

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Родін Микола Юрійович



УДК 621.314.261

**КЕРУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ
ЧАСТОТИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
ПРИ ПЕРЕМИКАННІ ДВИГУНА НА МЕРЕЖУ ТА НАВПАКИ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гончаров Юрій Петрович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри промислової і біомедичної
електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
Кременчуцький державний університет
імені Михайла Остроградського,
завідувач кафедри систем електроспоживання та
енергетичного менеджменту

кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія залізничного транспорту,
доцент кафедри систем електричної тяги

Захист відбудеться “___” _____ 2010 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України (61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, електрокорпус, ауд. 301)

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “___” вересня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. В. Осичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електропривід великої кількості механізмів може бути виконаний на основі перетворювального агрегату (ПА), що має у своєму складі напівпровідниковий перетворювач частоти (ПЧ), та асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором. Частотне керування, принцип якого полягає у регулюванні за допомогою ПЧ частоти та амплітуди вхідного сигналу АД у залежності від параметрів сигналів навантаження АД, дозволяє зберігати електроенергію та економно використовувати моторесурс обладнання.

В комунальних мережах та на нафтоперекачувальних станціях використовується електропривід з кількома АД однакової потужності, що працюють на спільне навантаження. Типовим рішенням є установка одного ПА на кожний АД. Усталений режим роботи такої системи достатньо досліджений у роботах відомих вчених Блашке Ф., Лабунцова В. О., Епштейна І. І., Волкова І. В., Шипілло В. П., Жемерова Г. Г., Барського В. О., Перельмутера В. М., Синчука О. М. та інших. Однак можливе і альтернативне рішення – установка одного ПА, потужність якого дорівнює потужності АД, та додаткової комутаційної апаратури, яка підключає двигуни до ПА або до мережі. Перевагами такої структури є менша ціна та більш високий коефіцієнт корисної дії.

Провідні закордонні виробники (Siemens, ABB, Allien Bradlye та ін.) в своїх електроприводах мають таку опцію, як "synchronous transfer" (для якої в дисертаційній роботі використовувався термін "перемикання"), але аналіз процесів при перемиканні та методики такого аналізу досліджені недостатньо. У зв'язку з цим актуальними є розробка та дослідження принципів керування ПЧ асинхронного електропривода при перемиканні АД на мережу та навпаки, що визначило напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ "ХПІ" відповідно до планів держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України за напрямком «Енергетика, енергозбереження» за темою «Дослідження та теоретичні основи створення перетворювачів з синусоїдальною вихідною напругою, що мають електромагнітну сумісність з мережею живлення» (№ДР 0108U001456), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення властивостей та характеристик напівпровідникового перетворювача з перемиканням асинхронного двигуна на мережу та навпаки, розробка на цій основі структур та способів керування системою "перетворювач – двигун".

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

– визначення набору параметрів синхронізації та потрібних їх значень на етапі перемикання АД з ПА на мережу та навпаки при мінімізації перехідних значень струму статора та електромагнітного моменту;

- визначення видів перешкод в системі керування ПА та розробка засобів усунення їх впливу на електромагнітні процеси при перемиканні АД;
- розробка математичних моделей електромеханічних процесів у силовій частині системи “ПЧ-АД” з перемиканням на мережу;
- синтез структури системи керування ПЧ та контакторами.

Об'єктом дослідження є керування ПЧ асинхронного електроприводу з перемиканням АД на мережу та навпаки.

Предметом дослідження є системи керування ПЧ при перемиканні АД на мережу та навпаки.

Методи дослідження. Основні теоретичні аспекти роботи базуються на положеннях теорії напівпровідникових перетворювачів, теорії електроприводу, теорії електричних двигунів. Процеси при перемиканні проаналізовано за допомогою метода результуючих векторів. Аналітичний аналіз впливу параметрів синхронізації на якість перемикання АД здійснено за допомогою методів декомпозиції по фазі та частоті та при використанні операторного метода розрахунку перехідних процесів. Синтез регуляторів системи керування ПЧ виконано за допомогою метода еквівалентних опорів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше встановлено наступне:

- визначено набір параметрів синхронізації ПЧ з АД та доцільний діапазон їхніх значень, що дозволило зменшити перехідні значення струму статора та електромагнітного моменту АД, а також скоротити вплив розкиду моментів спрацьовування комутаційної апаратури;
- визначено види перешкод в системі керування, що дало змогу запропонувати шляхи щодо усунення їх впливу;
- запропоновано використання потоку мережі у якості одного з двох опорних сигналів системи керування ПЧ, що дозволило підвищити завадостійкість, надати системі керування ПЧ певну симетрію й застосувати для каналів керування випрямлячем та інвертором однотипний алгоритм;
- розроблено числові та аналітичні моделі АД і силової частини системи “ПЧ-АД” у координатному базисі “струм-потік”, що дозволило спростити синтез системи перемикання, аналіз перехідних значень струму статора та електромагнітного моменту при перемиканні;
- запропоновано структуру системи перемикання та методику синтезу її вузлів, що дозволило виконати синтез регуляторів системи керування та здобути доцільні значення параметрів синхронізації.

Практичне значення одержаних результатів для електротехнічної галузі полягає у визначенні властивостей та характеристик напівпровідникового перетворювача з перемиканням асинхронного двигуна на мережу та навпаки, а також у розробці структур та способів керування системою “перетворювач – двигун”. Розроблена структура системи керування може бути реалізована за допомогою типових мікроконтролерів. Запропоновані методики з використанням координатного базису “струм-потік” можуть бути використані

при вирішенні аналогічних задач при синтезі систем регулювання частотнокерованих електроприводів. Наведена методика синтезу регуляторів системи керування ПЧ дозволяє спростити наладку ПЧ.

Результати роботи знайшли практичне застосування при проектуванні ПЧ для електроприводів на ДП “НДІ “ХЕМЗ” (м. Харків). Теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи використано у навчальному процесі кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ “ХПІ” при викладанні дисципліни “Автономні перетворювачі”.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення й результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Серед них: модель системи “автономний інвертор струму – асинхронний двигун” в координатному базисі “струм – потік” з приведенням параметрів еквівалентної схеми АД до ланки постійного струму ПЧ, аналітичні моделі АД при живленні від джерела потоку в координатному базисі “струм – потік” з приведенням механічних параметрів еквівалентної схеми АД до електричних схем заміщення, числові моделі АД при живленні від джерела потоку в координатному базисі “струм – потік”, визначення набору параметрів, необхідних для синхронізації, аналіз їх впливу на процеси при підключенні АД на мережу, використання методу стеження за результуючим вектором струму ротора при постійній частоті широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для керування ПЧ із ланкою постійного струму на базі інвертора напруги, алгоритм перемикавання АД з мережі на ПА з урахуванням силової частини, аналіз процесів при синхронізації у ПЧ, структура системи перемикавання АД з ПА на мережу, синтез її регуляторів, алгоритм перемикавання АД з ПА на мережу, методика мінімізування наслідків розкиду часів спрацьовування комутаційної апаратури, датчик потоку на основі модифікованого інтегратора зі зворотним зв'язком для виконання операції інтегрування електрорушійної сили (ЕРС), класифікація перешкод, що діють у системі керування ПА, шляхи для усунення їх впливу.

Апробація результатів дисертації. Наукові та практичні результати, отримані в дисертації, обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” (м. Алушта, 2005 р.), “Силова електроніка та енергоефективність” (м. Алушта, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 р.р.).

Публікації. Результати дисертації викладені в 8 наукових працях, які опубліковано в наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 194 сторінки, з них 55 рисунка по тексту; 9 рисунків на окремих сторінках; 2 додатка на 4 сторінках; 119 найменувань використаних літературних джерел на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність і доцільність виконаної роботи, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення та реалізацію результатів дисертаційних досліджень, наведено відомості про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі проаналізовано керування типовими ПА асинхронних електроприводів з можливістю перемикання АД на мережу та навпаки. В усталеному режимі АД перебуває у режимі регулювання від ПА. При перевищенні навантаженням рівня, що потребує підключення додаткового АД, ПА переходить до режиму перемикання, розганяє підключений до нього АД до частоти, близької до частоти мережі, перемикає його на мережу, підключає до свого виходу наступний АД та переходить до режиму регулювання. При зниженні навантаження до рівня, що потребує відключення одного з АД, виконується зворотна процедура. У результаті аналізу виділені режими перемикання (який розділено на етапи синхронізації та перемикання контакторів) і регулювання. Зроблено висновок, що для прямого перемикання АД доцільно спочатку розмикати вихідний контактор (ВК), а потім замикати шунтувальний контактор (ШК), а для зворотного перемикання АД – спочатку замикати ВК, а потім розмикати ШК.

Показано, що при використанні сигналів напруги у якості опорних для синхронізації недоліками є необхідність у додатковій фільтрації та додаткові фазові похибки.

У результаті аналізу силових частин існуючих ПА показано, що найбільш обґрунтованим є використання ПА на основі ПЧ з ланкою постійного струму на базі автономного інвертора напруги або на базі автономного інвертора струму, для яких використовуються векторні закони керування.

Показано, що для розробки керування ПА електроприводу з кількома АД достатньо розгляду електроприводу одиночного АД.

У другому розділі синтезовано структурну схему системи керування ПА з можливістю перемикання АД на мережу та навпаки. Головною особливістю синтезованої структури (рис. 1) є використання сигналів потоків мережі та ротору у якості опорних. Використаний підхід дав можливість підвищити завадостійкість системи та уникнути додаткової фільтрації опорних сигналів.

Для аналізу процесів у системі використано координатний базис “струм-потік”, в якому у диференціальних рівняннях зв'язки між електричними величинами записуються не як зв'язки між струмом та напругою, а як зв'язки між струмом та інтегралом від напруги

$$\psi(t) = \int u(t) dt, \quad (1)$$

для якого вживається термін “потокоччеплення” (“потік”), хоча фізично він не завжди відповідає реальному магнітному потоку.



Рис. 1 Структурна схема системи керування ПА асинхронного електроприводу одиночного АД з можливістю його перемикавання на мережу та навпаки

У синтезованій структурі класифіковано перешкоди (похибки), до яких належать:

- лінійна та інтегральна перешкоди у датчиках потоку мережі та ротору, пов'язані з невизначеними початковими умовами інтегрування та наявністю у вхідному сигналі паразитної постійної складової;

- перешкоди у датчиках різниці амплітуд, фаз та частот, до яких належать інструментальна перешкода, зв'язана з диференціюванням тригонометричних функцій з обмеженим діапазоном розрахунку, інтегральна перешкода, пов'язана з відмінністю суми сигналів трифазної системи від нульового значення та параметрична перешкода, зв'язана з неточністю непрямого розрахунку потоків;

- пульсаційна перешкода, зв'язана з відмінністю реальної комутаційної

функції, що описує комутатор інвертора, від її неперервної апроксимації та перешкода, пов'язана з можливістю виникнення субгармонічних коливань внаслідок дискретного приросту вихідної напруги керованого випрямляча;

– перешкода, зв'язана з розкидом часів спрацьовування контакторів.

Запропоновано датчик потоку для визначення потоків ротора та мережі, задача якого полягала в інтегруванні сигналу ЕРС, що подавався на вхід. Допустимі фазові похибки датчика не перевищують частин електричного градуса, перехід датчика в сталий режим роботи виконується за декілька періодів вхідного сигналу. Датчик (рис. 2) виконано на основі модифікованого

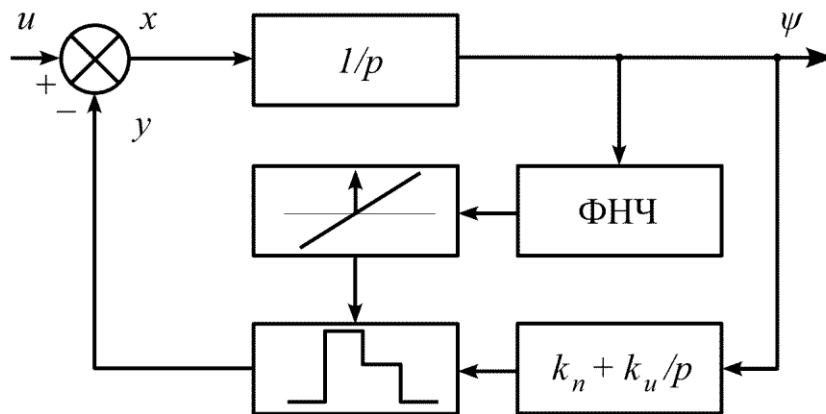


Рис. 2 Структурна схема датчика потоку

інтегратора зі зворотним зв'язком, при цьому усунуто наступні перешкоди:

– інтегральну перешкоду на виході основного інтегратора $1/p$ у вигляді початкового значення потоку, відмінного від усталеного;

– лінійну перешкоду, обумовленої інтегруванням паразитної постійної складової вхідного сигналу.

Усунення дії перешкод виконано за допомогою доповнення основного інтегратора спеціальною ланкою зворотного зв'язку, яка впливала тільки на перешкоди. По корисному сигналу система залишалась розімкненою, внаслідок чого усувались фазова та амплітудна похибки традиційного датчика на основі фільтру низьких частот (ФНЧ), які тим більше, чим більші вимоги висувуються до швидкодії датчика. Вибіркову дію ланки зворотного зв'язку забезпечено за допомогою введення в її склад дискретного фіксатора, що діяв з частотою корисного сигналу (його тактування виконано за допомогою тактуючого ФНЧ та нуль-індикатора). Синтез ланки виконано з урахуванням того, що період T корисного сигналу може змінюватися, з-за чого виконувалась автопідстроювання коефіцієнтів підсилення ПІ-коректора кожний період вхідного сигналу згідно з співвідношеннями:

$$k_n = 1,4/T, \quad k_u = 1/T^2. \quad (2)$$

Вимірювання періоду виконано за допомогою окремого таймеру.

Для отримання сигналів різності фаз та частот використано метод

результуючих векторів, при цьому здійснювався перехід у систему координат, яка обертається з частотою вектора потоку мережі. У цій системі координат вектор потоку мережі ставав нерухомим, а вектор потоку ротора обертався з частотою, визначенню якої заважала інструментальна перешкода, пов'язана з диференціюванням тригонометричних функцій з обмеженим діапазоном розрахунку. Для усунення її впливу диференціювання різницевого фазного кута φ виконано непрямым чином за допомогою диференціювання складових одиничного вектору потоку ротора $\psi_p' / |\psi_p| = e_1 + je_2$, що виявились досить гладкими функціями часу

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{de_1/dt + jde_2/dt}{j(e_1 + e_2)} \right\} = e_1 \frac{de_2}{dt} - e_2 \frac{de_1}{dt}. \quad (3)$$

Для усунення впливу параметричної перешкоди, пов'язаної з неточним визначенням параметрів еквівалентної схеми АД, а також імпульсних електромагнітних наведень, на вході датчиків різницевої частоти та різницевої амплітуди використано керувальну структуру, що може бути названа інтегральним входом. Її принцип дії полягає в використанні не поточних значень фазних потоків, а усереднених значень на інтервалі усереднення T_σ

$$\bar{\psi}(t) = \frac{1}{T_\sigma} \int_{t-T_\sigma}^t \psi(t) dt. \quad (4)$$

Сигнал на виході датчика різниці амплітуд визначено як різницю амплітуд потоків ротора і мережі.

У **третьому розділі** запропоновано алгоритми керування ПА при перемиканні з урахуванням силової частини, розроблено моделі АД при живленні від джерела потоку, визначено набір параметрів синхронізації та доцільний діапазон їх значень при прямому перемиканні.

При розробці системи перемикання враховано, що на етапі прямого перемикання при використанні потоку ротора замість магнітного потоку похибка $\Delta\varphi_{sp}$ становить

$$\Delta\varphi_{sp} = \arctg \frac{\omega_\sigma L_{sp}}{R_p/s}. \quad (5)$$

Установку параметрів синхронізації виконано з урахуванням інтервалу часу t_n , під час якого у живленні АД настає пауза. На етапі синхронізації створено упередження по частоті $\Delta\omega_{sp}$, фазі $\Delta\theta_{pn}$ та амплітуді потоку ротора $\Delta|\psi_p|$ відносно потоку мережі:

$$\Delta\omega_{sp} = -\frac{M_n}{J} t_n, \quad \Delta\theta_{pn} = -\frac{M_n}{2J} t_n^2, \quad \Delta|\psi_p| = -|\psi_{pn}| \frac{t_n}{\tau_m}, \quad (6)$$

при цьому знак “-” у виразах означає, що результуючий вектор потоку ротора повинен випереджати результуючий вектор потоку мережі по усім трьом параметрам синхронізації.

Розрахунок часу паузи у живленні АД та моменту початку цієї паузи виконано з урахуванням дискретності ПЧ, інтервалу гасіння струму в інверторі та розкиду часів спрацьовування контакторів.

Показано, що з урахуванням впливу дискретності ПЧ момент початку паузи в живленні АД після подачі команди на пряме перемикання відстоїть від поточного моменту часу на

$$t_{наст} = \frac{(\alpha - \alpha_{nom})}{\omega_c}, \quad (7)$$

після якого і починається пауза в живленні АД.

Показано, що інтервал гасіння струму в інверторі з достатньою точністю еквівалентний додатковому інтервалу в живленні АД, але при цьому від часу гасіння струму треба відняти час $t_{наст}$.

Щоб уникнути проблеми, пов'язаної з розкидом часів спрацьовування ВК, введено програмну затримку від моменту видачі команди на вимкнення ВК до моменту видачі команди на вмикання ШК, що з деяким запасом перевищувала власний час спрацьовування ВК.

Для уникнення проблеми, пов'язаної з розкидом часів спрацьовування ШК з урахуванням розглянутих у розд. 2 перехідних процесів при підключенні АД на мережу на етапі синхронізації виставлено упередження по частоті таким чином, щоб в момент безпосереднього підключення АД до мережі частота ковзання дорівнювала не номінальному, а нульовому значенню.

Аналіз впливу параметрів синхронізації при прямому перемиканні виконано аналітичним та числовим методами на основі еквівалентної схеми АД у базисі “струм-потік” при живленні від джерела потоку (рис. 3) (колом

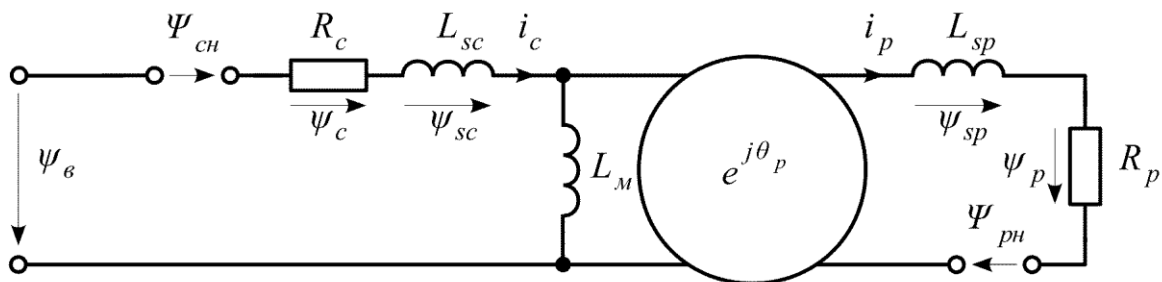


Рис. 3 Еквівалентна схема АД при живленні від джерела потоку

зображена ланка повороту, що здійснює частотний перехід від параметрів статора до параметрів ротора).

При використанні в аналітичних дослідженнях методів декомпозиції по частоті та фазі еквівалентну схему системи розділено на роторну та статорну (рис. 4), а роторну еквівалентну схему розділено на поздовжню та поперечну (рис. 5). Механічні параметри АД приведено до поперечної еквівалентної схеми ротору (рис. 5,б) за допомогою введення в її склад еквівалентних ємності $C = 2J / (3 p_n |\psi_{\sigma}|^2)$ та джерела потоку $\Psi_{\sigma 2}$, яке враховує початкові значення

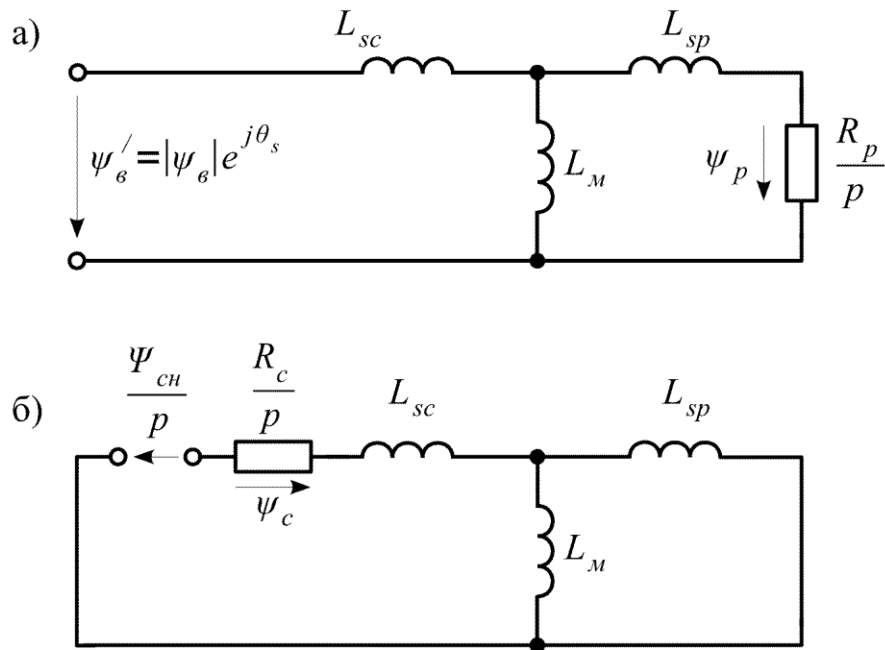


Рис. 4 Декомпозиція по частоті еквівалентної схеми АД при живленні від джерела потоку на ротору (а) та статору (б) еквівалентні схеми

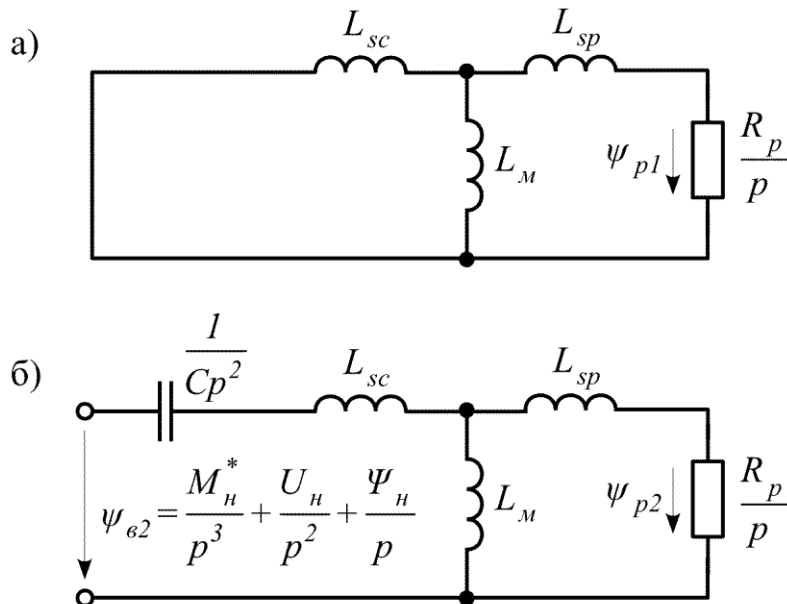


Рис. 5 Декомпозиція по фазі роторної еквівалентної схеми на поздовжню (а) та поперечну (б) схеми заміщення

параметрів механічної частини – моменту навантаження ΔM_n , частоти ковзання ротору $\Delta \omega_s$ та кута ковзання $\Delta \theta_s$ згідно з виразами:

$$M_n^* = |\psi_6| \Delta M_n / J, \quad U_n = |\psi_6| \Delta \omega_s, \quad \Psi_n = |\psi_6| \Delta \theta_s. \quad (8)$$

Згідно з еквівалентними схемами виявлено складові перехідних процесів

та здобуті аналітичні залежності для вільних складових струму статора та електромагнітного моменту. При цьому в вільних складових струму статора та електромагнітного моменту виявлено дві компоненти.

Першу запропоновано називати статорною, вона залежить від значення початкового потоку статора $\Psi_{сн}$ (рис. 4,б) та має вид затухаючої з постійною часу статору $\tau_c \approx L_s / R_c$ синусоїди з частотою, приблизно рівною частоті мережі. Другу запропоновано називати роторною, вона має вид затухаючої з постійною часу $\tau = 2L_s / R_p$ синусоїди з частотою, приблизно рівною $\omega = \sqrt{1 / (L_s C) - R_p^2 / (4L_s^2)}$.

Визначення точних значень перехідних величин електромагнітного моменту та струму статора виконано за допомогою числових моделей:

$$i_c = -\left(k_c(\psi_c - \psi_s) + k_p \psi_p e^{j\theta_p}\right), \quad i_p e^{j\theta_p} = -\left(k(\psi_c - \psi_s) + k_p \psi_p e^{j\theta_p}\right). \quad (9)$$

Коефіцієнти обчислювались згідно співвідношень:

$$k_c = \frac{L_m + L_{sp}}{m}, \quad k = \frac{L_m}{m}, \quad k_p = \frac{L_m + L_{sc}}{m}, \quad m = L_m L_{sc} + L_m L_{sp} + L_{sc} L_{sp}. \quad (10)$$

Перевагою використаних числових моделей у порівнянні з моделями бібліотеки Simulink пакету Matlab є можливість прямого задавання значень початкових потоків. Результати досліджень за допомогою чисельної моделі на прикладі АД типу 5А3МВ наведені на рис. 6. Найбільший вплив на амплітуди перехідних значень струму статора та електромагнітного моменту здійснювала розбіжність по фазі (рис. 6, г), при цьому допустиме (за умови допустимості двократної амплітуди перехідних струму статора та електромагнітного моменту) значення розбіжності по фазі дорівнювало одиницям електричних градусів, що виставляє високі вимоги до заводозахищеності системи перемикачів та фазовим похибкам датчиків. Найбільш сприятливі умови протікання перехідного процесу забезпечує підключення не з номінального, а з нульового ковзання (рис. 6, в). Розбіжність по амплітуді здійснювала найменший вплив на амплітуди перехідних значень струму статора та електромагнітного моменту (рис. 6, б).

Для зворотного перемикачів у інверторі з одноопераційними тиристорами розглянуто питання синхронізації. При цьому встановлено, що перехідний процес при вмиканні вторинної обмотки вихідного трансформатора на мережу при знятті з інвертора імпульсах керування не становить загрози для ПЧ. Після закінчення цього процесу в інверторі вводилась в роботу одна із стійок, а випрямляч переводився у випрямний режим. Після введення в інверторі в роботу тиристора іншої фази в момент часу, що забезпечував стійку комутацію, синхронізація закінчувалась і здійснювався перехід у режим регулювання.

У четвертому розділі синтезовано функціональну схему системи керування ПЧ (рис. 7), синтезовано її регулятори, розроблено математичні моделі силової частини системи "ПЧ-АД".

Аналітичну модель силової частини системи "ПЧ – АД" розроблено з

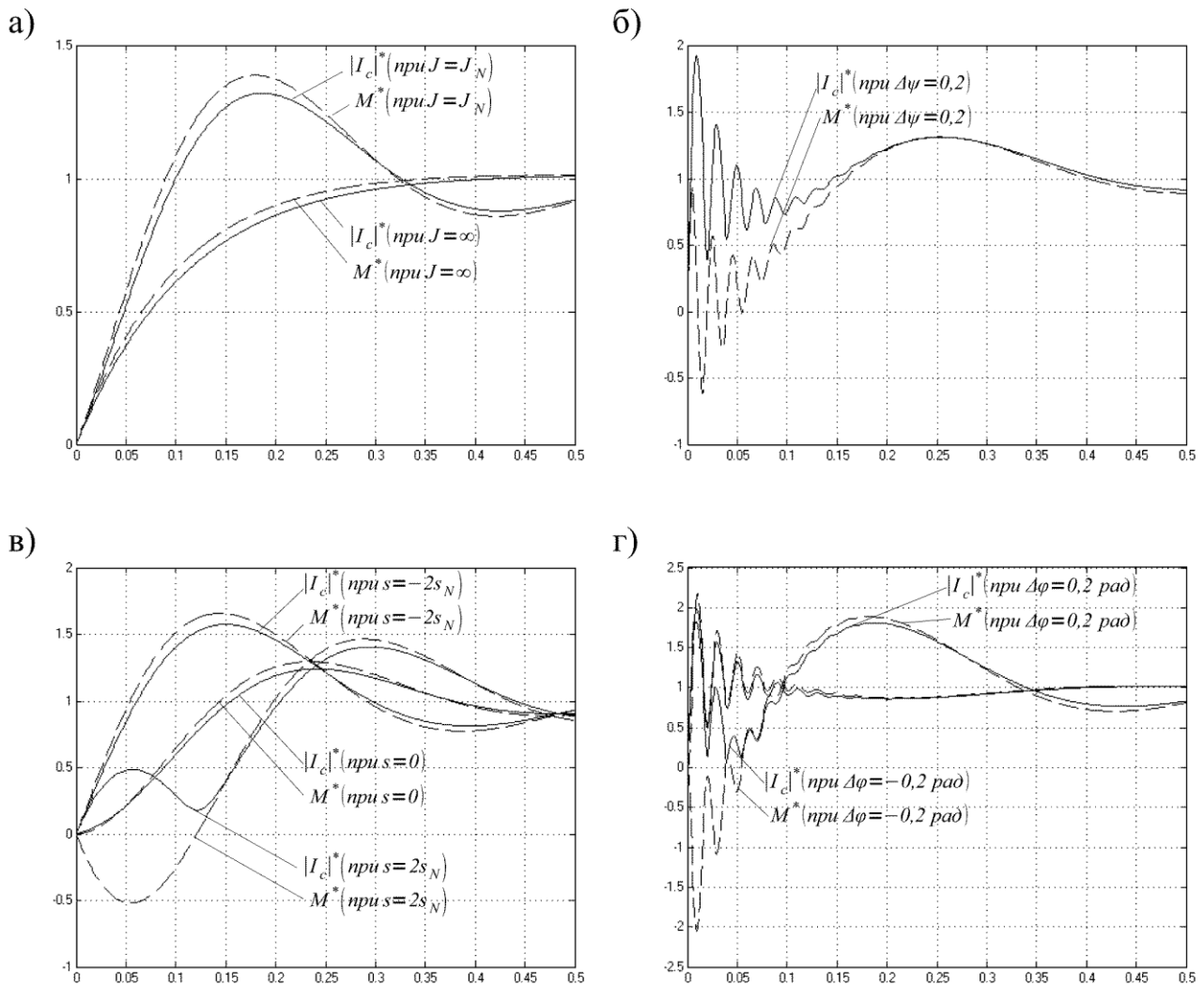


Рис. 6 Машинограми відносних значень струму статора та електромагнітного моменту при підключенні АД на мережу:

- а – без розбіжностей по параметрам синхронізації;
- б – при наявності розбіжності по амплітуді;
- в – при наявності розбіжності по частоті;
- г – при наявності розбіжності по фазі

метою здобуття співвідношень, корисних при синтезі регуляторів системи керування, за допомогою яких виконувалась синхронізація. Використання методу основної гармоніки для опису комутаторів в поєднанні з приведенням параметрів АД до ланки постійного струму ПЧ дозволило підтвердити нестійкість систем з незалежної комутаційної функцією, стійкість систем з контрольованою комутаційною функцією та отримати еквівалентну схему системи “ПЧ – АД” (рис. 8), параметри якої обчислюються за виразами:

$$L_n = L_d + k_c L_s, \quad R_n = k_c (R_c + R_p), \quad C = \frac{2}{k_c R_p \omega_g \sin 2\theta}, \quad g = \frac{2}{k_c L_M \omega_g \sin 2\theta}. \quad (11)$$

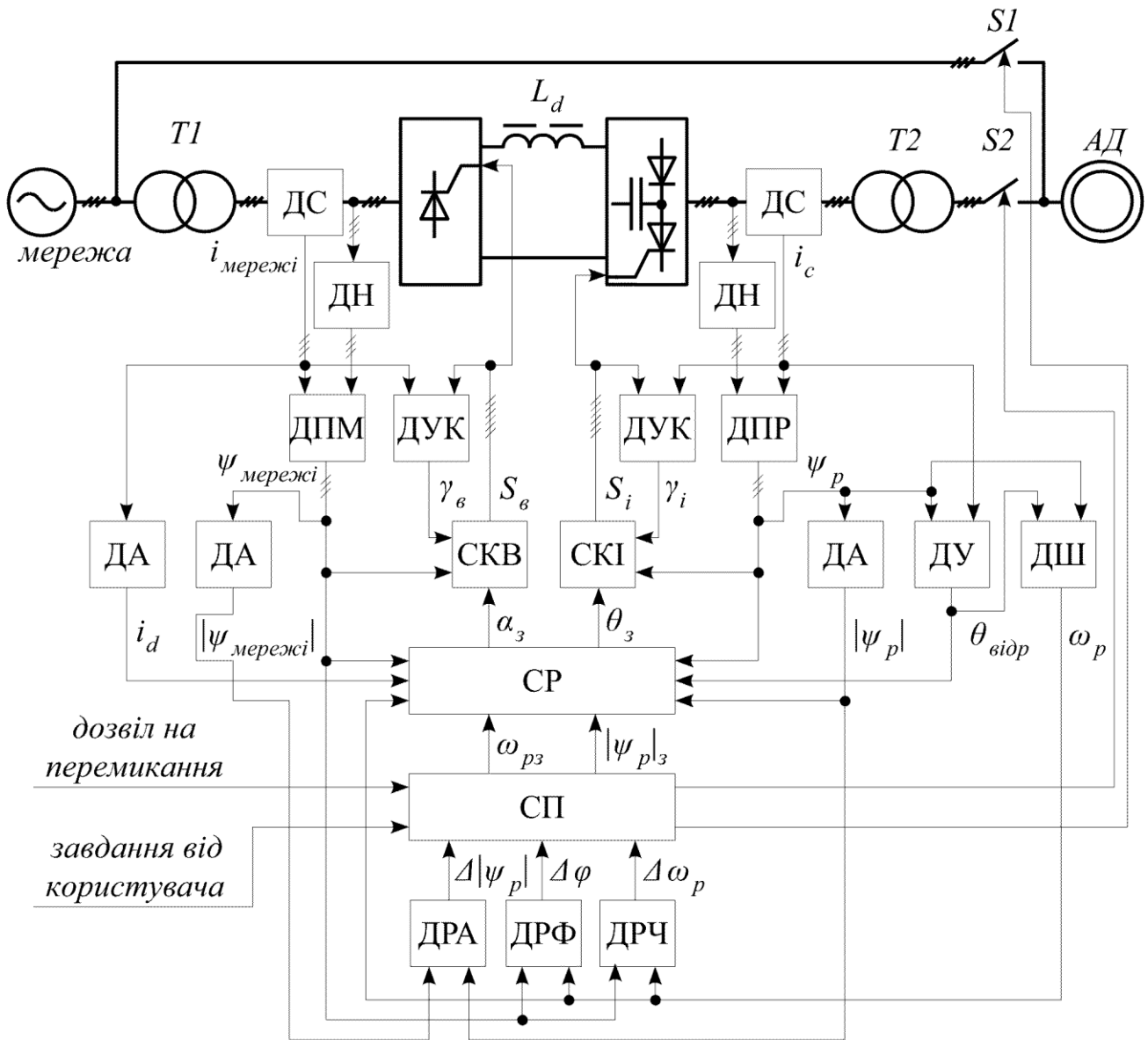


Рис. 7 Функціональна схема системи керування ПА асинхронного електроприводу АД з можливістю його перемикання на мережу та навпаки

Використано потік мережі у якості одного з двох опорних сигналів системи керування ПЧ. Запропоновано симетричний принцип будовання системи формування імпульсів, при якому канали керування випрямлячем та інвертором виконано симетрично: у той час, як інверторний канал формував фазу струму статора за допомогою впливу на кут зсуву θ між потоком ротора і струмом статора, випрямний канал формував амплітуду струму статора за допомогою впливу на кут зсуву α між потоком і струмом мережі. Опорними сигналами були сигнали потоків ротора та мережі. Обчислювання фазового зсуву виконано з урахуванням кута комутації.

Система регулювання для режиму регулювання підтримувала закон керування з постійним кутом, для режиму перемикання – закон керування з

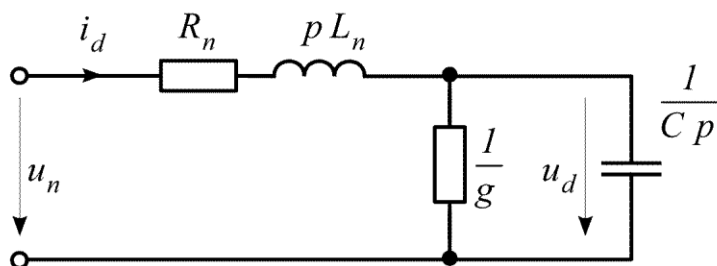


Рис. 8 Еквівалентна схема системи «ПЧ – АД» з приведеними до ланки постійного струму параметрами еквівалентної схеми АД

постійною амплітудою потоку, для яких використовувались типові структури. Для режиму перемикання було проведено синтез регуляторів системи регулювання за допомогою методу еквівалентних опорів, сутність якого полягає в заміщенні передаточної функції регулятора еквівалентною електричною схемою з подальшим приведенням до ланки постійного струму еквівалентної схеми рис. 8. Застосування цього методу дозволило використати добротність Q як головну динамічну характеристику контуру регулювання.

Регулятор струму пропорційно-інтегрального (ПІ) типу з коефіцієнтами підсилення пропорційної k_{in} та інтегральної k_{iu} частин синтезовано за допомогою співвідношень:

$$k_{in} = 6L_d / (T_c k_\epsilon), \quad k_{iu} = k_\epsilon (Q k_{in})^2 / L_d, \quad k_\epsilon = \frac{3}{\pi} U_{lm}. \quad (12)$$

При цьому обмеження по значенню коефіцієнту k_{in} вносила перешкода, пов'язана з можливістю виникнення субгармонічних коливань внаслідок дискретного приросту вихідної напруги ПЧ.

Регулятор потоку ПІ-типу з коефіцієнтами підсилення пропорційної $k_{\psi n}$ та інтегральної $k_{\psi u}$ частин синтезовано згідно зі співвідношеннями:

$$k_{\psi u} = Q \left[(1/L_m + |s_\epsilon| k_{\psi n}) \right]^2 R_p / |s_\epsilon|, \quad k_{\psi n} \leq \sqrt{3} \omega_\epsilon R_p. \quad (13)$$

При цьому обмеження по значенню коефіцієнту $k_{\psi n}$ вносила пульсаційна перешкода, пов'язана з відміною реальної комутаційної функції s_ϵ від її неперервної апроксимації, що могло привести до зриву комутації в інверторі.

Практичні дослідження також показали, що регулятор швидкості можна прийняти чисто пропорційним, при цьому коефіцієнт підсилення $k_{\omega n}$ обмежується значенням допустимої статичної похибки.

Моделювання перемикання АД на мережу та навпаки виконано за допомогою бібліотеки Simulink пакету Matlab для таких даних: напруга живлення 10кВ , АД типу 5А3МВ потужністю 3150кВт , вентиляторний момент навантаження на валу з номінальним значенням $M = 10000\text{Н}\cdot\text{м}$, сумарний момент інерції $J = 310\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Результати наведено на рис. 9. Перемикання АД за ПА на мережу

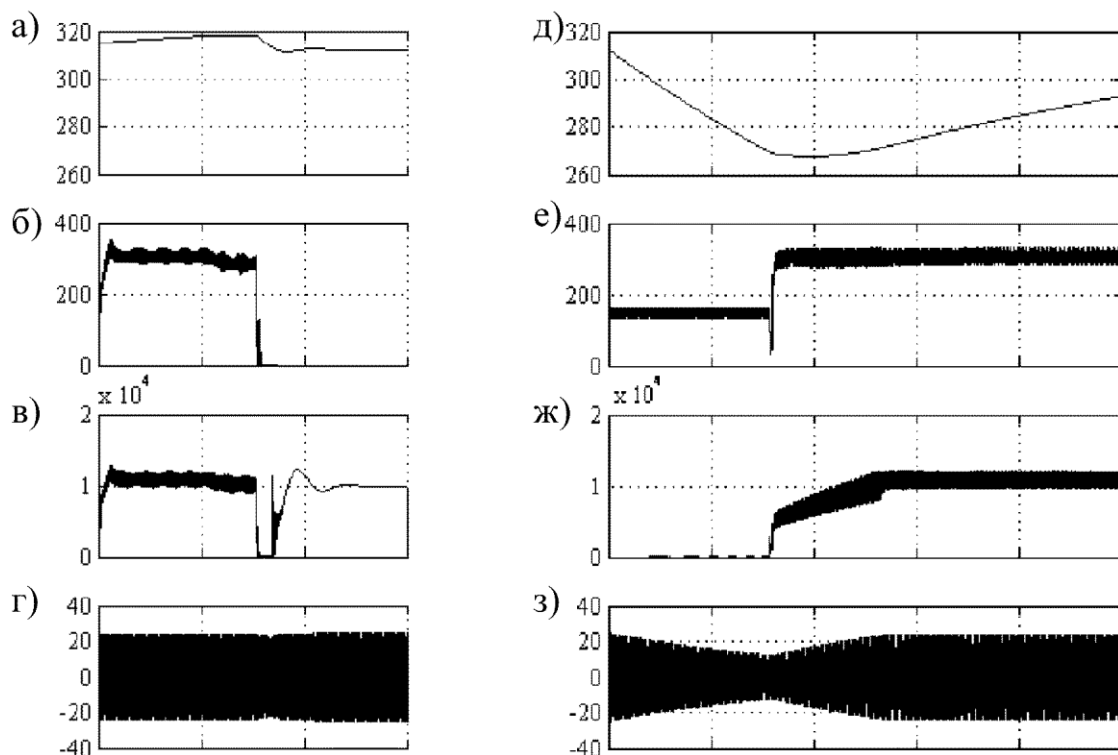


Рис. 9. Машинограми процесів при перемиканні АД на мережу (а-г) та навпаки (д-з):

- а - частота ротору при прямому перемиканні;
- б - струм у ланці постійного струму ПЧ при прямому перемиканні;
- в - електромагнітний момент при прямому перемиканні;
- г - потік ротору при прямому перемиканні;
- д - частота ротору при зворотному перемиканні;
- е - струм у ланці постійного струму ПЧ при зворотному перемиканні;
- ж - електромагнітний момент при зворотному перемиканні;
- з - потік ротору при зворотному перемиканні

(рис. 9, а-г) виконувалось при установленні упереджень по фазі, частоті та амплітуді згідно з співвідношеннями (6). Команда на перемикання видавалась в момент початку гасіння струму інвертора (рис.9, б). З аналізу рис. 9, в зроблено висновок, що перехідне значення електромагнітного моменту приблизно на 30% перевищує його номінальне значення, що являється задовільним. Перемикання АД з мережі на ПА (рис. 9, д-з) почалось в початковий момент часу машинограм з видачі команди на замикання ВК з подальшою видачею команди на розмикання ШК. При цьому струм інвертора, в якому була замкнена одна стійка, дорівнював половині від номінального. Після паузи в 1,5сек виконувалось підхоплення АД. Моделювання підтвердило наведені вище співвідношення та рекомендації.

Основні дослідження виконувались для ПЧ з ланкою постійного струму

на базі інвертора струму. В той же час здобуті співвідношення можуть бути використані і для керування ПЧ з ланкою постійного струму на основі інвертора напруги.

Основні співвідношення підтвердженні також на фізичному лабораторному макеті потужністю 7 кВт.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі керування напівпровідниковим ПЧ при перемиканні АД на мережу та навпаки. При цьому були здобуті наступні результати:

1. Розроблені структури системи керування ПЧ дозволили виконати керування ПЧ як у режимі перемикання, так і у режими регулювання.

2. Використання потоку мережі у якості одного з двох опорних сигналів системи керування ПЧ дозволило підвищити завадостійкість, надати схемі ПЧ певну симетрію й застосувати для каналів керування випрямлячем та інвертором однотипний алгоритм.

3. Класифікація перешкод в системі керування дала змогу розробити засоби для усунення їх впливу шляхом використання координатного базису “струм – потік” при розробці структури системи керування, обмеженням коефіцієнтів підсилення пропорційних частин регуляторів струму та потоку, розробкою датчика потоку з швидким переходом в усталений режим роботи, застосуванням інтегрального входу та непрямого диференціювання в датчиках різницевих фаз та частот, впровадженням програмної затримки для усунення впливу розкиду часів спрацьовування ВК, підключенням з нульового ковзання для усунення впливу розкиду часів спрацьовування ШК.

4. Визначення набору параметрів синхронізації при прямому перемиканні дозволило виділити першочерговий вплив розбіжності по фазі, та другорядний вплив розбіжностей по частоті та амплітуді між векторами потоків ротору та мережі на перехідні значення електромагнітного моменту та струму статора.

5. Аналіз впливу розбіжностей по фазі, частоті та амплітуді між векторами потоків ротору та мережі на процеси при перемиканні АД на мережу показав, що при умові дозволеності двократних по відношенню до номінальних значень перехідних струму статора та електромагнітного моменту допустимий діапазон розбіжності по фазі складає кілька електричних градусів, розбіжності по частоті – частини герца, по амплітуді – кілька процентів.

6. Розроблені числові та аналітичні моделі АД в координатному базисі “струм-потік” дозволили провести аналіз впливу параметрів синхронізації на перемикання АД на мережу та виділити в перехідних процесах статорну та роторну компоненти.

7. Розроблені математичні моделі електромеханічних процесів у силовій частині системи “ПЧ-АД” дозволили спростити синтез регуляторів системи керування ПА на етапі перемикання.

8. Синтезована структура системи керування ПЧ та контакторами дозволила виконати перемикання АД на мережу та навпаки із значеннями перехідних величин струму статора та електромагнітного моменту, що не перевищують номінальних більше, ніж удвічі.

9. Результати дисертаційної роботи знайшли застосування при проектуванні ПЧ для електроприводів на ДП “НДІ “ХЕМЗ”, а також в навчальному процесі кафедри промислової і біомедичної електроніки НТУ “ХП”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Родин Н. Ю. Модель инвертора в координатах «ток–поток» и ее применение при анализе переходных процессов в частотнорегулируемых приводах / Е. И. Сокол, Ю. П. Гончаров, В. В. Замаруев, А. В. Ерьсько, А. Ю. Бару, Ю. Л. Шинднес, Н. Ю. Родин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2005. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 93-98.

Здобувачем запропонована модель системи “автономний інвертор струму – асинхронний двигун” в координатному базисі “струм – потік” з подальшим приведенням параметрів двигуна до ланки постійного струму інвертора.

2. Родин Н. Ю. Переход к $i\psi$ -координатному базису при моделировании частотно-регулируемых электроприводов / Ю. П. Гончаров, Е. И. Сокол, А. Ю. Бару, В. В. Замаруев, С. Ю. Кривошеев, Н. В. Хворост, Ю. Л. Шинднес, Н. Ю. Родин // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2005. – Вип. 45. – С. 40-44.

Здобувачем розроблено аналітичні моделі АД при живленні від джерела потоку в базисі “струм – потік” та декомпозовано еквівалентну схему АД по частоті і фазі, механічні параметри приведено до електричних схем заміщення.

3. Родин Н. Ю. Переходные процессы в частотнорегулируемом электроприводе при переключении двигателя на сеть / Ю. П. Гончаров, Е. И. Сокол, В. В. Замаруев, А. Ю. Бару, Ю. Л. Шинднес, Н. Ю. Родин // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2005. – Вип. 45. – С. 168-172.

Здобувачем розроблено числові моделі АД при живленні від джерела потоку в базисі “струм – потік”, визначений набір параметрів синхронізації, проаналізовано їх вплив на перехідні процеси при підключенні АД на мережу.

4. Родин Н. Ю. Характеристики системы «инвертор напряжения – двигатель» при прогнозном управлении по результирующему вектору тока / Ю. П. Гончаров, Н. В. Хворост, Н. Ю. Родин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2006. – Ч. 4, Тематичний вип. – С. 45-50.

Здобувачем запропоновано використання методу стеження за результируючим вектором струму ротора при постійній частоті ШІМ для керування ПЧ з ланкою постійного струму на базі інвертора напруги.

5. Родин Н. Ю. Особенности работы частотнорегулируемого

електропривода на базі інвертора тока в режимі переключення двигателя с сети на преобразователь / Ю. П. Гончаров, А. В. Ерьсько, А. Ю. Бару, Ю. Л. Шинднес, В. А. Поповский, Н. Ю. Родин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2007. – Ч. 4, Тематичний вип. – С. 34-37.

Здобувачем розроблено алгоритм перемикання АД з мережі на ПА з урахуванням силової частини та розглянуто процеси при синхронізації у ПЧ.

6. Родин Н. Ю. Частотнорегулируемый электропривод на базе инвертора тока с переключением двигателя с преобразователя на сеть / Е. И. Сокол, Ю. П. Гончаров, А. Ю. Бару, Ю. Л. Шинднес, В. А. Поповский, Н. Ю. Родин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2007. – Ч. 5, Тематичний вип. – С. 3-8.

Здобувачем запропоновано структуру системи перемикання АД з ПА на мережу та синтезовано її регулятори; розроблено алгоритм перемикання АД з ПА на мережу та методику мінімізування наслідків розкиду часів спрацьовування комутаційної апаратури.

7. Родин Н. Ю. Цифровой датчик потока для электроприводов с преобразователями частоты / Ю. П. Гончаров, А. Ю. Бару, Ю. Л. Шинднес, В. А. Поповский, Н. Ю. Родин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2008. – Ч. 4, Тематичний вип. – С. 23-28.

Здобувачем розроблено датчик потоку на основі модифікованого інтегратора зі зворотним зв'язком для виконання операції інтегрування ЕРС.

8. Родин Н. Ю. Помехи в системе управления преобразователем частоты асинхронного электропривода с переключением двигателя на сеть и обратно / Ю. П. Гончаров, А. Ю. Бару, Ю. Л. Шинднес, В. А. Поповский, Н. Ю. Родин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2009, Ч. 4. – Тематичний вип. – С. 57-62.

Здобувачем класифіковано перешкоди, що діють у системі керування перетворювальним агрегатом, та запропоновано шляхи для усунення їх впливу.

АНОТАЦІЇ

Родін М. Ю. Керування напівпровідниковим перетворювачем частоти асинхронного електропривода при перемиканні двигуна на мережу та навпаки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі енергії. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” – Харків – 2010.

Дисертація присвячена розробці принципів керування напівпровідниковими перетворювачами частоти асинхронних електроприводів при перемиканні двигуна на мережу та навпаки. Розроблено структури системи керування. Застосовано сигнали потоків ротора та мережі у якості опорних. Розроблено датчик потоку та датчики різницевої фази, частоти та амплітуд.

Класифіковано перешкоди в системі керування. Визначено набір параметрів синхронізації та їх індивідуальний вплив на процеси при підключенні двигуна на мережу. Розроблено числові, аналітичні моделі двигуна в координатному базисі “струм-потік” та аналітичні моделі системи “перетворювач-двигун”. Синтезовано регулятори системи керування у режимі перемикавання. Розраховано упередження по параметрам синхронізації при перемиканні двигуна на мережу.

Ключові слова: напівпровідниковий перетворювач, керування перемиканням двигуна, датчики, перешкоди, перехідні процеси.

Rodin N. Y. The control of semiconductor frequency converter of asynchronous electric drive while transferring to supply and back. – Manuscript.

Thesis for a candidate of science degree in the speciality 05.09.12 – semiconductor converters of electric energy. – National technical university “Kharkov polytechnic Institute” – Kharkiv – 2009.

Dissertation was devoted to the development of control principles of semiconductor frequency converter for asynchronous drives when switching motor to supply and back. Control system structures were developed. The signals of rotor flux and supply flux were used as referenced ones. The flux sensor and the sensors of phase, frequency and magnitude differences were developed. The noises in control system were classified. Synchronization parameter set and the individual influence of this parameters on process while switching motor to supply were fulfilled. The numerical, analytical models of motor in coordinate basis “current-flux” and the analytical models of “converter-motor” system were developed. Control system regulators in switching mode were synthesized. Synchronization parameter forestallings while switching motor to supply were calculated.

Key words: semiconductor converter, motor transfer control, sensors, noise, transients.

Родин Н. Ю. Управление полупроводниковым преобразователем частоты асинхронного электропривода при переключении двигателя на сеть и обратно. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» – Харьков – 2009.

Диссертация посвящена разработке принципов управления полупроводниковыми преобразователя частоты асинхронных электроприводов при переключении двигателя на сеть и обратно.

Разработаны структуры системы управления, особенностью которых является наличие системы переключения (формирующей задание частоты и амплитуды потока ротора на этапе синхронизации, а также управляющей контакторами) и использование в качестве опорных сигналов потоков ротора и сети (под потоком сети понимается интеграл от напряжения сети).

Разработан датчик потока для интегрирования входного сигнала, быстрый переход которого в установившийся режим работы достигнут за счет использования модифицированного интегратора с обратной связью, имеющей в своем составе дискретный фиксатор. Разработаны датчики разностных фаз, частот и амплитуд с использованием метода вращающихся векторов.

Классифицированы помехи в системе управления, предложены механизмы устранения их влияния. Действие линейной и интегральной помех (связанных с неизвестными начальными условиями интегрирования и наличием во входном сигнале паразитной постоянной составляющей) в датчике потока ротора устранено путем введения специальной обратной связи с дискретным характером работы. Действие инструментальной помехи (связанной с дифференцированием тригонометрических функций с ограниченным диапазоном вычислений) в датчиках разностных сигналов устранено переходом к косвенному дифференцированию составляющих вектора потока ротора единичной амплитуды. Влияние параметрической помехи (обусловленной неточностью косвенного вычисления потока) устранено использованием для разностных датчиков не текущего, а усредненного не некотором интервале значения фазного сигнала. Действие пульсационной помехи (связанной с отличием реальной коммутационной функции коммутатора инвертора от ее непрерывной аппроксимации) устранено ограничением коэффициента усиления пропорционального звена регулятора потока. Влияние субгармонической помехи (обусловленной дискретностью приращения выходного напряжения выпрямителя) устранено ограничением коэффициента усиления пропорционального звена регулятора тока. Действие помехи, связанной с разбросом времен срабатывания выходного контактора, устранено введением программной задержки от момента выдачи команды на размыкание выходного контактора до момента выдачи команды на замыкание шунтирующего контактора. Действие помехи, связанной с разбросом времен срабатывания шунтирующего контактора, устранено установкой таких упреждений по параметрам синхронизации, при которых подключение двигателя к сети происходило не с номинального, а с нулевого скольжения.

Детализированы алгоритмы прямого и обратного переключений с учетом особенностей типа силовой части.

Рассчитаны упреждения по параметрам синхронизации при переключении двигателя на сеть. Показано, что вначале необходимо устанавливать упреждение по амплитуде, затем – по частоте, затем – по фазе. При расчете упреждений учтены дискретность преобразователя, этап гашения тока, этап паузы в питании двигателя и фазовый сдвиг при использовании для синхронизации потока ротора вместо основного магнитного потока двигателя.

Определен набор параметров синхронизации, влияющих на процессы при подключении возбужденного двигателя к сети. Показано, что в большей степени влияние на переходные значения электромагнитного момента и амплитуды тока статора оказывает рассогласование по фазе, в меньшей степени

– рассогласования по частоте и амплитуде между векторами потоков ротора и сети. Определено индивидуальное влияние рассогласований по фазе, частоте и амплитуде на переходные процессы при подключении двигателя к сети. С помощью разработанных в координатном базисе «ток-поток» моделей двигателя найдено, что при допустимости двукратных по отношению к номинальным переходных значений амплитуды электромагнитного момента и тока статора величина рассогласования по фазе имеет порядок единиц электрических градусов, по частоте – долей герца, по амплитуде – единиц процентов. С помощью разработанных в координатном базисе «ток-поток» аналитических моделей в переходном процессе при подключении двигателя к сети выделены статорная (зависящая от начального значения потока статора) и роторная (зависящая от сочетания электрических параметров ротора и механических параметров) составляющие.

Разработаны аналитические модели системы «преобразователь-двигатель». Выполнен синтез регуляторов системы управления преобразователем в режиме переключения при поддержании закона управления с постоянной амплитудой потока.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, управление переключением двигателя, датчики, помехи, переходные процессы.



Відповідальний за випуск к.т.н., проф. Замаруєв В.В.

Підп. до друку 27.08.2010 р. Формат видання 145x215. Формат паперу 60x90/16.
Папір офісний. RISO-друк. Гарнітура Таймс. Обсяг 0,9. авт. арк.
Наклад 100 прим. Зам. № 028361

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є. М.
Свідоцтво про державну реєстрацію № 2 480 017 0000 040432 від 21.03.2001 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 16