

**М.В. Чернявська**, к.т.н., доц., ХНАМГ, Харків  
**А.І. Кузнецов**, к.т.н., доц., ХНАМГ, Харків  
**І.Т. Карпалюк**, к.т.н., доц., ХНАМГ, Харків  
**М.Л. Глєбова**, к.т.н., доц., ХНАМГ, Харків

## РОЗРАХУНОК ДОДАТКОВИХ ВИТРАТ ТА ПУЛЬСАЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА ЗМІННОГО СТРУМУ

Показано, що традиційна заміна реальної форми кривої фазного струму на трапеціодну у вентильного двигуна (ВД) не завжди коректна при дослідженні додаткових витрат і пульсацій електромагнітного моменту ВД. Проведено порівняльний аналіз додаткових витрат.

Показано, что традиционная замена реальной формы кривой фазного тока на трапецидальную для вентильного двигателя (ВД) не всегда корректная при исследовании дополнительных потерь и пульсаций электромагнитного момента ВД. Проведен сравнительный анализ дополнительных потерь.

Потреба в електроприводах середньої і великої потужності із широким і плавним діапазоном регулювання частоти обертання на сучасному етапі розвитку не може бути забезпечена повною мірою за рахунок традиційних машин постійного струму (МПС), де щітково-колекторний вузол накладає серйозні обмеження на граничні значення потужності, частоти обертання, напруги. У цьому зв'язку розробка і дослідження вентильного двигуна (ВД) із поліпшеними характеристиками, що мають рівноцінні з МПС технічні характеристики, але більш надійні при менших експлуатаційних витратах, є актуальною задачею.

Освоєна і розроблена математична модель ВД, яка представлена сукупністю декількох самостійних блоків, об'єднаних формально-логічними зв'язками, та реалізована у вигляді програмного комплексу [1, 2, 3], дає можливість при аналізі режимів роботи ВД із природною комутацією тиристорів інвертора враховувати реальну форму кривої струму джерела живлення, активний опір якірної обмотки СМ, насичення магнітопроводу, пульсацій в кривій струму.

Дослідження додаткових витрат і пульсацій електромагнітного моменту у ВД різного виконання і визначає їхній вплив на техніко-економічні показники цих двигунів.

В даній статті приведені результати досліджень додаткових витрат (ДВ) і пульсації електромагнітного моменту  $m_{em}$  ВД змінного струму з 3-х і 6-ти фазною обмоткою якоря (ВД3 і ВД6).

У ВД наявність вищих гармонік у струмі якірного кола приводить до неоднозначного зростання ДВ. При цьому вони можуть досягти рівня 20-30% від основних витрат, значно знижуючи коефіцієнт корисної дії привода.

Дана систематизація ДВ, найбільш істотних для вентильних двигунів. Зокрема були розглянуті наступні види ДВ:

- в обмотці статора (обумовлені витісненням струму в провідниках якоря; циркуляційними струмами; вищими гармоніками робочого струму; вихровими і контурними струмами від зовнішнього поля):

$$Q_m = \frac{m}{2} r_1 \sum_{\mu=1,5,7} I_{m\mu}^2 K_{a\mu} - \frac{m}{2} r_1 I_{m1}^2 \quad (1)$$

де  $K_{a\mu} = \varphi(\xi) - \frac{n_c^2 - 1}{3} \Psi(\xi)$  - коефіцієнт збільшення опору обмотки;  $\varphi(\xi)$ ,

$\Psi(\xi)$  - визначені функції приведеної висоти провідників, що заповнюють паз статора;  $\mu$  - номер гармоніки струму;

- в демпферній обмотці від  $\nu$ -ої просторової хвилі МРС статора

$$Q_{qmv} = 2 p h_g K^2 I_{\mu\nu}^2 R_{2\nu} \quad (2)$$

де  $2 p h_g$  - повне число демпферних стержнів на  $2 p$  полюсів,  $R_{2\nu}$  - активний опір стержня;  $K$  - коефіцієнт, що урахує параметри стержнів та пазів і визначається за допомогою відповідних формул і задалегідь підготовлених графіків;

- в обмотці збудження з урахуванням коефіцієнту витіснення струму  $K_{fv}$

$$Q_{f\mu\nu} = \frac{1}{2} I_{f\mu\nu}^2 r_f K_{fv} \quad (3)$$

- поверхневі втрати (виникають внаслідок переміщення вищих гармонік поля і індукованих ними струмів у відносно тонких поверхневих шарах статора (1) і ротора(2))

$$Q_{n2} = \sum_{\nu 2} Q_{n2\nu}; \quad Q_{n1} = \sum_{\nu 1} Q_{n1\nu} \quad (4)$$

$$Q_{n2v} = K_2 K_{обр2} \frac{\Delta_2 \sqrt{\pi \gamma_2}}{2 \sqrt{\mu_2}} \frac{\tau}{v_2} f_{v2}^{1,2} B_{v1}^2 K_{a2} * (z_2 b_{z2} l_{t2} K_{Fl2}) \quad (5)$$

$$Q_{n1v} = K_1 K_{обр1} \frac{\Delta_1 \sqrt{\pi \gamma_1}}{2 \sqrt{\mu_1}} \frac{\tau}{v_1} f_{v1}^{1,2} B_{v2}^2 K_{a1} * (z_1 b_{z1} l_{t1} K_{Fl1})_2 \quad (6)$$

де  $K_{обр1,2}$  - коефіцієнти, що залежать від якості обробки поверхні статора або ротора;  $\Delta_{1,2}$  - товщина листа осердя;  $K_{1,2}$  - коефіцієнт збільшення втрат з-за наявності пазів;  $Z_{1,2}, t_{1,2}$  - число пазів та їхній крок;  $b_{z1,2}$  - ширина зубців;  $l_{t1,2}$  - активна довжина осердь та коефіцієнт їх заповнення сталлю;  $B_{v1,2}$  - амплітуди пульсацій магнітної індукції.

- пульсаційні втрати (обумовлені зміною у часі потоку вищих просторових гармонік поля, що проникають в зубцеву зону статора і ротора)

$$Q_{Z1,2v} = \sum_v K_{обр} \frac{\pi^2 \Delta^2}{6\rho} f_{1,2v}^2 B_{1,2v}^2 Z_{1,2} h_{Z1,2} l_{Fe} b_{Z1,2} K_l \quad (7)$$

де  $K_l$  - коефіцієнт, що ураховує нерівномірність поля по товщині  $\Delta$  листа стали магнітопроводу за рахунок вихрових струмів;  $\rho$  - питомий опір.

Аналіз отриманих результатів ДВ з розрахунку і досліду показав, що у ВД великої потужності доцільно застосовувати шестифазну обмотку, що істотно поліпшує форму поля у повітряному проміжку за рахунок виключення з МРС статорної обмотки ряду просторових гармонік, що позитивно позначається на величинах ДВ і електромагнітного моменту. Так рис.1 показує зменшення втрат на поверхні ротора і на збудження при переході с трьох- на шестифазну обмотку, при тому порівнюються втрати, що мають місце у випадку живлення синусоїдним струмом (sin), а також від тиристорного перетворювача (ТП) в системі ВД.

Для ВД найбільше значення мають ДВ в роторі від вищих гармонік МРС статора. Зменшення цих втрат можливе вибором величини укорочення кроку обмотки, що з цього погляду для трифазного ВД доцільно приймати в діапазоні  $\beta = 0,8 \div 0,83$ , а для шестифазного -  $\beta = 0,9 \div 0,92$ . Одну з ілюстрацій цього подано на рис.2 при різних числах пазів  $q$  на полюс и фазу.

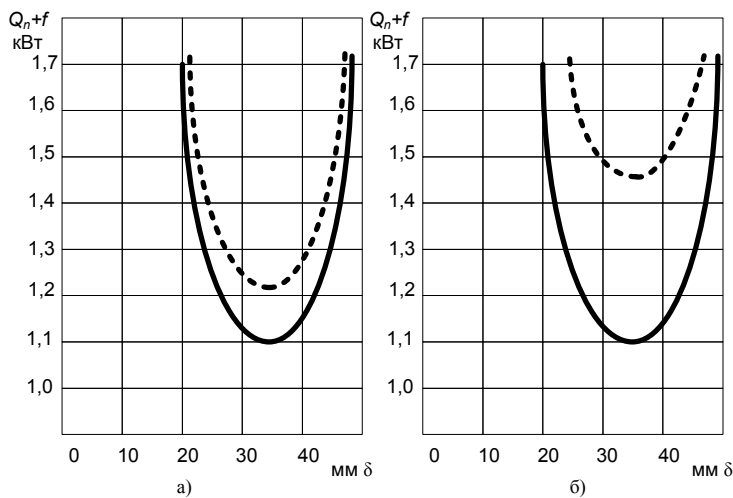


Рис. 1. Залежність втрат збудження і поверхневих втрат ротора від величини повітряного проміжку б: а)  $m = 3$ ; sin ----, ТП - - б)  $m = 6$ ; sin ----, ТП - - .

Для зниження пульсаційних втрат від зубцевих гармонік небажано, щоб кроки по пазах статора і ротора були б близькі чи кратні один одному.

Конструкція і параметри демпферних контурів у шестифазному виконанні ВД повинні визначатися з позиції зменшення й оптимального розподілу додаткових втрат, при цьому за рахунок зменшення активних опорів демпферної обмотки і клинів може бути досягнутий позитивний ефект.

Одною з вимог, що диктуються за умовами експлуатації, при формуванні ВД, тобто виборі типів двигуна і перетворювача, параметрів системи керування і регулювання, є забезпечення заданих віброакустичних показників і надійності. Актуальність даного питання пов'язана з тим, що, в порівнянні з іншими типами регульованих електроприводів, принцип роботи ВД зв'язаний з появою, найчастіше значних змінних складових в електромагнітному моменті виконавчого двигуна.

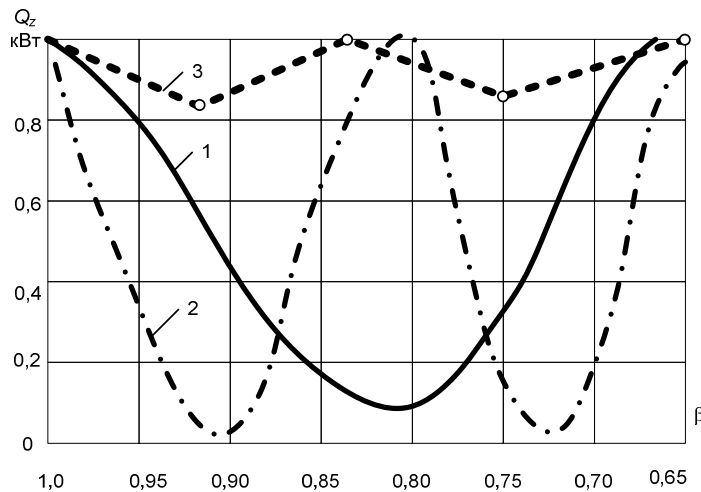


Рис. 2. Вплив укорочення кроку обмотки на поверхневі втрати ротора від вищих гармонік МРС статора (1 –  $m = 3$ ,  $q = \infty$ ; 2 –  $m = 6$ ,  $q = \infty$ ; 3 –  $m = 6$ ,  $q = 2$ )

Приведемо вираз для визначення електромагнітного моменту ВД. Так для ВДЗ формула сумарного електромагнітного моменту на часовому інтервалі

$\left(0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} - \gamma_k\right)$  має вигляд:

$$m_{\Sigma M}(t) = m_a(t) + m_b(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{E_m'' I_d}{\omega} \cos\left(\omega t - \delta - \frac{\pi}{6}\right) \quad (8)$$

а на часовому відрізку  $\left(\frac{\pi}{3} - \gamma_k \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3}\right)$

$$m_{\Sigma M}(t) = m_a(t) + m_b(t) + m_c(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{E_m'' I_d}{\omega} \left[ \left(\frac{\pi}{3\gamma_k} - \frac{\omega t}{\gamma_k}\right) * \cos\left(\omega t - \delta - \frac{\pi}{6}\right) + \sin(\omega t - \delta) \right] \quad (9)$$

де  $E_m'' = 2\pi f \Phi W K_w$  - ЕРС у обмотці якоря;  $\gamma_k$  - кут комутації тиристорів.

### Висновки.

Дискретність системи живлення СМ, несинусоїдність зміни в часі струмів у її обмотках і просторовому розподілі робочого потоку визначають характер зміни електромагнітного моменту. При цьому істотне значення мають параметри окремих елементів системи, структура її компонування і режими роботи електропривода. Як показує досвід досліджень різних типів ВД, не тільки для кількісної, але і якісної оцінки впливу зазначених факторів на характер зміни електромагнітного моменту необхідно враховувати як процеси в окремих елементах системи ВД, так і їхній взаємний вплив.

**Список джерел інформації:** 1. Волчуков Н.П., Элксинс В.Я., Фаран А.Ш. Особенности протекания процессов в вентильных двигателях различного исполнения // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків, 2001.- №12.- С. 311-312. 2. Математическая модель электромагнитных процессов в вентильном двигателе Русаков А.М., Соломин А.Н., Окунеева Н.А., Шатова И.В. Вестник Московского энергетического института. 2007. № 3. С. 33-40. 3. Чернявская М.В., Глебова М.Л., Карпалюк И.Т. Описание математической модели вентильного двигателя с использованием модульного принципа // Коммунальное хозяйство городов: науч.- техн. сб. – К.: Техніка, 2009. – Вып. 88. – С. 223 – 232. – (Серия «Технические науки»).



**Кузнецов Анатолій Іванович**, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера в Харківському інституті інженерів комунального будівництва за фахом світлотехніка та джерела світла, дисертацію кандидата технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини та апарати відповідно в 1972, 1985 роках. Завідувач кафедрою «Інформаційні системи і технологій в міському господарстві» Харківської національної академії міського господарства з 2004 р.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами електричних машин



**Чернявська Маргарита Василівна**, доцент, кандидат технічних наук. Захистила диплом інженера електричні машини та апарати, дисертацію кандидата технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини відповідно в 1962, 1974 роках. Доцент кафедри «Інформаційні системи і технологій в міському господарстві» Харківської національної академії міського господарства.

Наукові інтереси пов'язані з проблемами електричних машини



**Карпалюк Ігор Тимофійович**, доцент, кандидат технічних наук. Захистив диплом інженера і дисертацію кандидата технічних наук в Харківському державному інституті інженерів комунального господарства за фахом світлотехніка та джерела світла відповідно в 1993, 1997 роках. Доцент кафедри «Інформаційні системи і технологій в міському господарстві» Харківської національної академії міського господарства.

Наукові інтереси: енергонезалежність технічних систем, винахідництво



**Глебова Марина Леонідівна**, доцент, кандидат технічних наук. Захистила диплом інженера в Харківському державному інституті інженерів комунального господарства за фахом електроспоживання та освітлення міст, дисертацію кандидата технічних наук в Національному технічному університеті Харківський політехнічний інститут за фахом електричні машини та апарати відповідно в 1983, 2001 роках. Доцент кафедри «Теоретичної та загальної електротехніки» Харківської національної академії міського господарства.

---

Анотація (на англійській мові)

It is rotined that traditional substituting of the real form the curve of phase current by trapezoid form for Valve engine (VE) not always correct at research of additional losses and pulsations of electromagnetic moment of VE. The comparative analysis of additional losses is conducted.

Index terms - Valve engine, synchronous machine, rational parameters of construction