

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**Рябов Євген Сергійович**



УДК 629.429.3:621.313

**БЕЗРЕДУКТОРНИЙ ТЯГОВИЙ ПРИВОД НА ОСНОВІ РЕАКТИВНОГО  
ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА З АКСІАЛЬНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ  
ДЛЯ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Любарський Борис Григорович,**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
доцент кафедри електричного транспорту та  
тепловозобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гусевський Юрій Ілліч,**  
Українська державна академія  
залізничного транспорту,  
професор кафедри систем електричної тяги

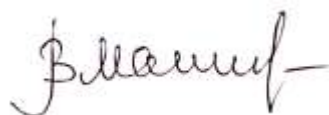
кандидат технічних наук  
**Шайда Віктор Петрович,**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
доцент кафедри електричних машин

Захист відбудеться «20» квітня 2011 р. о 14<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «17» березня 2011 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



Маслієв В.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У теперішній час пасажирський залізничний транспорт України не в повному об'ємі задовольняє потреби суспільства. В першу чергу, це стосується якості послуг, де одним з проблемних питань є недостатня швидкість пасажирських перевезень. Виходячи з нинішніх об'єктивних економічних реалій, особливу привабливість для впровадження має система швидкісних і прискорених денних потягів, рух яких здійснюється по існуючих і модернізованих лініях з максимальними швидкостями руху до (140...160) км/год. Першим кроком в цьому напрямі стала організація руху прискорених потягів на локомотивній тязі. Проте, як свідчить досвід зарубіжних країн, використати потенціал залізниць для організації швидкісного руху в повному об'ємі можна лише з використанням спеціалізованого рухомого складу. Тому створення такого рухомого складу для залізниць України є необхідним і затребуваним.

Найважливішим елементом рухомого складу є тяговий електропривод, оскільки в ньому відбувається перетворення електричної енергії, що споживається з контактної мережі, в механічну роботу по переміщенню рухомого складу. Енергетична ефективність цього перетворення має безпосередній вплив на експлуатаційні витрати і у поєднанні з витратами на обслуговування визначає конкурентоспроможність залізничних пасажирських перевезень. Створення тягового електроприводу для сучасного рухомого складу повинно здійснюватися на базі нових технічних рішень, із застосуванням нових технологій, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності і зниженні витрат життєвого циклу.

Вирішення цього завдання можливе шляхом впровадження безредукторного тягового приводу на основі двигуна з поперечним полем, що дозволяє підвищити ККД, знизити масу колісно-моторного блоку, поліпшити масогабаритні показники тягового приводу в цілому. Однак широкому впровадженню приводу цього типу перешкоджає необхідність використання постійних магнітів і пов'язаних з цим технологічних проблем. Одним з рішень, що дозволяють використовувати прогресивну технологію безредукторного приводу, є застосування двигуна з поперечним полем, який працює виключно за принципом реактивного індукторного двигуна. Дослідження приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком (АІД) є актуальним завданням, яке визначило напрямок дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ" відповідно до науково-дослідної теми МОН України «Наукові основи вибору електроприводу з безконтактними електромеханічними перетворювачами для перспективного транспорту» (ДР №0106U001483) та госпдоговірної теми «Розробка програмно-алгоритмічного комплексу проектування двигунів з поперечним полем», (ТОВ «Електромаш-Інвест», м. Харків, ДР №0108U010504), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – розвиток наукових основ проектування безредукторного тягового приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для швидкісного електрорухомого складу в плані встановлення зв'язку між його параметрами і робочими властивостями.

Для досягнення зазначеної мети поставлено наступні задачі:

– розробити алгоритм вибору головних розмірів і електромагнітних навантажень реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком і провести оцінку впливу цих параметрів на робочі властивості реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком;

– шляхом імітаційного моделювання провести дослідження та оцінку електромеханічних процесів перетворення енергії в системі «перетворювач-тяговий двигун-механічна передача»;

– для знаходження геометричних розмірів і електромагнітних параметрів двигуна і схеми його живлення, при яких електромеханічні процеси в приводі відповідають заданим закономірностям, створити програмно-алгоритмічний комплекс;

– апробувати розроблений програмно-алгоритмічний комплекс при вирішенні завдання створення тягового приводу для перспективного швидкісного електрорухомого складу.

*Об'єктом дослідження* є процес електромеханічного перетворення енергії в тяговому електроприводі на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком.

*Предмет дослідження* – безредукторний тяговий електропривод на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для швидкісного електрорухомого складу.

*Методи дослідження.* Багатокритеріальна оптимізація для визначення геометричних і електромагнітних параметрів реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. Імітаційне моделювання, яке застосовується для дослідження процесів електромеханічного перетворення енергії в тяговому приводі на основі реактивного індукторного приводу з аксіальним магнітним потоком. Метод кінцевих елементів для розрахунку магнітного поля зубцевого шару реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. чисельне моделювання для дослідження крутильних коливань в механічній частині приводу шляхом розв'язання системи нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь методом Адамса. Методи наближення функцій для апроксимації дискретних експериментальних даних цифрового моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

– запропоновано концепцію тягового електроприводу для швидкісного рухомого складу, в основу якої покладено застосування безредукторного тягового приводу з опорно-рамним підвішуванням АІД;

– для визначення електромагнітного моменту АІД в пускових режимах його роботи створено математичну модель, особливістю якої є обчислення моменту шляхом безпосереднього інтегрування закону зміни магнітної

провідності зубцевого шару, параметри якого виражені через геометричні розміри і електромагнітні навантаження;

– запропоновано алгоритм вибору головних розмірів і електромагнітних навантажень АІД за результатами рішення задачі багатокритеріальної оптимізації;

– розроблено імітаційну модель тягового приводу, що поєднує в собі: модель інвертора напруги, створену з використанням бібліотеки SimPowerSystems пакету Matlab; модель системи управління, створену в Simulink; модель АІД, створену з використанням бібліотек Simulink і SimPowerSystems на підставі математичної моделі та методу структурного моделювання;

– встановлено, що при високих швидкостях руху (140...160 км/год), динамічні моменти в пружних елементах досліджуваного приводу практично дорівнюють нулю. У пускових режимах навантаження, викликані пульсаціями моменту – істотні, що викликає необхідність вживання заходів для зниження пульсацій моменту;

– запропоновано методику визначення енергетичних характеристик і робочих властивостей тягового електроприводу на основі АІД;

– розроблено концептуальний проект швидкісного електропоїзда з безредукторним тяговим електроприводом на основі АІД з конструкційної швидкістю 160 км/год.

**Практичне значення отриманих результатів** для електричного транспорту полягає у науковому обґрунтуванні можливості створення безредукторного тягового електроприводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. Для практичної реалізації запропонованої методики проектування розроблено програмно-алгоритмічний комплекс для синтезу безредукторного тягового електроприводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. Універсальність компонент програмно-алгоритмічного комплексу дозволяє їх використання при синтезі тягових приводів на основі індукторних двигунів.

Практична цінність підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи на ДП завод «Електроважмаш», ВАТ «ХК «Луганськтепловоз» (м. Луганськ) та у навчальному процесі кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз стану електроприводу сучасного швидкісного рухомого складу; розробка математичної моделі для визначення електромагнітного моменту реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком в пускових режимах його роботи; створення імітаційних моделей компонент тягового електроприводу і проведення тестування їх роботи; запропонування методики визначення ККД для досліджуваного безредукторного приводу; виконання розрахунків тягового приводу для концептуального проекту швидкісного

електропоїзда з використанням розробленого програмно–алгоритмічного комплексу.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: XVI-XVIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2008-2010 рр.), Міжнародному симпозиумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія та практика» (м. Харків, 2009 р.), XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (м. Алушта, 2009), V Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне регулювання. Сертифікація, діагностика і безпека на залізничному транспорті» (м. Ялта, 2009 р.), 70 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 11 наукових публікаціях, з них 10 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку літератури. Загальний обсяг дисертації становить 162 сторінки, з них: 58 рисунків по тексту; 4 рисунки на 2 окремих сторінках; 10 таблиць по тексту; 1 таблиця на 1 сторінці; 5 додатків на 12 сторінках; списку використаних літературних джерел з 118 найменувань на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** проведено аналітичний огляд типів тягових електроприводів, проаналізовано їх переваги та недоліки, розглянуті тенденції їх розвитку. Показано, що останнім із напрямів розвитку є технологія безредукторного приводу, яка знаходить все більше застосування на рейковому транспорті. Розглянуто типи електродвигунів, що використовуються в безредукторному приводі, та на основі аналізу їх властивостей запропоновано застосувати реактивний індукторний двигун з аксіальним магнітним потоком. Проаналізовано конструктивні виконання колісно-моторного блоку для безредукторного приводу і запропоновано використовувати опорно-рамне підвішування тягового двигуна у поєднанні з муфтами повздовжньої компенсації. Запропонована конструкція колісно-моторного безредукторного блоку на основі АІД (рис.1). Розглянуто принцип дії та конструкцію АІД.

Проаналізовані причини, які заважають реалізації безредукторного тягового приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком, і сформульовано задачі досліджень та напрямки їх вирішення.

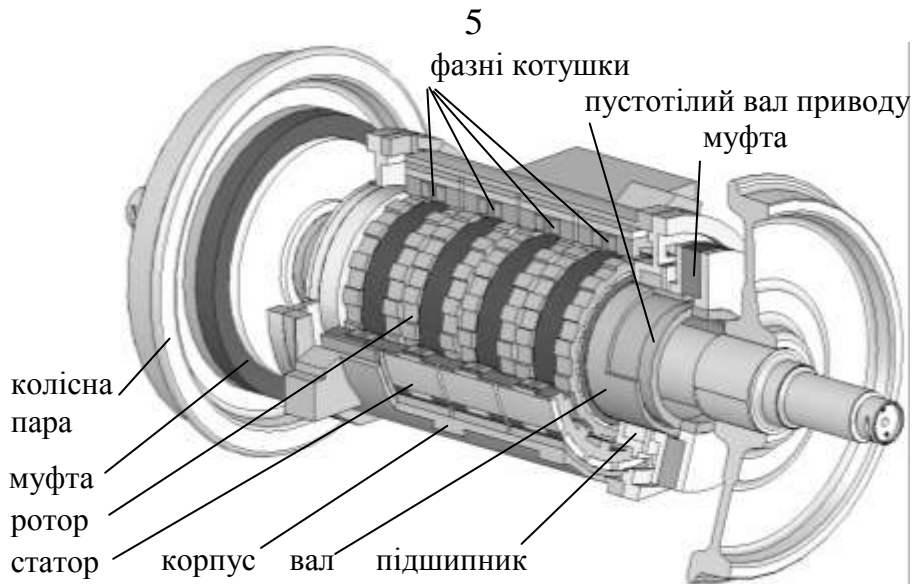


Рис.1. Конструкція безредукторного колісно-моторного блоку з АІД

Другий розділ присвячено розробці наукових основ визначення геометричних розмірів та електромагнітних навантажень реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. В основу аналізу покладено співвідношення для миттєвого значення електромагнітного моменту

$$M_z = \left. \frac{\partial W'_z}{\partial \gamma} \right|_{U_{\delta z} = const}, \quad (1)$$

де  $\partial W'_z$  – приріст коенергії зубцевого шару на ділянці зубцевого поділку статора (рис.2а),  $\partial \gamma$  – зміна кутів положення ротора,  $U_{\delta z}$  – магнітна напруга зубцевого шару.

У пускових режимах роботи прийнято припущення про те, що наростання і спад струму в обмотках АІД проходить майже миттєво. З урахуванням того, що зубцевий шар утворений  $2Z$  зубцевими поділками, а двигун має  $m$  фаз з ідентичними магнітними системами, середнє значення моменту двигуна при повороті ротора на кут  $\pi/Z$  рад ( $Z$  – кількість зубців (по одну сторону фазного блоку), що відповідає переходу з неузгодженого положення зубців статора і ротора в узгоджене, дорівнюватиме

$$M_{\phi_{cp}} = \frac{m \cdot Z^2 \cdot \Delta W'_z}{\pi}, \quad (2)$$

де  $\Delta W'_z$  – приріст коенергії зубцевого шару на ділянці зубцевого поділку статора при повороті ротора на  $\pi/Z$

$$\Delta W'_z = \int_0^{U_a} g_a(U) U dU - \int_0^{U_a} g_u(U) U dU, \quad (3)$$

де  $g_a(U)$  – закон зміни магнітної провідності магнітного кола в узгодженому положенні,  $g_u(U)$  – закон зміни магнітної провідності магнітного кола в неузгодженому положенні ( $U$  – магнітна напруга зубцевого шару).

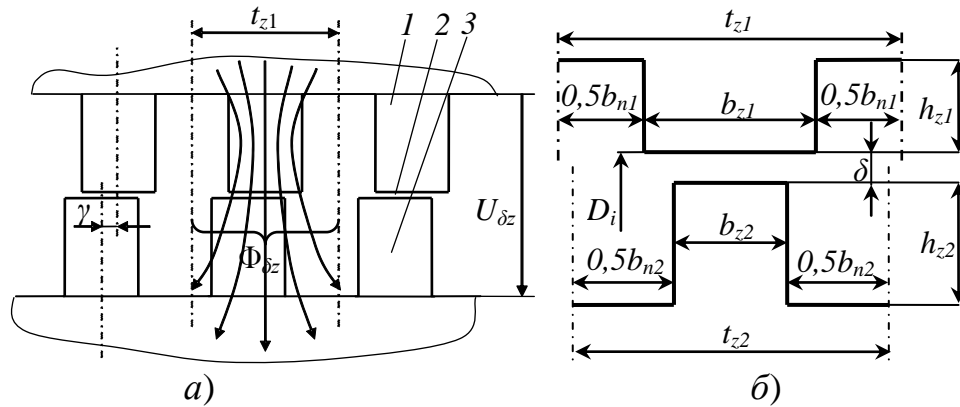


Рис. 2. Зубцевий шар двигуна:

*a* – загальний вигляд; *б* – геометричні розміри; 1 – зубець статора; 2 – повітряний проміжок; 3 – зубець ротора;  $\gamma$  – зсув ротора відносно статора;  $U_{\delta z}$  – магнітна напруга зубцевого шару;  $\Phi_{\delta z}$  – магнітний потік на ділянці зубцевого поділку;  $t_{z1}$  – зубцевий поділок статора;  $t_{z2}$  – зубцевий поділок ротора;  $b_{z1}$  – ширина зубця статора;  $b_{z2}$  – ширина зубця ротора;  $b_{n1}$  – ширина «паза» статора;  $b_{n2}$  – ширина «паза» ротора;  $h_{z1}$  – висота зубця статора;  $h_{z2}$  – висота зубця ротора;  $D_i$  – внутрішній діаметр статора;  $\delta$  – односторонній повітряний проміжок в узгодженому положенні.

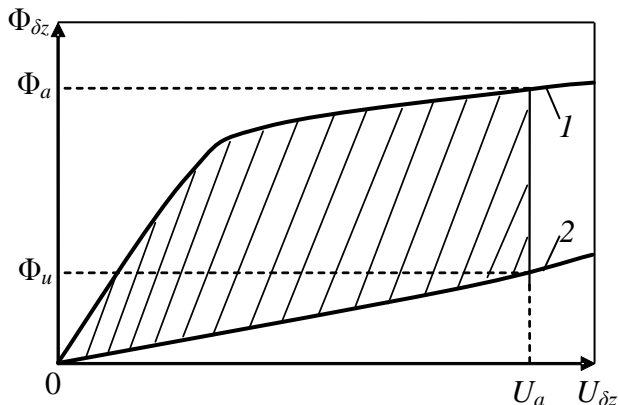


Рис.3. Енергетична діаграма зубцевого шару:

1 - ВАХ при узгодженому положенні; 2 - ВАХ при неузгодженому положенні;  $\Phi_a$  - магнітний потік зубця в узгодженому положенні зубців і насиченою магнітною системою;  $\Phi_u$  - магнітний потік зубця при неузгодженому положенні зубців;  $U_a$  - магнітна напруга зубцевого шару, яка відповідає номінальній МРС фазної котушки

Приріст коенергії  $\Delta W_z'$  може бути визначений з енергетичної діаграми (рис.3) як площа, яка обмежена вебер-амперними характеристиками (ВАХ) зубцевого шару в узгодженому (лінія 1) та неузгодженому положеннях (лінія 2) та прямою, паралельною осі ординат, що проходить через точну номінальної магнітної напруги (заштрихована область на рис.3). Таким чином, задача визначення середнього моменту двигуна зводиться до визначення закону зміни магнітної провідності зубцевого шару від магнітної напруги для узгодженого і неузгодженого положень. Магнітна провідність зубців статора і ротора

визначаються за їх геометричними розмірами і кривою намагнічування матеріалу, а магнітна провідність повітряного проміжку визначається за результатами розрахунку коефіцієнта провідності повітряного проміжку за методом Поля. Нижче наведено модель (4) для визначення електромагнітного моменту реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком в пускових режимах його роботи. Для оцінки достовірності результатів проведено перевірку шляхом порівняння результатів розрахунків за моделлю



(4) та у середовищі FEMM, де визначення моменту базується на розрахунку магнітного поля зубцевого шару методом скінчених елементів. Відносна похибка не перевищує 12 %.

$$\left\{ \begin{aligned}
 M_{\delta\delta} &= \frac{mZ^2}{\pi} \left( \int_0^{U_a} g_a U dU - \int_0^{U_a} g_u U dU \right); & g_a &= \frac{1}{\frac{1}{g_{z1}} + \frac{1}{g_{\delta a}} + \frac{1}{g_{z2}}}; \\
 g_{z1} &= \mu_{z1} \mu_0 \frac{b_{z1}}{h_{z1}} l_{z1}; & g_{z2} &= \mu_{z2} \mu_0 \frac{b_{z2}}{h_{z2}} l_{z2}; & g_{\delta a} &= \mu_0 \left( \frac{b_{\delta}}{\delta} \right)_a l_{\delta}; & g_u &= \mu_0 \left( \frac{b_{\delta}}{\delta} \right)_u l_{\delta}; \\
 \mu_{z1} &= \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{z1}}{H_{z1}}; & \mu_{z2} &= \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_{z2}}{H_{z2}}; & B_{z1} &= B_{\delta} \frac{b_{\delta} l_{\delta}}{b_{z1} l_{z1}}; & B_{z2} &= B_{\delta} \frac{b_{\delta} l_{\delta}}{b_{z2} l_{z2}}; \\
 H_{z1} &= f(B_{z1}); & H_{z2} &= f(B_{z2}); \\
 \left( \frac{b_{\delta}}{\delta} \right)_a &= \frac{1}{\beta} \ln \left( 1 + \frac{4\beta \cdot \Delta h_{z1}}{2\delta + \beta |b_{z1} - b_{z2}|} \right) + \frac{2}{\beta} \ln \left( 1 + \frac{\beta |b_{z1} - b_{z2}|}{2\delta} \right) + \frac{b_{\delta}}{\delta}; \\
 \left( \frac{b_{\delta}}{\delta} \right)_u &= \frac{2}{\beta} \ln \left( 1 + \frac{2\beta \Delta b_{z2}}{2\delta + \beta (b_{n2} - b_{z1})} \right) + \frac{2}{2\delta + \beta (b_{n2} - b_{z1})} + \frac{2}{\beta} \ln \left( 1 + \frac{\beta b_{z1}}{2\delta + \beta (b_{n2} - b_{z1})} \right); \\
 U_a &= H_{z1} h_{z1} + \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot \frac{b_{\delta}}{\left( \frac{b_{\delta}}{\delta} \right)_a} + H_{z2} h_{z2}; & l_{\delta} &= \min(l_{z1}, l_{z2}); & b_{z1} &< b_{n2}; \\
 |b_{z1} - b_{z2}| &\leq 4\delta; & |l_{z1} - l_{z2}| &\leq 2\delta; & \min(b_{z1}, b_{z2}) &> b_{zmin}; & h_{z1} &> \frac{b_{n1}}{2}; & h_{z2} &> \frac{b_{n2}}{2}; \\
 b_{z1} &= \alpha_1 \frac{\pi D_i}{Z}; & b_{z2} &= \alpha_2 \frac{\pi (D_i - 2\delta)}{Z}; & t_{z1} &= \frac{\pi \cdot D_i}{Z}; & t_{z2} &= \frac{\pi \cdot (D_i - 2\delta)}{Z}; \\
 b_{n2} &= t_{z2} - b_{z2}; & \Delta h_{z1} &= (0,15 \dots 0,2) t_{z1}; & \Delta b_{z1} &= 0,1 t_{z2}; & \beta &= \begin{cases} 1, & b_{n2}/\delta \leq 10; \\ (1,1 \dots 1,2), & b_{n2}/\delta \geq 10. \end{cases}
 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

У цій системі:  $l_{z1}$ ,  $l_{z2}$  – осьові довжини зубців статора та ротор відповідно;  $B_{\delta}$  – індукція в повітряному проміжку при узгодженому положенні зубців і номінальній магнітній напрузі зубцевого шару.

Оскільки система (4) містить одинадцять змінних, для пошуку оптимального набору параметрів доцільно застосовувати оптимізаційні процедури.

Для задачі оптимізації АІД у якості функції мети прийнято магніторушійну силу (МРС) фазної котушки, яка визначається залежністю

$$F = 2U_a + H_{f1} l_{f1} + H_{f2} l_{f2}, \quad (5)$$

де  $U_a$  – магнітна напруга зубцевого шару,  $H_{f1}$  і  $H_{f2}$  – напруженості магнітного поля в сердечнику статора і ротора відповідно,  $l_{f1}$  і  $l_{f2}$  – довжини сердечників статора і ротора відповідно. Таким чином, мінімізація МРС фазної котушки може бути сформульована як задача багатокритеріальної оптимізації.

Для визначення оптимальних геометричних та електрофізичних параметрів пристроїв найбільш прийнятний ієрархічний підхід при побудові критеріїв.

Найвищий пріоритет привласнено критерію, що поєднує в собі параметричні обмеження і характеризує ступінь порушення гіперпаралелепіеда  $D$  допустимої області зміни вектора варійованих параметрів

$$U_1(\vec{x}) = \sum_{i=1}^9 \max 0; a_i - x_i + \max 0; x_i - b_i, \quad (6)$$

де  $\vec{x} = (D_i, \delta, \alpha_1, \alpha_2, l_{z1}, l_{z2}, h_{z1}, h_{z2}, B_\delta)$  – вектор варійованих дійсних.

Критерії, обумовлені зв'язками між геометричними розмірами зубцевого шару, поперечного перерізу осердя статора  $S_{f1}$  і ротора  $S_{f2}$  та досягнення заданого електромагнітного моменту  $M_0$ :

$$U_2(\vec{x}) = b_{zmin} - \min\left(\frac{\alpha_1 \pi D_i}{Z}, \frac{\alpha_2 \pi (D_i - 2\delta)}{Z}\right); \quad U_3(\vec{x}) = D_i(\alpha_1 + \alpha_2 - 1) + 2\delta(1 - \alpha_2);$$

$$U_4(\vec{x}) = |D_i(\alpha_1 - \alpha_2) + 2\delta\alpha_2| - \frac{4\delta Z}{\pi}; \quad U_5(\vec{x}) = |l_{z1} - l_{z2}| - 2\delta; \quad (7)$$

$$U_6(\vec{x}) = \frac{\pi(D_i - 2\delta)(1 - \alpha_2)}{2Z} - h_{z2}; \quad U_7(\vec{x}) = \frac{\pi D_i(1 - \alpha_1)}{2Z} - h_{z1},$$

$$U_8(\vec{x}) = -S_{f1}; \quad U_9(\vec{x}) = -S_{f2}, \quad (8)$$

$$U_{10}(\vec{x}) = \max 0; M_0 - M(\vec{x}) + \max 0; M(\vec{x}) - 1,05 \cdot M_0, \quad (9)$$

Критерії для мінімізації індукцій  $B_{f1}$  і  $B_{f2}$  в осердях статора і ротора мають вигляд:

$$U_{11}(\vec{x}) = B_{f1}(\vec{x}) - B_{f10}; \quad U_{12}(\vec{x}) = B_{f2}(\vec{x}) - B_{f20}. \quad (10)$$

Тут  $B_{f10}$  і  $B_{f20}$  – найбільші допустимі індукції в осердях.

Останнім критерієм прийнято функцію мети – магнітну напругу зубцевого шару

$$U_{13}(\vec{x}) = U_a(\vec{x}). \quad (11)$$

Оскільки число фаз  $m$  і число зубців  $Z$  є цілими числами, то оптимізаційні розрахунки проводилися для кожного числа фаз і числа зубців з діапазону варіювання кожній з цих змінних.

Для розв'язання задач оптимізації функцій подібного типу застосовано генетичний алгоритм, для уточнення результатів роботи якого використовується метод Нелдера-Міда.

Таким чином, у другому розділі запропоновано алгоритм вибору головних розмірів і електромагнітних навантажень реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для безредукторного приводу.

**Третій розділ** присвячено моделюванню електромеханічних процесів у безредукторному тяговому приводі на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. Для створення імітаційної моделі застосовано середовище візуального програмування Simulink у поєднанні з пакетом Matlab. Розглянута в роботі система тягового приводу включає в себе

електричну частину - тяговий перетворювач і систему керування приводом, електромеханічний пристрій - тяговий двигун і механічну частину, утворену механізмами передачі обертаючого моменту від двигуна до контакту «колесо-рейка».

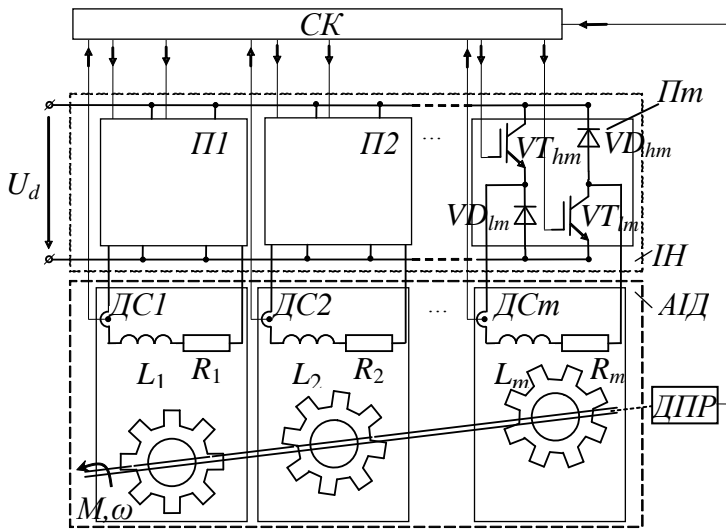


Рис. 4. Схема силових кіл

тягового двигуна та перетворювача:

- СК – система керування; ІН – інвертор напруги; АІД – реактивний індукторний двигун з аксіальним магнітним потоком;
- $U_d$  – напруга ланки постійного струму; П1, П2, ..., Пm – напівмостові перетворювачі;
- ДС1, ДС2, ..., ДСm – датчі струму; ДПР – датч положення ротору; VT<sub>hm</sub>, VT<sub>lm</sub> – транзистори фази m; VD<sub>hm</sub>, VD<sub>lm</sub> – діоди фази m; L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, ..., L<sub>m</sub> – індуктивності фаз АІД; R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, ..., R<sub>m</sub> – омичні опори фаз АІД;
- M – момент на валу двигуна;
- $\Omega$  – кутова частота обертання ротора.

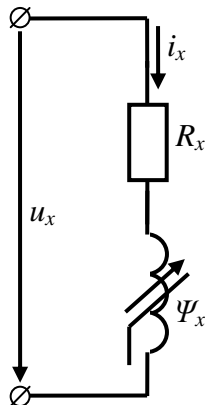


Рис. 5. Схема заміщення фази АІД:

- $u_x$  – напруга;  $i_x$  – струм;
- $R_x$  – омичний опір;  $\Psi_x$  – потокозчеплення.

Схема силових кіл привода показана на рис. 4. В основу математичної моделі АІД покладені рівняння електричних контурів, складені для кожної з фаз на основі схеми її заміщення (рис. 5). Математичний опис процесів має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{di_x}{dt} = \frac{u_x - i_x R - K_{ex} \Omega}{L_{dx}}; \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_{\text{дв}} - M_c); \\ \frac{d\gamma}{dt} = \Omega; \\ L_{dx} = L_{dx}(i_x, \gamma_x); \\ K_{ex} = K_{ex}(i_x, \gamma_x); \\ M_{\text{дв}} = \sum_{x=1}^m M_x(i_x, \gamma_x), \end{cases} \quad (12)$$

тобто складається з диференціальних рівнянь електричних контурів і механічної частини. і алгебраїчних рівнянь, що визначають електромагнітні зв'язки у двигуні – залежності  $L_{dx}(i_x, \gamma_x); K_{ex}(i_x, \gamma_x); M_x(i_x, \gamma_x)$ .

Визначення електромагнітних зв'язків описується наступною послідовністю. Припустимо, що залежність  $\Psi = \Psi(i, \gamma)$  відома (розрахована або отримана експериментально). За умови симетрії зубців статора і ротора відносно своїх осей, вирази для електромагнітних зв'язків мають вигляд:

$$\Psi(i, \gamma) = \sum_{k=0}^N \left( \left( \sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \right) \cos(k\gamma) \right),$$

$$L_{\partial} = \frac{\partial \Psi(i, \gamma)}{\partial i} = \sum_{k=0}^N \left( \left( \sum_{s=1}^3 a_{s,j-1}^{(k)} \cdot s \cdot (i - i_{j-1})^{s-1} \right) \cos(k\gamma) \right), \quad (13)$$

$$K_e = \frac{\partial \Psi(i, \gamma)}{\partial \gamma} = -Z \sum_{k=0}^N \left( k \left( \sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \sin(k\gamma) \right) \right),$$

де  $\sum_{s=0}^3 a_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s$  - кубічний сплайн, що інтерполює залежність коефіцієнтів Фур'є-розкладання від струму фази.

Електромагнітний момент визначається за аналогічним виразом

$$M(i, \gamma) = -Z \sum_{k=0}^N \left( k \left( \sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s \sin(k\gamma) \right) \right), \quad (14)$$

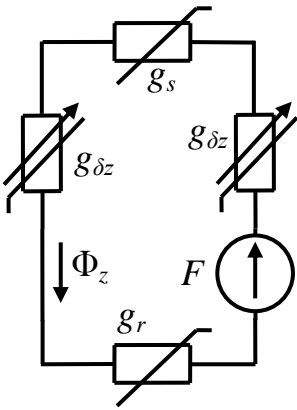


Рис. 6. Схема заміщення магнітного кола на ділянці зубцевого поділку:  $F$  – МРС фазної котушки;  $\Phi_z$  – магнітний потік на ділянці зубцевого поділку;  $g_{\delta z}$  – нелінійно-параметрична магнітна провідність зубцевого шару;  $g_s$  – нелінійна магнітна провідність

де  $\sum_{s=0}^3 b_{s,j-1}^{(k)} (i - i_{j-1})^s$  – кубічний сплайн, що інтерполює залежність коефіцієнтів Фур'є-розкладання від струму фази. Основою для розрахунків залежності  $M(i, \gamma)$  служить залежність потокозчеплення  $\Psi = \Psi(i, \gamma)$ . Визначення цієї залежності виконується на основі схеми заміщення магнітного кола (рис.6) з використанням «схемно-польового» підходу, при якому розподіл магнітного поля в повітряних проміжках між статором і ротором визначають основи розрахунку магнітного поля у двовимірній постановці. Для цього проводиться серія розрахунків магнітного поля для кількох проміжних положень ротора і різних магнітній напрузі зубцевого шару. Далі залежність магнітної провідності зубцевого шару у функції магнітної напруги між сердечниками статора і ротора і кута повороту ротора апроксимується функцією виду

$$g_{\delta z}(U_{\delta z}, \gamma) = \sum_{k=0}^N C_k(U_{\delta z}) \cdot \cos(k\gamma), \quad (15)$$

де  $\sum_{s=0}^3 c_{s,j-1}^{(k)} (U_{\delta z_j} - U_{\delta z_{j-1}})^s$  – кубічний сплайн, що інтерполює залежність коефіцієнтів Фур'є-розкладання від магнітної напруги. Решта провідностей визначається за геометричними розмірами елементів та кривою намагнічування матеріалу. Після визначення вебер-амперних характеристик елементів проводиться визначення магнітного потоку зубцевого контуру, для цього

складаються рівняння для магнітного кола зубцевого контуру і проводиться їх чисельне рішення. Серія рішень рівнянь магнітної ланцюга при різних кутах повороту ротора і різних струмах фазною котушки дає залежність  $\Phi_z(\gamma, i)$  – залежність потоку зубцевого контуру від кута повороту ротора і фазного струму. Потокозчеплення фази визначається за виразом

$$\Psi(\gamma, i) = w Z \Phi_z(\gamma, i), \quad (16)$$

де  $w$  - число витків фазною котушки.

Створення імітаційних моделей інвертора напруги та системи керування виконано з використанням елементів бібліотек Simulink та SimPowerSystems безпосередньо по електричній та функціональній схемах. В основу імітаційної моделі АІД покладено модель (12), на основі якої побудована структурна схема фази. На рис. 7 та 8 наведено узагальнену імітаційну модель приводу, імітаційну модель фази АІД та системи керування приводом. Для спрощення розрахунків модель механічної частини була виключена із загальної імітаційної моделі, а частота обертання ротора приймалася постійною.

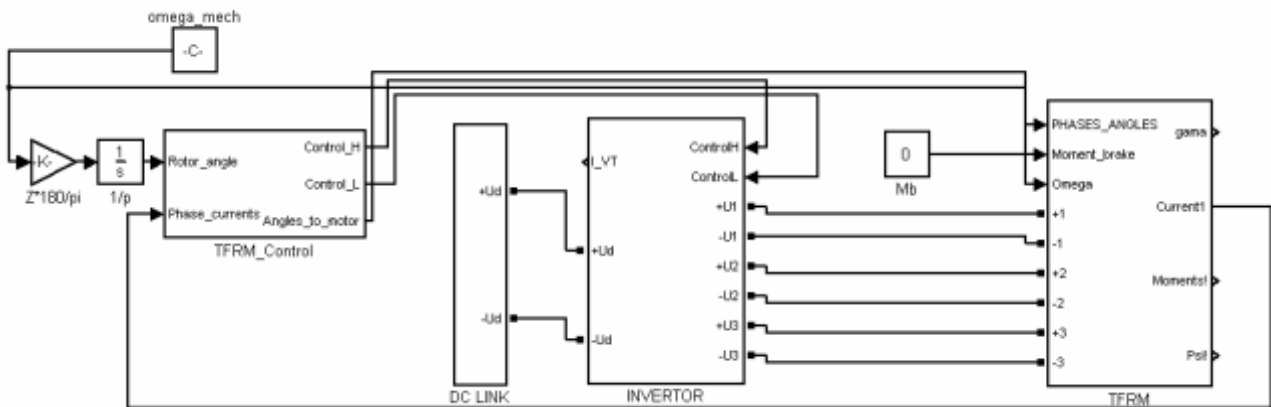


Рис. 7. Узагальнена імітаційна модель приводу

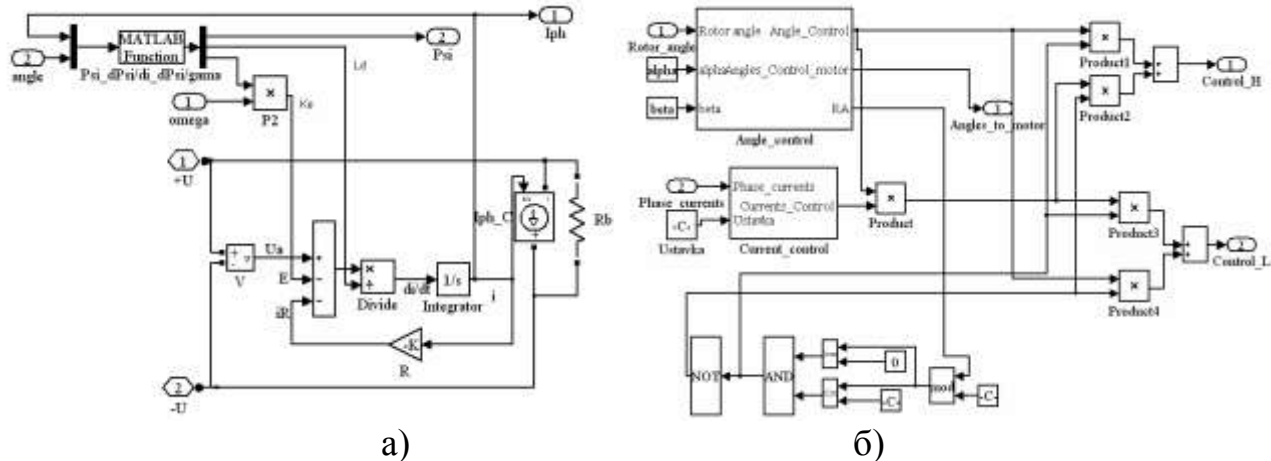


Рис. 8 Імітаційна модель фази АІД (а) та системи керування (б)

На рис. 9 наведені осцилограми струмів і напруг на обмотці двигуна та електромагнітний момент при частоті обертання ротора 10 рад/с. На рис. 10 – ті ж величини при частоті обертання ротора 100 рад/с.

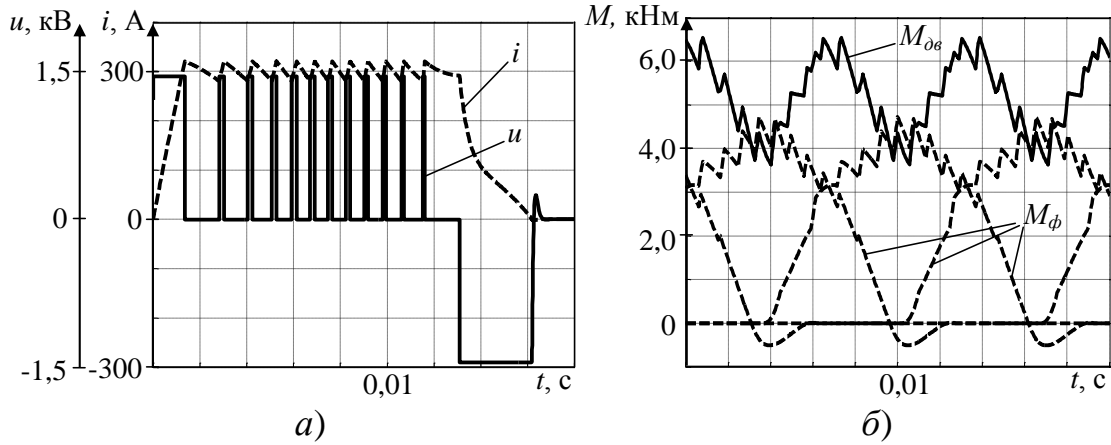


Рис. 9. Осцилограми струмів і напруг (а) та електромагнітний момент (б) при частоті обертання ротора 10 рад/с

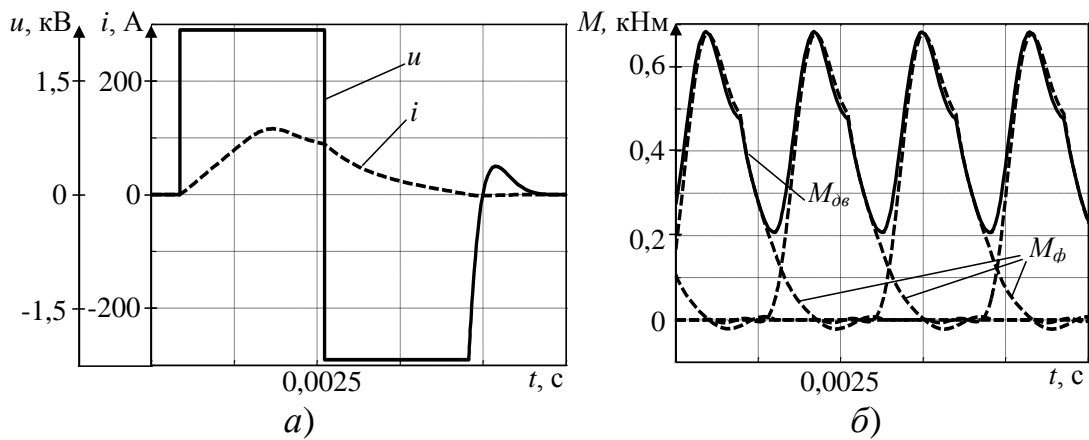


Рис. 10. Осцилограми струмів і напруг (а) та електромагнітний момент (б) при частоті обертання ротора 100 рад/с

Встановлено, що в режимі  $\omega=10$  рад/с при МРС фазної котушки 9000 А, чому відповідає магнітна напруга зубцевого шару 4500 А, середній момент двигуна складає близько 5000 Нм. Це корелює з даними, отриманими у другому розділі, і говорить про адекватність моделей (4) і запропонованих у даному розділі.

Визначено, що в зазначених режимах роботи крива моменту носить пульсуючий характер: поряд з постійною складовою моменту присутня змінна, частота якої залежить від частоти обертання ротора, а амплітуда визначається параметрами живлення фазних обмоток. Наявність змінної складової погіршує використання зчипної ваги при русанні і може сприяти появі резонансних явищ та втомного руйнування елементів тягової передачі. У зв'язку з цим доцільно провести оцінку навантажень в елементах механічної частини тягового електроприводу, обумовлених пульсацією моменту. Вплив кінематичного збурення зі сторони рейкового шляху при цьому не враховується. У цьому випадку розрахункова схема матиме вигляд, показаний на рис. 11.

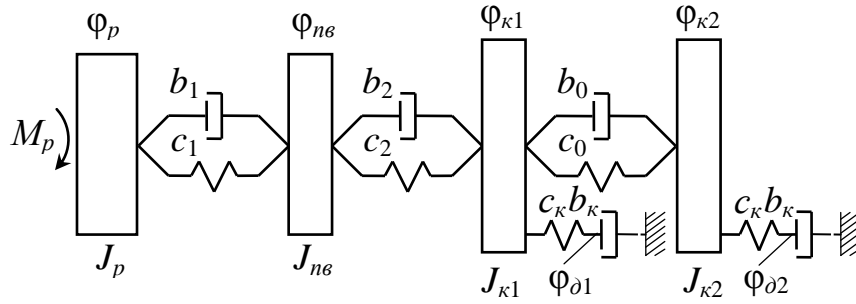


Рис. 11. Розрахункова схема механічної частини:

$\varphi_p$  – кут повороту ротора;  $\varphi_{nv}$  – кут повороту полого валу;  $\varphi_{k1}$  – кут повороту колеса зі сторони приводу;  $\varphi_{k2}$  – кут повороту колеса зі сторони, протилежній приводу;  $M_p$  – момент на валу двигуна;  $J_p$  – момент інерції ротора;  $J_{nv}$  – момент інерції полого валу;  $J_{k1}$  – момент інерції колеса зі сторони приводу;  $J_{k2}$  – момент інерції колеса зі сторони, протилежній приводу;  $c_1, b_1$  – торсіона жорсткість та коефіцієнт демпфування муфти, встановленої між ротором двигуна і пустотілим валом;  $c_2, b_2$  – торсіона жорсткість та коефіцієнт демпфування муфти, встановленої між пустотілим валом та колесом;  $c_0, b_0$  – торсіона жорсткість та коефіцієнт демпфування осі колісної пари;  $c_k, b_k$  – жорсткість та коефіцієнт демпфування кутового зв'язку колеса з рейкою.

Математична модель механічної частини побудована на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду і має вигляд:

$$\begin{cases} J_p \ddot{\varphi}_p + b_1 \dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{nv} + c_1 \varphi_p - \varphi_{nv} = M_p; \\ J_{nv} \ddot{\varphi}_{nv} - b_1 \dot{\varphi}_p - \dot{\varphi}_{nv} + b_2 \dot{\varphi}_{nv} - \dot{\varphi}_{k1} - c_1 \varphi_p - \varphi_{nv} + c_2 \varphi_{nv} - \varphi_{k1} = 0; \\ J_{k1} \ddot{\varphi}_{k1} - b_2 \dot{\varphi}_{nv} - \dot{\varphi}_{k1} + b_0 \dot{\varphi}_{k1} - \dot{\varphi}_{k2} + b_k \dot{\varphi}_{k1} - \dot{\varphi}_{d1} - \\ - c_2 \varphi_{nv} - \varphi_{k1} + c_0 \varphi_{k1} - \varphi_{k2} + c_k \varphi_{k1} - \varphi_{d1} = 0; \\ J_{k2} \ddot{\varphi}_{k2} - b_0 \dot{\varphi}_{k1} - \dot{\varphi}_{k2} + b_k \dot{\varphi}_{k2} - \dot{\varphi}_{d2} - c_0 \varphi_{k1} - \varphi_{k2} + c_k \varphi_{k2} - \varphi_{d2} = 0; \\ - b_k \dot{\varphi}_{k1} - \dot{\varphi}_{d1} - c_k \varphi_{k1} - \varphi_{d1} = 0; \\ - b_k \dot{\varphi}_{k2} - \dot{\varphi}_{d2} - c_k \varphi_{k2} - \varphi_{d2} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

У якості збудження системи задається момент двигуна за виразом

$$M_p = M_{max} \sin 2\pi f t, \quad (18)$$

де  $M_{max}$  – амплітуда моменту,  $f$  – частота.

В якості вихідних характеристик прийняті відносні значення динамічних моментів у пружних елементах і осі колісної пари та моментів зчеплення з рейками кожного з коліс, розраховані за виразами:

$$\begin{aligned} K_{c1} &= c_1 \varphi_p - \varphi_{nv} / M_{max}; \quad K_{c2} = c_2 \varphi_{nv} - \varphi_{k1} / M_{max}; \\ K_{c0} &= c_0 (\varphi_{k1} - \varphi_{k2}) / M_{max}; \quad K_{M1} = b_k \cdot \dot{\varphi}_{k1} / M_{max}; \\ K_{M2} &= b_k \cdot \dot{\varphi}_{k2} / M_{max}. \end{aligned} \quad (19)$$

На рис. 12 наведено амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) динамічних моментів у муфтах. Аналіз залежностей показує, що в діапазоні частот 1...40 Гц є резонансна область з максимумом на частоті  $\approx 17$  Гц. Наявність тільки одного резонансного максимуму пояснюється малим (у порівнянні з іншими тілами) моментом інерції полого валу приводу. При

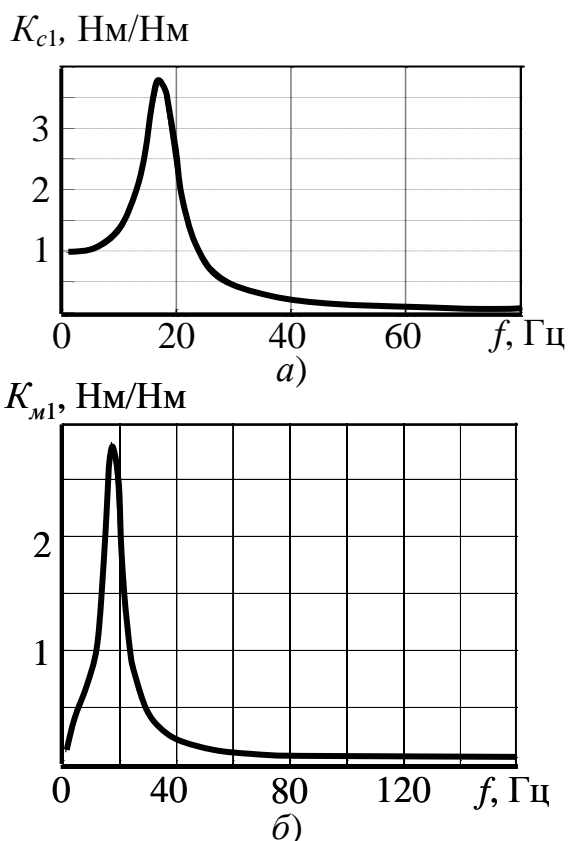


Рис. 12 АЧХ динамічного моменту у муфті (а) та моменту зчеплення (б)

Таким чином, розроблено імітаційну модель тягового електроприводу, що поєднує в собі: модель інвертора напруги, створену з використанням бібліотеки SimPowerSystems пакету Matlab; модель системи управління, створену в Simulink; модель реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком, створену з використанням бібліотек Simulink і SimPowerSystems на основі математичної моделі та методу структурного моделювання. Імітаційна модель та її елементи можуть бути використані для визначення робочих властивостей розглянутого приводу. Розроблені моделі тягового електроприводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком у поєднанні з математичною моделлю для визначення електромагнітного моменту реактивного індукторного двигуна з аксіальним потоком в пускових режимах його роботи являють собою цілісний програмно-алгоритмічний комплекс для синтезу тягового електроприводу зазначеного типу.

У четвертому розділі проведено концептуальне проектування швидкісного електропоїзду, обладнаного безредукторним тяговим приводом на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. Запропоновано і обґрунтовано доцільність визначення потужності тягового приводу виходячи із забезпечення остаточного прискорення при конструкційній швидкості. Реалізація пускового прискорення, обумовленого

частотах вищих за 40 Гц, модуль АЧХ наближається до нуля. Тобто, в основних режимах роботи тягового приводу (рух з високими швидкостями) пульсації моменту двигуна не викликають підвищених навантажень в елементах механічної частини. Зниження динамічних навантажень при роботі з частотами, що лежать в резонансній області, може бути досягнуто шляхом вдосконалення конструкції механічної частини і зниженням пульсацій моменту двигуна.

Для оцінки енергетичної ефективності приводу розроблена модель втрат потужності в інверторі напруги та АІД. Прийнято, що втрати потужності в інверторі складаються з статичних та динамічних втрат у транзисторах та діодах. Розрахунок втрат відбувається шляхом обробки результатів моделювання.



технічним завданням на електропоїзд, досягається шляхом тимчасового перевантаження електрообладнання.

Для концептуального проекту швидкісного електропоїзду з розподіленою тягою, усіма обмотореними осями, навантаженням на вісь 17 т і конструкційною швидкістю 160 км/год необхідний двигун потужністю 90 кВт і частотою обертання 935 об/хв. У діапазоні частот 0...350 об/хв двигун повинен розвивати момент 4020 Нм.

З використанням математичної моделі для визначення електромагнітного моменту, розробленої в розділі 2, визначені основні параметри реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. До розгляду було прийнято три варіанти двигуна. Після цього із використанням імітаційної моделі тягового приводу було проведено розрахунок кількості витків фазної котушки. Визначення кількості витків проводилось для режиму максимальної частоти обертання шляхом варіювання параметрів живлення (тривалості імпульсів і кута його подачі). При цьому ставилася задача досягнення заданого моменту двигуна (був прийнятий рівним 925 Нм) при якомога більшій кількості витків. Також встановлено, що в доцільно встановлювати тривалість імпульсу живлячої напруги в 180 ел.град., а величину електромагнітного моменту регулювати кутом випередження. Остаточний варіант обирався з позицій максимального ККД приводу в робочому режимі. Тягові характеристики приводу наведено в табл.

Таблиця

Тягові характеристики приводу

Параметр	Частота обертання, об/хв		
	10	350	935
Кут випередження вмикання, ел.град.	0	0	80
Тривалість імпульсу, ел.град	180	180	180
Електромагнітний момент, Нм	4020	3872	927,1
Коефіцієнт пульсацій моменту, д.о.	0,81	0,68	0,61
Амплітудне значення фазного струму, А	423	250,6	115,8
Діюче значення фазного струму, А	406,2	236,8	63,7
Потужність на валу, кВт	4,2	141,9	92,7
ККД, д.о.:			
– інвертора	0,249	0,967	0,971
– двигуна	0,212	0,917	0,948
– електроприводу	0,05	0,887	0,921

Таким чином, синтезований безредукторний тяговий електропривод на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для швидкісного електрорухомого складу. Номінальний ККД дорівнює 0,921 д.о., пусковий момент двигуна складає 4020 Нм.

У додатках наведено розрахункові вирази для визначення коефіцієнту магнітної провідності повітряного проміжку (використовуються в моделі (4),

вирази для розрахунку площі поперечного перетину осердь статора і ротора (використовуються в критеріях при оптимізації АІД), а також акти впровадження результатів дисертаційної роботи на ВАТ «ХК «Луганськтепловоз», ДП завод «Електроважмаш» та у навчальному процесі на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХП».

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення енергоефективності швидкісного рухомого складу за рахунок впровадження концепції безредукторного тягового приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком.

1. В результаті виконання дисертаційної роботи розроблено програмно-алгоритмічний комплекс для знаходження геометричних розмірів і електромагнітних параметрів реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком і схеми його живлення як рішення задачі синтезу безредукторного тягового електроприводу для швидкісного електрорухомого складу.

2. Розроблено математичну модель для визначення електромагнітного моменту двигуна з аксіальним потоком, яка встановлює зв'язок між з геометричними розмірами і електромагнітними параметрами зубцевого шару в пускових режимах роботи двигуна. Особливістю моделі є обчислення моменту шляхом безпосереднього інтегрування закону зміни магнітної провідності зубцевого шару.

3. Встановлено, що вибір раціональних параметрів двигуна призводить в необхідності вирішення задачі оптимізації, яка формулюється як багатокритеріальна задача оптимізації при ієрархічному підході побудови критеріїв. Обґрунтовано застосування генетичного алгоритму на основі методу рулетки. Визначено, що генетичний алгоритм у задачі оптимізації реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком працює лише як визначник «пошукових областей». Для уточнення результатів роботи використовується метод Нелдера-Міда. Застосування такого підходу призводить до уточнення значення функції мети на 5-7%.

4. При вирішенні завдання дослідження та оцінки електромеханічних процесів перетворення енергії в системі «перетворювач-тяговий двигун-механічна передача» в пакеті Matlab встановлено, що в якості імітаційних моделей можна використовувати як стандартні модулі програми (для перетворювача і системи управління), так і є необхідність розробити нові моделі: реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком, втрат, ККД, механічної частини.

5. Для дослідження роботи реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком розроблена математична модель. Особливістю моделі є те, що електромагнітні зв'язку запропоновано апроксимувати усіченим рядом

Фур'є, коефіцієнти гармонік якого інтерпольовані кубічними сплайнами. На підставі цього розкладання аналітично виражені індуктивність фази, коефіцієнт противоЕРС і електромагнітний момент, для якого також проведена апроксимація за згаданим вище способом.

6. Встановлено, що при високих швидкостях руху, близькими до експлуатаційної (140...160 км/год), динамічні моменти в пружних елементах приводу практично рівні нулю. У пускових режимах навантаження, викликані пульсаціями моменту, істотні, що викликає застосування заходів для зниження пульсацій моменту.

7. Запропоновано методику розрахунку втрат у інверторі напруги та тяговому двигуні. Результати розрахунком дозволяють визначити ККД приводу, оцінити тепловий стан тягового двигуна та перетворювача і сформулювати вимоги до систем їх охолодження.

8. Створено цілісний програмно-алгоритмічний комплекс для синтезу тягового електроприводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком, який включає в себе розроблені імітаційні та математичні моделі тягового електроприводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком у поєднанні з математичною моделлю для визначення електромагнітного моменту реактивного індукторного двигуна з аксіальним потоком в пускових режимах його роботи. Розроблений програмно-алгоритмічний комплекс і окремі його складові можуть бути застосовані для створення приводів на основі індукторних двигунів інших типів.

9. Розроблений програмно-алгоритмічний комплекс апробовано при концептуальному проектуванні швидкісного електропоїзда, у якому задача визначення раціональних параметрів тягового приводу вирішена як задача синтезу, за результатами якого встановлено, що необхідна потужність тягового двигуна становить 93 кВт, пусковий момент дорівнює 4020 Нм, номінальний ККД приводу – 92,1%.

10. Результати дисертаційної роботи впроваджено у практику проектування електроприводів рухомого складу на ХК ВАТ «Луганськтепловоз» та ДП завод «Електроважмаш», а також навчальному процесі кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХП».

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рябов Е.С. Тяговый привод для высокоскоростного подвижного состава / Б.Г. Любарський, Д.Ю. Зюзин, Е.С. Рябов, Т.В. Глебова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2006. – №42. – С. 72–77.

Здобувачем проведено аналіз тягових електроприводів сучасного рухомого складу.

2. Рябов Е.С. Электродвигатели для перспективного электроподвижного состава / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Рябов Е. С, А. В Демидов, Т. В. Глебова // Локомотив-інформ. – 2008. – №1. – С. 16–19.

Здобувачем проаналізовано властивості реактивних індукторних двигунів і двигунів з поперечним полем.

3. Рябов Е.С. Анализ и сравнение перспективных тяговых электродвигателей / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, А.В. Демидов, Т.В. Глебова // *Залізничний транспорт України*. – 2008. – №2/1. – С. 26–31.

Здобувачем запропонована концепція якісного аналізу перспективних двигунів.

4. Рябов Е.С. Безредукторный тяговый привод: перспективы применения на отечественном подвижном составе / Б.Г. Любарский, Б.Х. Ерицян, Е.С. Рябов, Л.В. Овер'янова // *Залізничний транспорт України*. – 2009. – №2/1. – С. 21–23.

Здобувачем проаналізовано конструкції безредукторного колісно-моторного блоку.

5. Рябов Е.С. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, В.Л. Емельянов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №5. – С. 67–72.

Здобувачем запропонований метод визначення електромагнітних зв'язків реактивного індукторного двигуна.

6. Рябов Е.С. К вопросу определения электромагнитного момента реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком. / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.Ю. Зюзин, В.Л. Емельянов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – №5. – С. 28–30.

Здобувач запропонував визначати момент двигуна шляхом безпосереднього інтегрування закону зміни магнітної провідності.

7. Рябов Е.С. Реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – 2010. – № 38. – С. 80–83.

8. Рябов Е.С. Математическая модель для определения электромагнитного момента реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – 2010. – № 39. – С. 108–116.

9. Рябов Е.С. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л., Емельянов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – №6. – С. 28–30.

Здобувачем побудована ієрархія критеріїв для оптимізації реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком.

10. Рябов Е.С. Моделирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Д.Ю. Зюзин // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – 2010. – № 57. – С. 243–251.

Здобувачем розроблено імітаційну модель безредукторного тягового приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком.

11. Рябов Е.С. К вопросу расчёта мощности тягового привода скоростного электропоезда / В.И. Омеляненко, Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов // Механіка та машинобудування. – 2010. – №1. – С. 125–128.

Здобувач запропонував метод визначення потужності тягового приводу для швидкісного рухомого складу.

## АНОТАЦІЇ

**Рябов Є.С. Безредукторний тяговий привод на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для швидкісного електрорухомого складу. Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2011 р.

Дисертацію присвячено розробці наукових проектування безредукторного тягового приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком для швидкісного електрорухомого складу.

Запропоновано створення безредукторного тягового приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком.

Розроблено математичну модель для визначення електромагнітного моменту реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком.

Розроблено узагальнену імітаційну модель тягового приводу, що досліджується, яка поєднує модель напівпровідникового перетворювача у сукупності з системою керування приводом та модель реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком. Розроблено модель крутильних коливань в механічній частині приводу. Запропонована методика оцінки енергетичних показників досліджуваного тягового приводу. У сукупності запропоновані моделі покладені в основу програмно-алгоритмічного комплексу проектування тягового безредукторного приводу на основі реактивного індукторного двигуна з аксіальним магнітним потоком.

Розроблений концептуальний проект швидкісного електропоїзду, тяговий привод якого синтезований за допомогою вищезазначеного програмно-алгоритмічного комплексу та визначені його робочі властивості та показники.

*Ключові слова:* безредукторний тяговий привод, реактивний індукторний двигун з аксіальним магнітним потоком, оптимізація, імітаційне моделювання, швидкісний електрорухомий склад.

**Рябов Е.С. Безредукторный тяговый привод на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электроподвижного состава. Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, 2011 г.

Диссертация посвящена разработке научных проектирования безредукторного тягового привода на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электроподвижного состава в плане установления связи между его параметрами и рабочими свойствами.

Путем анализа силовых и энергетических показателей тяговых электрических двигателей, применяемых в безредукторном тяговом приводе, и сравнением конструктивных исполнений механизмов передачи вращающего момента предложен безредукторный тяговый привод на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Разработана математическая модель, устанавливающая связь электромагнитного момента двигателя с аксиальным потоком с геометрическими размерами и электромагнитными параметрами зубцового слоя в пусковых режимах его работы. Особенностью её является вычисление момента путём непосредственного интегрирования закона изменения магнитной проводимости зубцового слоя.

Установлено, что выбор рациональных параметров двигателя приводит к необходимости решения задачи оптимизации, которая формулируется как многокритериальная задача оптимизации при иерархическом подходе построения критериев.

Выявлено, что целевая функция многоэкстремальна, в связи с чем применены методы глобальной оптимизации. Выбран генетический алгоритм на основе метода рулетки. Определено, что генетический алгоритм в задаче оптимизации реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком работает лишь как определитель «поисковых областей». Для уточнения результатов работы используется метод Нелдера-Мида.

Разработана обобщенная имитационная модель исследуемого тягового привода, сочетающая модель полупроводникового преобразователя в совокупности с системой управления приводом и модель реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком, в основу которой положена математическая модель. Особенностью модели является то, что электромагнитные связи предложено аппроксимировать усечённым рядом Фурье, коэффициенты гармоник которого интерполированы кубическими сплайнами. На основании этого разложения аналитически выражены индуктивность фазы, коэффициент противоЭДС и электромагнитный момент, для которого также проведена аппроксимация по упомянутому выше способу.

Предложен алгоритм определения электромагнитных связей реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Разработана модель крутильных колебаний в механической части привода для исследования процессов, обусловленных пульсациями электромагнитного

момента. Предложена методика оценки энергетических показателей исследуемого тягового привода. В совокупности предложенные модели и положены в основу программно-алгоритмического комплекса проектирования тягового безредукторного привода на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком.

Разработан концептуальный проект скоростного электропоезда, тяговый привод которого синтезирован с помощью вышеупомянутого программно-алгоритмического комплекса и определены его рабочие свойства и показатели. *Ключевые слова:* безредукторный тяговый привод, реактивный индукторный двигатель с аксиальным магнитным потоком, оптимизация, имитационное моделирование, скоростной электроподвижной состав.

**E. Ryabov. Direct traction drive based on transverse switched reluctance motor for speed electrical rolling stock. Manuscript.**

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.22.09 – Electrical Transport. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2011.

The thesis is dedicated to the working out of scientific bases of creation gearless traction drive based on transverse switched reluctance motor for speed electrical rolling stock in terms of linking its properties and working parameters.

By analyzing of the force and power parameters of traction electric motors, used in the gearless traction drive, and comparing the performances of structural mechanisms to transfer torque suggested the creation of gearless traction drive based on the jet engine based on the inductor axial magnetic flux.

The mathematical model for the electromagnetic torque inductor jet engine axial magnetic flux is worked out.

The generalized traction drive simulation model that is studied, combines semiconductor transducer model, is coupled with the drive system and inductor model of transverse switched reluctance motor, which is based on mathematical model. The model of torsion oscillations of the mechanical drive is worked out. Method for energy parameters investigated traction drive is proposed. Together, the proposed model algorithmic complex design of the direct drive traction based on transverse switched reluctance motor.

The conceptual design of high-speed electric trains is worked out. Traction drive is synthesized using the above algorithmic complex and determined its performance and indicators.

Keywords: Gearless traction drive, transverse switched reluctance motor, optimization, simulation, high speed electromotive composition.



Відповідальний за випуск  
к.т.н., доц. кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ “ХПІ”  
Якунін Д.І.

Підписано до друку 14.03.2011 р. Формат 60x84/16.  
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення №416

---

Надруковано у СПДФО Миронов М.В.

Свідоцтво №2950452 Є 044558 від 01.01.2011 р.  
61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3

---