

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ФАРАН АЙМАН ШУКРІ

УДК 621.313.3: 621.382.2

**ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЕНТИЛЬНИХ ДВИГУНІВ
СЕРЕДНЬОЇ І ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ХАРКІВ - 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківській державній академії міського господарства Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Волчуков Микола Павлович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри передачі електричної енергії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мілих Володимир Іванович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри загальної електротехніки;

кандидат технічних наук, доцент
Римша Віталій Вікторович,
Одеський національний політехнічний університет, докторант
кафедри електричних машин.

Провідна установа: Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ.

Захист відбудеться 18 грудня 2003 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м.Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий « 14 » листопада 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Ф.Болюх

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Основним напрямком удосконалювання промислового устаткування для систем генерування і споживання електроенергії є підвищення їхньої продуктивності, економічності і надійності, засноване на застосуванні новітніх досягнень матеріалознавства, перетворювальної техніки й автоматики. Значні успіхи досягнуті в області промислової електроніки, що з'явилося могутнім стимулом для розвитку різного роду систем, у яких, завдяки органічному зв'язку електричних машин і статичних перетворювачів частоти, вдається не тільки підвищити надійність і якість енергопостачання, але і створити системи з новими експлуатаційними властивостями, максимально адаптовані до зовнішніх збурень. Серед таких систем особливе місце займають вентильні двигуни (ВД), що представляють собою електромашинно-вентильні системи, що складаються із синхронних машин (СМ) і залежних інверторів, керованих датчиком положення ротора.

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 ВД із поліпшеними характеристиками, що мають рівноцінні з МПС технічні характеристики, але більш надійні при менших експлуатаційних витратах, є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в рамках науково-дослідної роботи (НДР) за договором №05-8/2001 «Дослідження роботи систем вентильних двигунів з використанням засобів комп'ютерного моделювання» з ВАТ «Електромашина», м. Харків. При проведенні НДР безпосередньо здобувачем виконано: розроблено математичні моделі і проведено аналіз процесу комутації у ВД різних типів; проведено розрахунок в усталеному і перехідному режимах роботи ВД різного виконання і зроблено їх порівняльний аналіз; проведено аналіз впливу системи регулювання і типу перетворювача на показники ВД; зроблено розрахунок і проаналізовано вплив різних джерел живлення на динамічні характеристики ВД; проведено оцінку роботи ВД з урахуванням впливу вищих гармонік на його характеристики; проведено систематизацію і розрахунок додаткових витрат у СМ, що живляться від тиристорного перетворювача.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є пошук путей поліпшення робочих характеристик вентильних електродвигунів середньої і великої потужності на основі аналізу режимів їхньої роботи з використанням засобів математичного і цифрового моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз теоретичних розробок і практичного застосування ВД середньої і великої потужності, визначити їхні характерні типи, що мають принципові розходження;
- скласти математичну модель, розробити алгоритм розрахунку і його програмну реалізацію для проведення порівняльного аналізу робочих характеристик і експлуатаційних властивостей ВД різного виконання;
- провести аналітичні дослідження режимів роботи ВД постійного струму для визначення їхніх раціональних параметрів і характеристик;
- с використанням методу математичного моделювання провести розрахунок і аналіз режимів роботи ВД змінного струму різного виконання для визначення шляхів поліпшення їхніх параметрів і характеристик;
- провести дослідження додаткових втрат і пульсацій електромагнітного моменту у ВД різного виконання і визначити їхній вплив на техніко-економічні показники цих двигунів.

Об'єктом дослідження є процес створення вентильних двигунів середньої і великої потужності з поліпшеними експлуатаційними властивостями.

Предметом дослідження є параметри, режими роботи, схемні і конструктивні виконання вентильних двигунів середньої і великої потужності, що впливають на їхні техніко-економічні показники.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базувалися на чисельному розв'язанні часових диференціальних рівнянь явними методами, використанні схем заміщення і методів розв'язання колових задач, методиках апроксимації функцій, елементах теорії подібності процесів.

Наукова новизна одержаних результатів.

На основі єдиної математичної моделі і проведеного комплексу порівнювальних досліджень електромагнітних і електромеханічних процесів в різних типах ВД середньої і великої потужності визначні шляхи їх раціонального вибору і покращення їх робочих властивостей і експлуатаційних характеристик.

Уніфіковані математичні моделі і алгоритми розрахунку, що достатньо повно описують процеси в складових елементах системи ВД з урахуванням зв'язків між ними, для дослідження режимів роботи ВД різного виконання з єдиних позицій.

На основі аналізу стаціонарних і перехідних режимів роботи ВД сформульовані теоретичні підходи до вибору раціональних параметрів, режимів роботи, схемних і конструктивних рішень таких машин середньої і великої потужності.

Проведено систематизацію додаткових втрат (ДВ) у ВД, найбільш істотних і специфічних з погляду живлення синхронної машини від тиристорного перетворювача. Одержали

подальший розвиток розрахункові методики ДВ у ВД з урахуванням аналізу гармонійних складових магніторушійної сили (МРС).

Практичне значення одержаних результатів.

Запропоновано методики оцінювання робочих характеристик і експлуатаційних властивостей ВД середньої і великої потужності на стадії їхнього проектування.

Дано рекомендації зі зменшення ДВ і пульсацій електромагнітного моменту у ВД середньої і великої потужності.

Дано оцінку впливу параметрів і схемних рішень ВД середньої і великої потужності на їхні робочі характеристики.

Результати дисертаційної роботи можуть використовуватися при розробці ВД середньої і великої потужності з поліпшеними характеристиками. Зокрема, окремі результати впроваджені у ВАТ «Електромашина» (м. Харків), що підтверджується відповідним актом.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, одержані автором особисто. Зокрема у всіх розділах роботи здобувачу належить розробка методик аналітичних досліджень та участь в їх реалізації, аналіз і узагальнення результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації.

Основні наукові і практичні результати роботи доповідалися й обговорювалися на 6-ті міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Алушта, 2001 і 2002 р.), «Силова електроніка і енергоефективність» (м. Алушта, 2001 і 2002 р.); «Інформаційні технології: наука, техніка,...» (м. Харків, 2002 р.); міжнародному симпозіумі «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (SIEMA'2002) (м. Харків, 2002 р.).

Публікації. Основні положення дисертації відображено у 8 публікаціях в фахових виданнях, серед яких 3 виконано без співавторів, у тому числі 1 стаття у науковому журналі і 7 статей у збірниках наукових праць.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 184 сторінки. Робота містить 31 ілюстрацію по тексту, 4 ілюстрації на 2 сторінках; 7 таблиць по тексту, 1 таблицю на 1 сторінці; список використаної літератури з 110 найменувань на 11 сторінках; 2 додатка на 34 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 135 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі дослідження. Викладено основні наукові і практичні результати, що були отримані в роботі, а також основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі проведений огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи. Сформульовано підходи до розробки математичних моделей ВД.

Обраний для дослідження найбільш розповсюджений варіант виконання ВД середньої і великої потужності; при цьому виконавчий двигун представлений у вигляді СМ з 3-х або 6-ті фазною обмоткою статора, а перетворювач представлений у вигляді безпосереднього перетворювача частоти (БПЧ) та у вигляді явної ланки постійного струму (ЯЛПС).

В другому розділі викладено основні положення математичного моделювання стаціонарних і перехідних режимів роботи вентильних двигунів різного виконання. При цьому застосовується математичний метод дослідження на основі використання миттєвих значень змінних.

Структура математичної моделі формулюється в повній відповідності з реальною фізичною структурою об'єкта і використанням модельного принципу.

При математичному моделюванні всі параметри і змінні в рівняннях були представлені у відносних одиницях (в.о.).

З огляду на особливість роботи СМ при запису рівнянь були використані змішані координати d, q для роторних кіл та a, b, c - для статорних.

Слід зазначити, що при переході від 3-фазного виконання СМ до багатофазного при компонуванні якірних обмоток у вигляді окремих фазних груп основні співвідношення залишаються незмінними, але істотно зростає кількість диференціальних і алгебраїчних рівнянь.

Процеси в СМ описуються системою диференціальних рівнянь:

$$p_{\tau}\Psi_{AB}(k) = U_{AB}(k) - (i_A(k) - i_B(k))r, \quad k=1, \dots, m/3 \quad (1)$$

$$p_{\tau}\Psi_{BC}(k) = U_{BC}(k) - (i_A(k) + 2i_B(k))r, \quad k=1, \dots, m/3 \quad (2)$$

$$p_{\tau}\Psi_f = U_f - r_f i_f, \quad (3)$$

$$p_{\tau}\Psi_{jd} = -r_{jd} i_{jd}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

$$p_{\tau}\Psi_{iq} = -r_{iq} i_{iq}, \quad i = 1, 2, \dots, l, \quad (5)$$

$$p_{\tau}\Psi_{ad} = l_d p_{\tau} i_{\Sigma d} + m_{dq} p_{\tau} i_{\Sigma q}, \quad (6)$$

$$p_{\tau}\Psi_{aq} = l_q p_{\tau} i_{\Sigma q} + m_{qd} p_{\tau} i_{\Sigma d}, \quad (7)$$

$$p_\tau \omega = \left(\sum_{\kappa=1}^{m/3} \Psi_d(\kappa) i_q(\kappa) - \sum_{\kappa=1}^{m/3} \Psi_q(\kappa) i_d(\kappa) - m_\tau \right) H_j^{-1}, \quad (8)$$

$$p_\tau \gamma = \omega. \quad (9)$$

Тут позначено: Ψ_{AB}, Ψ_{BC} - магнітні потокозчеплення контурів обмотки якоря СМ відносно відповідних затискачів; r - опір фази обмотки якоря; $\Psi_d(\kappa), \Psi_q(\kappa)$ - проекції магнітних потокозчеплень фазних обмоток якоря на осі d і q ; Ψ_f, U_f, r_f, i_f - магнітне потокозчеплення, напруга, активний опір і струм обмотки збудження; $i_A(\kappa), i_B(\kappa), i_q(\kappa), i_d(\kappa)$ - фазні струми обмотки якоря і їхні проекції на осі d і q ; $\Psi_{jd}, r_{jd}, i_{jd}, \Psi_{jq}, r_{jq}, i_{jq}$ - магнітні потокозчеплення, активні опори і струми еквівалентних контурів демпферної системи ротора, що розміщені за осями d і q ; $i_{\Sigma d}, i_{\Sigma q}, l_d, l_q, m_{dq}$ - сумарні МРС за осями d і q і індуктивності та взаємна індуктивність відповідних еквівалентних контурів; γ - поточне кутове положення ротора; m_τ - гальмовий момент на валу; $\tau = t/t_\sigma$ - час (безрозмірна змінна), а символ p_τ - відповідна похідна; H_j - інерційна стала; ω - кутова швидкість ротора; m - число фаз обмотки статора.

Введення в математичну модель диференціальних рівнянь (6) і (7) дозволяє виключити ітераційні цикли при визначенні потокозчеплень від полів взаємоіндукції статорних і роторних контурів у подовжній (ψ_{ad}) і поперечній (ψ_{aq}) осях машини.

Для моделювання ВД з ЯЛПС, коли кожний інвертор багатофазної системи підключений до джерела з напругою U_d через сгладжувальний дросель з параметрами $x_{др}, r_{др}$, маємо систему диференціальних рівнянь:

$$p_\tau i_{п}(\kappa) = \frac{1}{x_{др}} [U_d - U_{п}(\kappa) - r_{др} i_{п}(\kappa)], \quad \kappa = 1, 2, \dots, m/3, \quad (10)$$

де $U_{п}, i_{п}$ - напруга і струм на вході інвертора.

При більш складних електромагнітних зв'язках системи сгладжувальних дроселів в ВД с БПЧ спад напруги на кожному i -ому дроселі ($i=1, 2, \dots, 6$) для однієї трифазної групи

$$U_i = L_{др} p_\tau i_i + M_{др} \cdot \sum_{i=1}^6 p_\tau i_i + r_{др} i_i, \quad (11)$$

де $r_{др}, L_{др}, M_{др}$ - активний опір, власна і взаємна індуктивності дроселів.

Моделювання тиристорного перетворювача робиться за допомогою спеціальних матриць стану: при цьому тиристори моделюються активними опорами, які відрізняються на три порядки у відкритому і закритому стані.

Параметри і характеристики джерела живлення електроприводів із ВД мають велике значення як у питаннях підвищення електричних показників, так і при оптимізації структур окремих елементів ВД. При розробці математичної моделі ВД джерело живлення представлене заданими синусоїдними ЕРС

$$e_{ab} = E_m \sin(\omega_c \tau), \quad (12)$$

$$e_{bc} = E_m \sin(\omega_c \tau - 2\pi/3) \quad (13)$$

і параметрами r_c, x_c , величини яких у відносних одиницях знаходяться на рівні активних опорів і індуктивних опорів розсіювання фазних обмоток СМ.

При відомих напругах U_{ab}, U_{bc} , (вони є вихідними змінними в блоці перетворювача) струми у фазах джерела живлення, за умови $i_a + i_b + i_c = 0$, визначаються за диференціальними рівняннями:

$$p_\tau i_a = \frac{2(e_{ab} - U_{ab}) + (e_{bc} - U_{bc})}{3L_c} - i_a \frac{r_c}{L_c}, \quad (14)$$

$$p_\tau i_b = \frac{-(e_{ab} - U_{ab}) + (e_{bc} - U_{bc})}{3L_c} - i_b \frac{r_c}{L_c}. \quad (15)$$

У третьому розділі приведені результати досліджень ВД постійного струму (ПС) з природною комутацією тиристорів інвертора.

Вивчення режимів роботи ВД ПС на базі звичайних припущень про ідеально згладжену форму струму джерела живлення, нульових активних опорів окремих кіл, лінійності характеристики намагнічування магнітопроводу, відсутності пульсації частоти обертання може виявитися неприпустимо грубим при оцінці основних експлуатаційних властивостей двигунів зазначеного типу.

Зазначене відображено на рис.1, де подано залежності частоти обертання ω від струму джерела живлення i_n у вигляді розрахункових кривих та дослідних точок для ВД ПС при конкретних його параметрах. Характеристику 1 отримано без урахування пульсацій струму i_n , активних опорів контурів та насичення магнітопроводу СМ. Крива 2 відповідає тем же припущенням, але з урахуванням насичення. Криві 3,4 і 5 розраховані за повною математичною моделлю (перша з них побудована в функції середнього (i_{ncp}), а інші - максимального (i_{nmax}) і мінімального значень (i_{nmin}) пульсуючого струму i_n .

Зневага насиченням, що помітно знижує магнітний потік у машині, для деяких реальних процесів приводить до помилок у визначенні поточних значень частоти обертання, електромагнітного моменту, кутів комутації тиристорів, струмів обмоток, що досягають п'ятдесятьох і більш відсотків. Тим часом, при розгляді ординарних ситуацій, не пов'язаних з оцінкою поведіння ВД ПС на межах стійкості, часто цілком задовільні дані вдається одержати, застосовуючи наближені способи урахування насичення, наприклад, оперуючи скоректованими параметрами, незмінними при обмеженому діапазоні варіації змінних.

Неврахування активних опорів позначається при глибокому регулюванні швидкості електроприводів, у пускових режимах і інших випадках, коли мають місце малі частоти обертання вала ($\omega \leq 0,3$ в.о.). Це допущення, зокрема, завищує критичну величину ω_k при пуску ВД ПС, після попереднього розгону на $20 \div 25\%$, а похибка у визначенні струму i_n і електромагнітного моменту m_{em} досягає $30 \div 40\%$.

Наявність пульсацій у кривій i_n не викликає помітного порушення співвідношень між середніми значеннями змінних. Однак їх необхідно мати на увазі при аналізі внутрішніх процесів у системі: розрахунку втрат, крутильних коливань валопроводів, кутів комутації тиристорів, виборі регульовального джерела живлення і захисної апаратури. Для багатьох динамічних переходів: пусків, раптових змін навантажень, реверсів тощо, характерними є інтервали переривчастих струмів інвертора, які не описані у відомих методиках.

Достовірні результати при вивченні найбільш важких в експлуатації пускових режимів ВД ПС можна одержати лише, аналізуючи спільно електромеханічні й електромагнітні процеси в системі. Різного роду аналітичні методи, засновані на припущеннях про сталість частоти обертання ротора і потокозчеплень з контурами індуктора на періоді повторюваності, які дуже корисні при з'ясуванні якісної картини явищ, можуть привести до помітних кількісних похибок.

Успішне завершення пуску ВД ПС після попереднього розгону залежить від багатьох параметрів. Визначальний вплив на критичну частоту обертання ротора ω_k має відношення напруги живлення U_n до ЕРС СМ e_0 , граничний рівень якої обмежений насиченням. Якщо в машинах зі слабо насиченим магнітопроводом $\omega_k = 0,2 \div 0,3$ в.о., причому принципово можливий саме запуск при номінальній напрузі від спеціально спроектованих установок зі зниженими понадперехідними опорами ($X''_d \leq 0,1$) і інерційними постійними ($H_j \leq 50$ рад), то в звичайних умовах величина ω_k зростає до $0,4 \div 0,8$ в.о.

Дослідження ВД з використанням математичної моделі вимагають еквівалентного подання джерела струму, що здійснюється введенням додаткового опору r_d послідовно зі згладжувальним дроселем. Вибираючи параметр r_d і напругу U_n такими, щоб розрахункові (мак-

симальна і стала) величини i_n відповідали дослідним, вдається одержати дуже гарні результати з миттєвих значень змінних.

Практичне використання способу пуску ВД постійного струму від регульованого джерела струму обмежено електроприводами з $H_j < 1000$ рад. Більш сприятливі характеристики вдається одержати за рахунок збільшення ЕРС СМ і кута установки β_0 датчиків положення ротора, точна попередня орієнтація якого не обов'язкова.

Дослідження показали, що з індуктивних опорів СМ визначальними є понадперехідні опори X'_d і X'_q . Вплив кута β_0 і опора X'_d , що варіюється за рахунок індуктивного опора розсіювання статорної обмотки, відображено на рис.2 при різних значеннях інерційної постійної H_j .

Хоча вплив насичення на основні показники процесу пуску вельми істотний, в ряді випадків вдається використати спрощений підхід, вводячи в лінеаризовані рівняння ненасиченої СМ коефіцієнт насичення $k_{\mu 0}$. Співставлення безперервних і пунктирних кривих на рис.3, розрахованих для ВД ПТ при інших однакових параметрах, дозволяє зробити висновок про точність подібного наближення.

У четвертому розділі приведені результати досліджень додаткових втрат (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 якорного кола приводить до неоднозначного зростання ДВ. При цьому вони можуть досягти рівня 20-30% від основних втрат, значно знижуючи коефіцієнт корисної дії привода.

У розділі 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):

$$Q_m = \frac{m}{2} r_1 \sum_{\mu=1,5,7} I_{m\mu}^2 K_{a\mu} - \frac{m}{2} r_1 I_{m1}^2, \quad (16)$$

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

значені функції приведеної висоти провідників, що заповнюють паз статора; μ - номер гармоніки струму;

- в демпферній обмотці від ν -ої просторової хвилі МДС статора

$$Q_{gm\nu} = 2ph_g K^2 I_{\mu\nu}^2 R_{2\nu}, \quad (17)$$

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

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

$$Q_{f\mu\nu} = \frac{1}{2} I_{f\mu\nu}^2 r_f K_{fv}; \quad (18)$$

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

$$Q_{n2} = \sum_{\nu_2} Q_{n2\nu}; \quad Q_{n1} = \sum_{\nu_1} Q_{n1\nu}, \quad (19)$$

$$Q_{n2\nu} = K_2 K_{обр2} \frac{\Delta_2 \sqrt{\pi\gamma_2}}{2\sqrt{\mu_2}} \frac{\tau}{\nu_2} f_{\nu_2}^{1,5} B_{\nu_1}^2 K_{a2} * (z_2 b_{z2} l_{t2} K_{Fl2}) \quad (20)$$

$$Q_{n1\nu} = K_1 K_{обр1} \frac{\Delta_1 \sqrt{\pi\gamma_1}}{2\sqrt{\mu_1}} \frac{\tau}{\nu_1} f_{\nu_1}^{1,5} B_{\nu_2}^2 K_{a1} (z_1 b_{z1} l_{t1} K_{Fl1})_2; \quad (21)$$

де $K_{обр1,2}$ - коефіцієнти, що залежать від якості обробки поверхні статора (1) або ротора (2); $\Delta_{1,2}$ - 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; $l_{t1,2}$, $K_{Fl1,2}$ - активна довжина осердь та коефіцієнт їх заповнення сталлю; $B_{\nu 1,2}$ - амплітуди пульсацій магнітної індукції.

- пульсаційні втрати (обумовлені зміною у часі потоку вищих просторових гармонік поля, що проникають в зубцеву зону статора (1) і ротора (2))

$$Q_{Z1,2\nu} = \sum_{\nu} K_{обр} \frac{\pi^2 \Delta^2}{6\rho} f_{1,2\nu}^2 B_{1,2\nu}^2 Z_{1,2} h_{Z1,2} l_{Fe} b_{Z1,2} K_l, \quad (22)$$

де K_l - коефіцієнт, що ураховує нерівномірність поля по товщині Δ листа стали магнітопроводу за рахунок вихрових струмів; ρ - 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.4 показує зменшення втрат на поверхні ротора і на збудження при переході с трьох- на

шостіфазну 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.5 при різних числах пазів q на полюс и фазу.

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.

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.

Приведемо вираз для визначення електромагнітного моменту ВД. Так для ВДЗ формула сумарного електромагнітного моменту на часовому інтервалі $(0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} - \gamma_k)$ має вигляд:

$$m_{эм}(t) = m_a(t) + m_b(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{E_m'' I_d}{\omega} \cos\left(\omega t - \delta - \frac{\pi}{6}\right), \quad (23)$$

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

$$\begin{aligned}
m_{\text{эм}}(t) &= m_a(t) + m_b(t) + m_c(t) = \\
&= \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{E'' I_d}{\omega} \left[\left(\frac{\pi}{3\gamma_k} - \frac{\omega t}{\gamma_k} \right) * \cos\left(\omega t - \delta - \frac{\pi}{6}\right) + \sin(\omega t - \delta) \right], \quad (24)
\end{aligned}$$

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

У п'ятому розділі представлені результати досліджень ВД змінного струму 4-х типів, найбільш застосовуваних для машин середньої і великої потужності.

Проведено вибір і обґрунтування базових параметрів елементів системи ВД, використовуваних при теоретичних дослідженнях. Отримано співвідношення між окремими параметрами, що забезпечують порівнянність результатів розрахунку характеристик різних типів ВД.

Розглянуто особливості протікання електромагнітних процесів у різних типах ВД і показано, що основною причиною їхньої відмінності є своєрідність параметрів і характеру зміни величин, що визначають процес комутації тиристорів у перетворювачах. Виявлено і проілюстровано вплив окремих параметрів на комутаційні показники в розглянутих системах ВД. Зокрема, при порівняннях ВД3 і ВД6 це індуктивності, обумовлені полями розсіювання фазних обмоток, а ВД із ЯЛПС і ВД із БПЧ - відносна величина частоти напруги джерела живлення.

Аналіз усталених режимів роботи систем ВД, що відрізняються типом перетворювача, показав, що:

- при віддаленні від меж стійкості основні показники робочих характеристик цих систем фактично однакові;
- у загальному випадку пульсації електромагнітного моменту СМ мають більш широкий спектр гармонік у ВД із БПЧ у порівнянні з ВД із ЯЛПС;
- усталена робота ВД із ЯЛПС при природній комутації тиристорів можлива при невеликих перевантаженнях до (1,1-1,2) $m_{\text{емн}}$ ($m_{\text{емн}}$ - номінальне значення електромагнітного моменту), причому деяке збільшення перевантаження може бути досягнуте за рахунок збільшення кута випередження відпирання тиристорів β_0 і зменшення комутаційних параметрів (індуктивних опорів розсіювання x_σ , $x_{\text{сед}}$, $x_{\text{сег}}$);

- найбільш ефективний шлях підвищення перевантажувальної здатності ВД є застосування БПЧ ;

- у ВД із БПЧ за рахунок переходу до змішаної комутації при великих навантаженнях може бути досягнута велика перевантажувальна здатність (до $2m_{\text{емн}}$ і більш);

- основним параметром, здатним істотно збільшити перевантажувальну здатність ВД, є частота ω_c напруги джерела живлення.

Показано, що механічні характеристики ВД6 і ВД3 за зовнішніми показниками практично збігаються. Помітне розходження має місце в кутах комутації, що у ВД6 у більшості випадків виявляються помітно меншими. При цьому перехід від ВД3 до ВД6 приводить до значного, у ряді випадків чотирьох-п'ятикратного зменшення пульсацій основних змінних. Зменшення амплітуд і збільшення частоти пульсацій електромагнітного моменту і струмів у роторних контурах СМ у системі ВД6 значно поліпшує її віброакустичні і теплові показники. Ці відомі факти в роботі доповнені кількісними співвідношеннями.

Проведене порівняння процесів і інтегральних характеристик ВД із ЯЛПС і ВД із БПЧ при роботі їх у динамічних режимах показало, що:

- істотно відрізняються пускові характеристики ВД. Так, при рівності максимальних величин електромагнітного моменту, час розвантажування СМ у ВД із БПЧ у 1,2-2 рази менше, ніж у ВД із ЯЛПС. Дана перевага ВД із БПЧ найсильніше виявляється при малих інерційних постійних електропривода;

- пульсації електромагнітного моменту за час розвантажування в системах із БПЧ значно менше, а при збільшенні пускового моменту ця відмінність зростає;

- у порівнюваних способах пуску використання системи ВД із БПЧ приводить до меншого спотворення форми струму джерела живлення, чим у випадку ВД із ЯЛПС;

- основною перевагою ВД із ЯЛПС є відсутність (практично) впливу частоти джерела живлення на показники пуску. У той же час у системах із БПЧ працездатність ВД у важких динамічних режимах залежить від ω_c ;

- при заданому обмеженні сплески електромагнітного моменту в системах з ЯЛПС трохи менше (на 10-15 %), чим із БПЧ;

- в цілому, як за реалізацією систем керування, що забезпечують працездатність електропривода у важких динамічних переходах (прямі пуски, різкі накидки навантаження), так і за граничними динамічними показниками, перевагу варто віддати системам із БПЧ.

Виконано великий обсяг розрахунків динамічних режимів роботи ВД3 і ВД6 з БПЧ. Порівняльний аналіз цих матеріалів дозволив виявити й обґрунтувати якісне розходження в процесах і одержати кількісну оцінку динамічних показників ВД3 і ВД6. Проведені дослідження показали:

- при рівних умовах прямого пуску час розвантажування СМ у ВДЗ і ВД6 практично збігається (відмінність у межах 5 %), причому в системі ВД6 має місце з однієї сторони на (5-15) % менші величини максимальних значень електромагнітного моменту, з іншої - на (10-25) % більші сплески струмів в обмотках СМ і джерелі живлення;

- як і в статичних режимах, при динамічних переходах система ВД6 має істотні переваги по величинах пульсацій електромагнітного моменту. При цьому в залежності від умов роботи і параметрів системи перехід від ВДЗ до ВД6 дозволяє зменшити в (1,2-3) рази пульсації електромагнітного моменту;

- характер протікання електромеханічних процесів і гранично припустимі динамічні показники у ВД із БПЧ залежать від співвідношення між частотою напруги джерела живлення ω_c і частотою обертання ротора ω . При цьому границі зміни ω_c , де забезпечується працездатність ВД у важких динамічних переходах, для ВДЗ трохи ширше, ніж для ВД6;

- при малих інерційних постійних H_j і величинах $\omega_c < 6$ в.о. у системах ВДЗ можуть бути реалізовані більш важкі динамічні режими (наприклад, великі пускові моменти), чим у ВД6. Зі збільшенням H_j і ω_c дана перевага може виявитися в системі ВД6;

- якщо в заданих умовах роботи систем ВДЗ і ВД6 забезпечується їхня працездатність у широкому діапазоні ω_c , то основні динамічні показники в режимах пуску практично не залежать від ω_c ;

- у динамічних режимах, пов'язаних з накидками навантаження на валу СМ, деякі переваги мають системи ВДЗ. Тут, у порівнянні з ВД6, у меншому ступені збільшуються струми в обмотках СМ і пульсації електромагнітного моменту.

Оцінюючи в цілому динамічні показники різних типів ВД, слід зазначити, що вони значно вище у ВД із БПЧ у порівнянні з ВД із ЯЛПС і незначно відрізняються в системах ВДЗ і ВД6.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, що виявляється в комплексному дослідженні електромагнітних і електромеханічних процесів засобами математичного і цифрового моделювання у ВД середньої і великої потужності різних типів й з різними системами живлення і що дозволяє поліпшити робочих властивості і експлуатаційні характеристики цих двигунів. Найбільш значні результати, що отримані, полягають у наступному.

1. Проведений аналіз можливих виконань ВД середньої і великої потужності показав, що найбільш прийнятними є варіанти з виконавчим двигуном у вигляді синхронної машини і з перетворювачем у виді циклоконвертера чи з явною ланкою постійного струму. При цьому найбільш ефективним способом математичного моделювання таких машин є методи дослідження з застосуванням миттєвих значень змінних, що дозволяє з високим ступенем адекватності описати процеси в окремих елементах системи і взаємозв'язки між ними.

2. Освоєна й набула подальшого розвитку математична модель ВД, яка представлена сукупністю декількох самостійних блоків, об'єднаних формально-логічними зв'язками, причому ця модель реалізована у вигляді програмного комплексу.

3. Показано, що при аналізі режимів роботи ВД ПС із природною комутацією тиристорів інвертора необхідно враховувати реальну форму кривої струму джерела живлення, активний опір якірної обмотки СМ, насичення магнітопроводу, пульсації в кривій струму.

4. Визначено основні фактори, що забезпечують успішний пуск ВД ПС при попередньому розгоні і від регульованого джерела струму.

5. Оцінено особливості роботи СМ із перетворювачем у системі ВД із позицій визначення додаткових втрат і пульсацій електромагнітного моменту.

6. Проведено аналіз гармонійного складу МРС і поля в повітряному проміжку при трьох- і шестифазному виконанні обмотки якоря СМ при живленні від тиристорного перетворювача. Зроблено класифікацію додаткових втрат у ВД середньої і великої потужності.

7. Показано, що традиційна заміна реальної форми кривої фазного струму на трапецоїдну у ВД не завжди коректна при дослідженні додаткових втрат.

8. Проведено порівняльний аналіз додаткових втрат у ВДЗ і ВД6 і дано рекомендації щодо вибору раціональних параметрів конструкції обмоток СМ із точки зору зменшення додаткових втрат і пульсацій електромагнітного моменту ВД.

9. Виконано широке коло досліджень стаціонарних і перехідних режимів роботи ВД змінного струму 4-х виконань, що зустрічаються найбільш часто; це дозволило сформулювати рекомендації з вибору ефективних схемних рішень і режимів роботи розглянутих машин.

10. Аналіз стаціонарних режимів роботи показав, що більшу перевантажувальну здатність мають ВД із БПЧ, у яких при переході до змішаної комутації може бути досягнута її дворазова величина. При цьому основним параметром, здатним істотно збільшити перевантажувальну здатність, є збільшення відношення частоти змінної напруги джерела живлення до частоти обертання ротора СМ у номінальному режимі.

11. Аналіз перехідних режимів роботи показав істотну відмінність пускових характеристик ВД із БПЧ і ЯЛПС. Зокрема, час розвантажування першого в два рази менше другого

при рівності величин максимального електромагнітного моменту. Визначеною перевагою ВД із ЯЛПС можна вважати відсутність впливу частоти джерела живлення на показники пуску.

12. Основною відмінністю ВДЗ і ВД6 є істотна перевага останнього з зменшення величини пульсацій електромагнітного моменту в окремих випадках до трьох разів. При цьому їхні динамічні показники практично однакові.

13. Коректність запропонованих методик і отриманих результатів розрахунку ВД різного виконання середньої і великої потужності підтверджується проведеними експериментальними дослідженнями, а також збігом з аналогічними результатами, приведеними в публікаціях інших авторів.

14. Результати роботи використовуються при розробці ВД у ВАТ «Електромашина», що підтверджується відповідним актом впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Волчуков Н.П., Кузнєцов А.И., Фаран А.Ш. Особенности процесса коммутации в вентильных двигателях различного исполнения // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - Харків, 2001. - № 16. - С. 32-34.

Здобувачем були розроблені математичні моделі і проведений аналіз процесу комутації у вентильних двигунах різного виконання й отримані результати розв'язання рівняння ВД із шестифазною обмоткою СМ.

2. Волчуков Н.П., Фаран А.Ш. Влияние системы регулирования и типа преобразователя на динамические свойства вентильного двигателя // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - Харків, 2001.- №12.- С.311-312.

Здобувачем проведений розрахунок усталеної і перехідної роботи ВД різного виконання і виконано їх порівняльний аналіз.

3. Волчуков Н.П., Элкснис В.Я., Фаран А.Ш. Особенности протекания процессов в вентильных двигателях различного исполнения // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - Харків, 2002. - № 12. - С. 221-223.

Здобувачем проведений аналіз впливу системи регулювання і типу перетворювача на показники ВД, що працює в перехідних режимах.

4. Волчуков Н.П., Кузнєцов А.И., Фаран А.Ш. Влияние частоты источника питания на пусковые показатели вентильных двигателей различного исполнения // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - Харьков, 2002.- № 14. - С.10-12.

Здобувачем зроблений розрахунок і проаналізований вплив окремих джерел живлення на динамічні характеристики вентильних двигунів.

5. Фаран А.Ш. Сравнительный анализ добавочных потерь в многофазных вентильных двигателях различного исполнения // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». - Харків, 2002. - № 9. - Т. 3. - С. 97-101.

6. Волчуков Н.П., Фаран А.Ш. Сравнительный анализ рабочих характеристик вентильных двигателей различного исполнения // Технічна електродинаміка.- Київ: ІЕД НАНУ, 2002.- Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки.- Ч.4.- С.91-94.

Здобувачем проведений порівняльний аналіз додаткових втрат у багатофазних вентильних двигунах.

7. Фаран А.Ш. Анализ статических режимов работы вентильных двигателей разного исполнения // Коммунальное хозяйство городов.- Киев: Техніка, 2002. Вып. 38.- С. 252-254.

8. Фаран А.Ш. Анализ добавочных потерь в вентильном двигателе // Коммунальное хозяйство городов.- Киев: Техніка, 2002. Вып. 43. -С. 222-228.

АНОТАЦІЇ

Фаран Айман Шукрі. Шляхи покращення робочих характеристик вентильних двигунів середньої і великої потужності. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.01 - електричні машини і апарати. - Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

Дисертація присвячена розробці поліпшених вентильних двигунів (ВД) середньої і великої потужності на основі аналізу режимів їхньої роботи з використанням засобів математичного і цифрового моделювання.

Проведено комплексне дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів у ВД середньої і великої потужності і визначено шляхи з поліпшення їхніх робочих властивостей та експлуатаційних характеристик.

Одержали подальшого розвитку математична модель і алгоритм розрахунку з дослідження режимів роботи ВД різного виконання.

Запропоновано теоретичний підхід до вибору раціональних параметрів, режимів роботи, схемних і конструктивних рішень ВД середньої і великої потужності.

Одержана удосконалена методика розрахунку додаткових втрат у ВД з урахуванням аналізу гармонійних складових МРС.

Ключові слова: вентильний двигун, математична модель, додаткові втрати, характеристики, режими роботи.

Фаран Айман Шукри. Пути улучшения рабочих характеристик вентильных двигателей средней и большой мощности. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - электрические машины и аппараты. - Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2003.

Диссертация посвящена поиску путей улучшения рабочих характеристик вентильных двигателей (ВД) средней и большой мощности на основе анализа режимов их работы с использованием математического и цифрового моделирования.

Проведено комплексное исследование электромагнитных и электромеханических процессов в ВД средней и большой мощности и показаны пути улучшения их рабочих и эксплуатационных характеристик.

Показано, что наиболее приемлемыми являются варианты с использованием двигателя в виде синхронной машины и преобразователем в виде циклоконвектора или с явным звеном постоянного тока.

Получено дальнейшее развитие математической модели и алгоритма расчета для исследования режимов работы ВД разного исполнения. Показано, что наиболее эффективным способом математического моделирования таких машин являются методы исследования по мгновенным значениям переменных, которые позволяют с высокой степенью адекватности описать процессы в отдельных элементах системы во взаимосвязи между ними.

Показано, что при анализе режимов работы ВД постоянного тока с естественной коммутацией тиристорного инвертора необходимо учитывать реальную форму кривой тока источника питания, активное сопротивление якорной обмотки синхронной машины, насыщение магнитопровода, пульсации в кривой тока.

Определены основные факторы, определяющие успешный пуск ВД постоянного тока при предварительном разгоне и от регулируемого источника тока.

Оценены особенности работы СМ с преобразователем в системе ВД с позиций определения добавочных потерь и пульсаций электромагнитного момента.

Проведен анализ гармонического состава МДС и поля в воздушном зазоре при трех- и шестифазном исполнении (ВД3 и ВД6) обмотки якоря СМ при питании от тиристорного преобразователя. Дана классификация добавочных потерь в ВД средней и большой мощности.

Проведен сравнительный анализ добавочных потерь в ВД3 и ВД6 и даны рекомендации по выбору рациональных параметров конструкции обмоток СМ с точки зрения уменьшения добавочных потерь и пульсаций ВД.

Проведен анализ стационарных и переходных режимов работы ВД с НПЧ и ЯЗПТ, сравнение их пусковых характеристик и сравнение по величине пульсаций электромагнитного момента.

Анализ стационарных режимов работы показал, что большей перегрузочной способностью обладают ВД с НПЧ, в которых при переходе к смешанной коммутации может быть достигнута ее двукратная величина. При этом основным параметром, способным существенно увеличить перегрузочную способность, является увеличение отношения частоты переменного напряжения источника питания к частоте вращения ротора СМ в номинальном режиме.

Анализ переходных режимов работы показал существенное отличие пусковых характеристик ВД с НПЧ и ЯЗПТ. В частности, время разгона первого в два раза меньше второго при равенстве величин максимального электромагнитного момента. Определенным преимуществом ВД с ЯЗПТ можно считать отсутствие влияния частоты источника питания на показатели пуска.

Получена усовершенствованная методика расчета добавочных потерь в ВД с учетом анализа гармонических составляющих МДС.

Ключевые слова: вентильный двигатель, математическая модель, добавочные потери, характеристики, режимы работы.

Faran Ayman Shukri. Way of Improving Operational Characteristics of AC Electronic Motors of Medium and High Capacity. Manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Engineering Sciences (Ph.D. in Engineering) specializing in Electrical Machines and Apparatus (05.09.01).- National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv, 2003.

The dissertation is devoted to design of improved ac electronic motors (EM) of medium and high capacity basing on analysis of their operation modes using tools of mathematical and digital modeling.

There was carried out comprehensive research of electromagnetic and electromechanical processes in the EM of medium and high capacity. This study defines ways of improving their work properties and operational characteristics.

The research developed mathematical model and algorithm of calculation for studying the modes of operation of the EMs of different versions.

It proposes theoretical approach to choosing rational parameters, operation modes, circuitry and design solutions for machines of medium and high capacity.

This dissertation developed the improved methods of calculating the incidental losses in the EM taking into account the analysis of harmonic components of magnetizing force.

Key words: ac electronic motor, mathematical model, incidental losses, characteristics, operation modes.

ПЕРЕЛИК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЧ	-	безпосередній перетворювач частоти;
ВД	-	вентильний двигун;
ДВ	-	додаткові втрати;
ЕРС	-	електрорушійна сила;
МПС	-	машини постійного струму;
МРС	-	магніторушійна сила;
ПС	-	постійний струм;
СМ	-	синхронна машина;
ЯЛПС	-	явна ланка постійного струму.