14}) - \Theta_2\lambda_{12} - \Theta_4\lambda_{14} &= P_1(t) \\
 C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} + \Theta_2(\lambda_{20} + \lambda_{23} + \lambda_{12}) - \Theta_1\lambda_{12} - \Theta_3\lambda_{23} &= P_2(t) \\
 C_3 \frac{d\Theta_3}{dt} + \Theta_3(\lambda_{30} + \lambda_{23} + \lambda_{34}) - \Theta_2\lambda_{23} - \Theta_4\lambda_{34} &= P_3(t) \\
 C_4 \frac{d\Theta_4}{dt} + \Theta_4(\lambda_{14} + \lambda_{40} + \lambda_{34}) - \Theta_1\lambda_{14} - \Theta_3\lambda_{34} &= P_4(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Втрати, що гріють, у вузлах схеми заміщення у функції струму I_ϕ [1]:

а) у пазовій частині обмотки статора

$$P_1(t) = 0.082 \cdot I_\phi^2(t), \text{ Bm} \tag{2}$$

б) у лобовій частині обмотки статора

$$P_2(t) = 0.0525 \cdot I_\phi^2(t), \text{ Bm} \tag{3}$$

в) загальні втрати в роторі

$$P_3(t) = 0.147 \cdot I_\phi^2(t) - 100, \text{ Bm} \tag{4}$$

Еквівалентне по зносу ізоляції перевищення температури, розраховується по формулі:

$$\Theta = \frac{1}{6} \lg \frac{1}{T} \int_0^T e^{d\Theta(t)} dt \tag{5}$$

Таким чином, відповідно до вищевказаних теоретичних положень отримаємо диференційні рівняння, що описують різні режими у роботі двигуна. При цьому отриманні коефіцієнти, у системах рівнянь, відповідно визначені для двигуна ЭДКО.

Робота під навантаженням:

$$\begin{aligned}
 6480 \frac{d\Theta_1}{dt} + 137.1\Theta_1 - 17.1\Theta_2 - 12\Theta_4 &= 0.082I_{\phi}^2(t) \\
 4140 \frac{d\Theta_2}{dt} - 17.1\Theta_1 + 27.1\Theta_2 - 4.16\Theta_3 &= 0.0525I_{\phi}^2(t) \\
 36270 \frac{d\Theta_3}{dt} - 4.16\Theta_2 + 16.21\Theta_3 - 7.58\Theta_4 &= 0.147I_{\phi}^2(t) - 100 \\
 44280 \frac{d\Theta_4}{dt} - 120\Theta_1 - 3.23\Theta_3 + 138.2\Theta_4 &= 875
 \end{aligned} \tag{6}$$

На рисунку 2 приведена математична модель двигуна для чотирьох-тільної теплової схеми заміщення, побудована з урахуванням рівнянь, що описують теплові процеси в двигуні. У схемі чотирьохтільної теплової моделі двигуна при роботі під навантаженням використовувався блок Matlab Function, що формує вхідний вплив для системи диференційних рівнянь – $I_{\phi}(t)$. Таким чином, даний блок обчислює миттєве значення статорного струму за допомогою коефіцієнтів Фур'є. Як вихідне значення, бралася форма струму за період у сталому режимі, при роботі двигуна з номінальним навантаженням. Після чого виділена крива розкладувалася в ряд Фур'є:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(\omega kt) + b_k \sin(\omega kt)) \tag{7}$$

де $\omega=2\pi/T$ – кругова частота першої гармоніки; k – порядковий номер гармоніки.

Обмежившись деякою кількістю гармонік m , одержали апроксимуючий гармонічний поліном $Q_m(t)$:

$$f(t) \approx Q_m(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m (a_k \cos(\omega kt) + b_k \sin(\omega kt)) \tag{8}$$

Коефіцієнти Фур'є визначили за формулами:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(\omega kt) dt \tag{9}$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(\omega kt) dt \tag{10}$$

Використовуючи для чисельного інтегрування засіб прямокутників при розтращенні інтервалу інтегрування $[0, T]$ на n рівних відрізків, одержимо:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i, \\ a_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cos \frac{2\pi ki}{n}, \\ b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \sin \frac{2\pi ki}{n}, \end{cases} \quad (11)$$

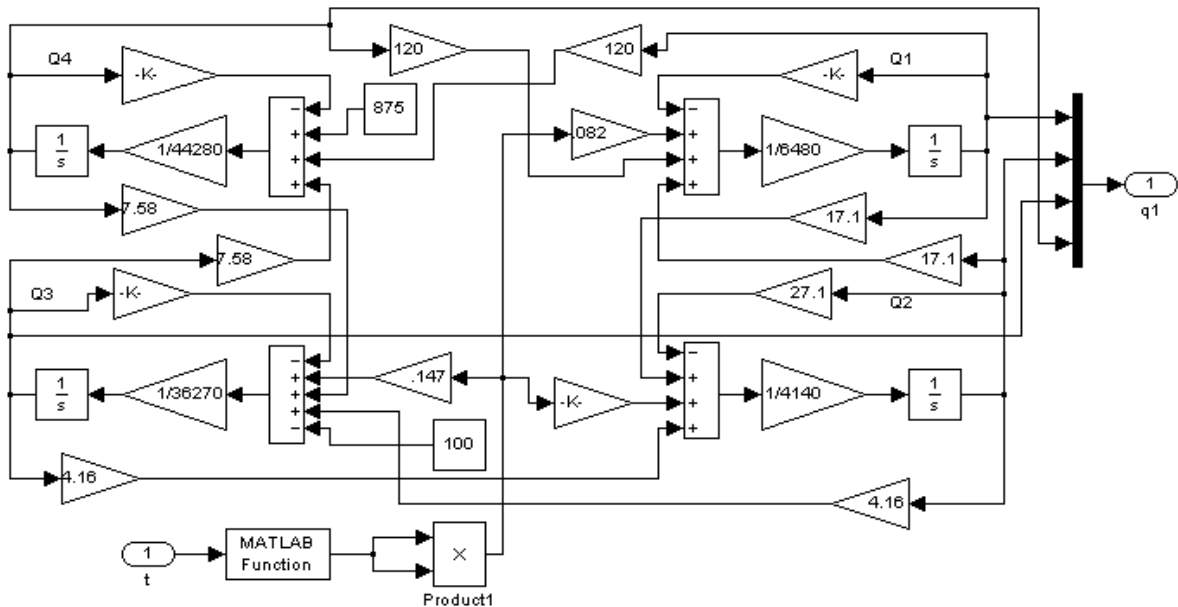


Рисунок 2. – Математична схема чотирьох-тільної теплової моделі двигуна при роботі під навантаженням

Аналіз перевищення температур частин двигуна здійснювався при роботі двигуна з номінальними параметрами живлячої мережі (рис.3) і від перетворювача частоти (рис.4).

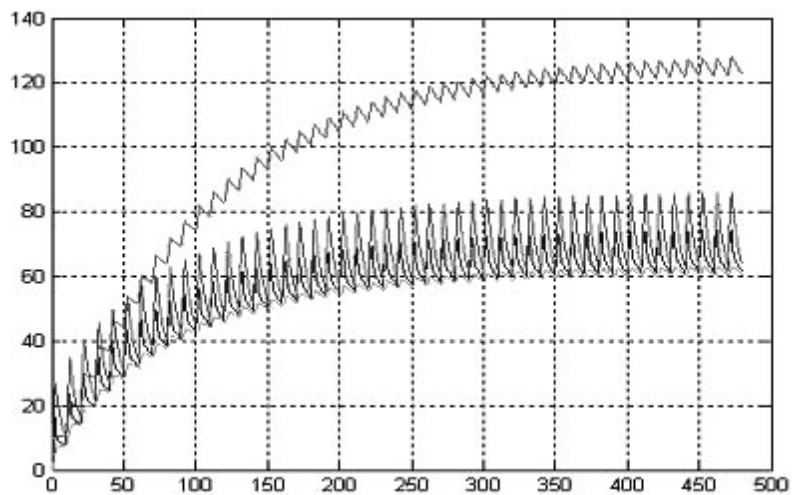


Рисунок 3. – Перегрів частин двигуна при номінальних параметрах живлення $U_c=380\text{В}$, $f=50\text{Гц}$

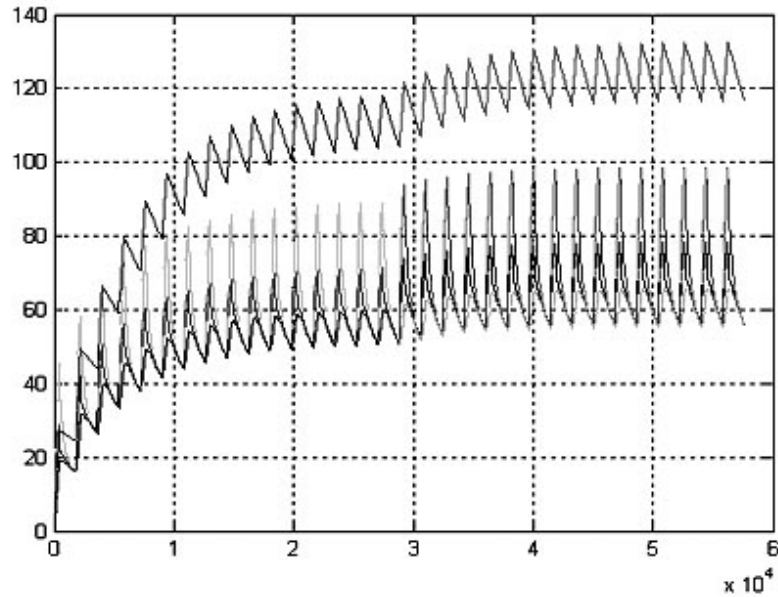


Рисунок 4. – Перегрів частин двигуна при зміні частоти живлячої напруги з 25Гц на 12.5Гц

З отриманих графіків можливо побачити, що перегрів окремих частин у двигуні, при номінальному момент навантаження і зниженій частоті живильної напруги, практично не змінюється щодо режиму роботи двигуна при номінальній частоті напруги і номінальному моменті навантаження. Таким чином, використання ПЧ з ШІМ та розроблена теплова модель можуть бути використані для аналізу теплового стану двигуна.

Перелік посилань

1. Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б., Коробков Е.К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывозащищенного исполнения. – М: Энергия, 1970, 185с.
2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург. УРО-РАН, 2000. – 654с.