

Національний університет "Львівська політехніка"

КУЗНЕЦОВ ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 62-83:621.313.333

**ПРОЦЕСИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ЕНЕРГІЄЮ КОНДЕНСАТОРА, ЯКА
ЗУМОВЛЕНА КОВЗАННЯМ**

05.09.03 Електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Львів 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті "Львівська політехніка"
Міністерства освіти і науки

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Плахтина Омелян Григорович,
професор кафедри електроприводу та автоматизації
промислових установок Національного університету
"Львівська політехніка".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
завідувач кафедри електромеханіки Дніпродзержинського
державного технічного університету.

доктор технічних наук, професор
Радімов Сергій Миколайович,
професор кафедри енергоменеджменту Одеського
національного політехнічного університету

Захист відбудеться "11" березня 2011 р. о 12 годині 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.35.052.02 в Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, м.Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд.114).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м.Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "7" лютого 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Коруд В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з тенденцій у розвитку електроприводу (ЕП) є зменшення долі систем приводу постійного струму, та відповідно, збільшення долі приводу змінного струму, зокрема асинхронного. Однак, порівняно з машинами постійного струму, асинхронна машина (АМ) має недоліки, пов'язані зі складністю регулювання та формування характеристик в асинхронному електроприводі.

Перспективним напрямком керування асинхронного електроприводу (АЕП) з фазним ротором є схема машини подвійного живлення (МПЖ). Перевагою систем векторного керування МПЖ, що використовують вектор напруги ротора для керування АМ, є можливість керувати моментом електричної машини з одночасним регулюванням коефіцієнта потужності кола статора. Зокрема, перспективним є використання таких схем для регульованого електроприводу великих насосних і вентиляторних установок, а також для модернізації ЕП на базі АМ з фазним ротором (АМФР).

Перспективними є також схеми з АМФР, що дозволяють використовувати потужність ковзання для керування такою машиною, оскільки вони дають можливість підвищити енергетичну ефективність схеми.

Враховуючи наведені вище міркування, задача розробки нових і підвищення ефективності існуючих способів керування АЕП, зокрема в системах з використанням потужності ковзання, є **важливою і актуальною науково-прикладною задачею.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку Національного університету "Львівська політехніка" "Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності", розробленого згідно з Законом України "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки" від 11 липня 2001 року. Тема дисертаційної роботи пов'язана з держбюджетною роботою ДБ/Якість "Засоби та способи покращення керованості та якості електроенергетичних систем" (держреєстрація № 0109U001163, 2009 – 2010 р.).

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка асинхронного електроприводу зі збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, та проведення аналізу засобами математичного та фізичного моделювання закономірностей перетворення енергії у запропонованому електроприводі.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- Розробити схеми асинхронного електроприводу зі збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, та способів керування таким електроприводом;
- Провести теоретичне обґрунтування процесів у запропонованій схемі електроприводу;
- Створити математичну модель такої системи;

- Провести засобами математичного та фізичного моделювання аналіз процесів в запропонованому АЕП.

Об'єктом дослідження в даній роботі є асинхронна машина, керована зі сторони ротора.

Предметом дослідження є електромеханічні та електромагнітні процеси в ЕП з асинхронною машиною, керованою зі сторони ротора.

Методами дослідження, використаними в даній роботі є: теорія електричних кіл для аналітичного пояснення можливості збудження асинхронної машини енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням; метод середньокрокових напруг другого порядку для реалізації комп'ютерних моделей; метод математичного моделювання електромашинно-вентильних систем та методи об'єктно-орієнтованого проектування, які використовувались для аналізу схеми асинхронного електроприводу зі збудженням від енергії ковзання ротора та для перевірки ефективності методу середньокрокових напруг другого порядку; метод фізичного моделювання, який використовувався для підтвердження теоретичних положень та перевірки адекватності розробленої математичної моделі.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі:

1. Отримала подальший розвиток теорія керування АЕП шляхом теоретичного обґрунтування використання енергії конденсатора, зумовленої ковзанням, для збудження АМ та компенсації магнітного поля обмотки статора, що дало змогу забезпечити коефіцієнт потужності в статорі $\cos \varphi = 1$ при регулюванні швидкості вище і нижче синхронної.

2. Запропоновано спосіб керування АМ з компенсованим магнітним полем обмотки статора і збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, що дає змогу забезпечити формування необхідних механічних характеристик електроприводу без необхідності визначення електромагнітного моменту.

3. Вперше з застосуванням методу середніх крокових напруг створено математичну модель АМ з інвертором напруги, яка дозволяє дослідити електромагнітні та електромеханічні процеси в АЕП з підвищеною швидкодією та точністю розрахунку.

4. Вперше отримано аналітичні вирази, які описують процес електромеханічного перетворення енергії в АМ з компенсованим магнітним полем обмотки статора і збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, що дали змогу встановити діапазон зміни швидкості та моменту даного електроприводу та його залежність від параметрів силового кола.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Запропоновано схему АЕП, в якій для збудження асинхронної машини та компенсації магнітного поля обмотки статора використовується енергія конденсатора, що зумовлена ковзанням, яку доцільно використовувати для модернізації існуючих електроприводів з АМФР з метою покращення їх енергетичних характеристик.

2. Розроблені комп'ютерні моделі АЕП з інвертором напруги в колі ротора доцільно використовувати для проектування нових систем АЕП.

3. Вироблено рекомендації щодо обмежень, які накладаються на використання запропонованої схеми АЕП.

Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі під час підготовки бакалаврів напрямку 6.050702 "Електромеханіка", а також спеціалістів та магістрів спеціальності 7(8).092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" на кафедрі Електроприводу та автоматизації промислових установок Інституту енергетики та систем керування Національного університету "Львівська політехніка". Відповідні документи про використання результатів роботи наведені в додатку дисертації.

Особистий внесок здобувача полягає в розв'язанні наукової задачі створення нових систем АЕП, в яких збудження АМ здійснюється енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням. Це дає змогу забезпечити коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 1$ при регулюванні швидкості вище і нижче синхронної. В роботах, написаних у співавторстві, особистий вклад полягає в:

У роботі [1] – запропоновано схему асинхронного електроприводу, проведено експериментальні дослідження в системі.

У роботі [2] – проведено дослідження методом математичного моделювання та фізичних експериментів.

У роботі [3] – запропоновано систему керування асинхронним електроприводом, що дозволяє формувати бажані механічні характеристики.

У роботі [6] – аналітично проведено розрахунки обмежень, які накладаються на роботу схеми, проведено дослідження процесів у системі методом математичного моделювання.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи, основні положення та висновки доповідалися та обговорювалися на XV та XVI міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика" (смт. Миколаївка, 2008 та м. Алушта, 2009), 6-й Міжнародній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці" (м. Львів, 2009), I Міжнародній конференції молодих вчених "Енергетика та системи керування 2009" (EPECS-2009) (м. Львів, 2009), на науковому семінарі НАН України "Моделі і методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем" (м. Львів, 2009), наукових семінарах кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету "Львівська політехніка".

Публікації. Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковані у 6-ти друкованих наукових працях, з них 5 у фахових виданнях, затверджених ВАК України. 2 праці написані без співавторів.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 113 найменувань і 3 додатків. Загальний обсяг дисертації – 179 сторінок, в тому числі 138 сторінок основного тексту, 108 ілюстрацій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність роботи, наукову новизну та практичну цінність роботи; показано зв'язок теми дисертації з напрямками науково-дослідних робіт кафедри; сформульовано мету роботи та задачі, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети.

У *першому розділі* розглянуто сучасні системи векторного керування асинхронними електроприводами (АЕП).

Проведено аналіз схем векторного керування АМФР при її підключенні за схемою МПЖ (рис. 1). Майже всі сучасні підходи пропонують використовувати алгоритми векторного керування при такому підключенні АМ. Однією з переваг такої схеми є можливість регулювання коефіцієнту потужності статора, зокрема і забезпечення $\cos \varphi = 1$.

Векторні діаграми рис. 2, які нарисовані за умови нехтування втратами в сталі, пояснюють ідею забезпечення $\cos \varphi = 1$ через компенсацію поля статора.

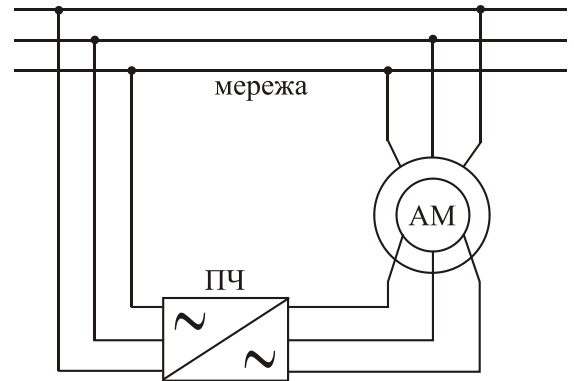


Рис. 1. Машина подвійного живлення

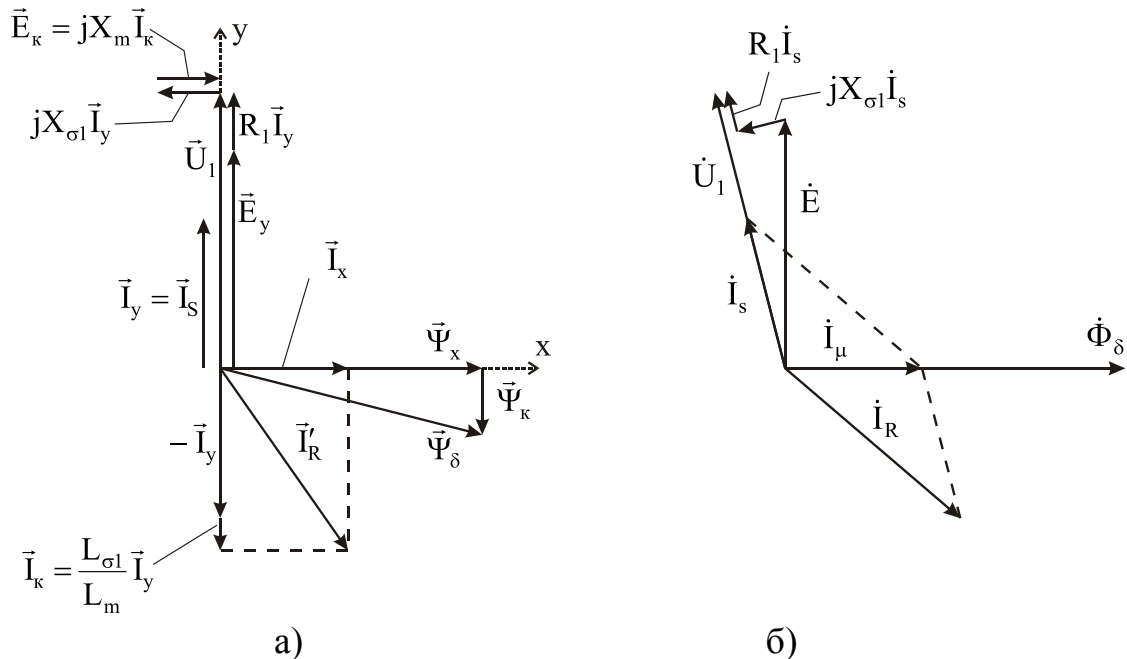


Рис. 2. Векторні діаграми АМФР при компенсації поля статора: просторова (а) і комплексна (б)

На просторовій векторній діаграмі (рис. 2.а) АМ представлено в обертовій системі координат x, y , вісь ординат y якої співпадає з зображуючим вектором напруги живлення статора, а вісь абсцис x – перпендикулярна до цього вектора (рис. 3).

Магнітний потік визначається струмом намагнічення I_μ , який є векторною сумою струмів статора I_s і ротора I_R . Струм ротора формуємо так, щоб його складова

за віссю y створювала такий магнітний потік Ψ_k , щоб е.р.с. E_k , створена цим потоком, компенсувала реактивну складову е.р.с. в статорі $jX_{\sigma 1} I_s$; складова струму ротора за віссю x I_x створює потік Ψ_x . В такому випадку АМ набуває властивостей скомпенсованої машини постійного струму незалежного збудження з можливістю незалежного регулювання потоку і моменту та забезпеченням коефіцієнту потужності статора рівним 1.

Перспективними є також схеми з АМФР, що дозволяють використовувати потужність ковзання, підвищуючи таким чином енергетичну ефективність схеми. Відомими є схеми, що дозволяють передавати потужність ковзання до мережі (каскад Шербіуса), або на вал АМ (каскад Кремера).

Приймаючи до уваги наведені міркування, сформульовано завдання дослідження – створення системи з АМФР, що використовує для своєї роботи потужність ковзання.

У *другому розділі* описано використаний спосіб векторного керування АМФР, що забезпечує описаний у попередньому розділі принцип керування з компенсацією поля статора. Аналітично пояснено можливість збудження асинхронної машини енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, показано обмеження, що накладаються на роботу схеми, та запропоновано нову систему керування, що дозволяє безпосередньо формувати необхідні механічні характеристики системи.

Відомі роботи, де було застосовано описаний вище принцип керування, і де інвертор напруги (ІН) функціонував в режимі джерела струму, який компенсував поле статора і збуджував машину зі сторони ротора. Таке функціонування інвертора забезпечувалось використанням джерела напруги живлення інвертора і відповідного алгоритму керування.

У даній роботі запропоновано нову схему (рис. 4), де замість джерела напруги на вході ІН поставлено паралельно з'єднані резистор R і конденсатор C .

Принцип роботи цієї схеми є наступним. Енергія електричного поля на конденсаторі

$$w_C = \frac{C u_C^2}{2} \quad (1)$$

Напруга конденсатора, виражена через струм на активному опорі R , дорівнює:

$$u_C = R \cdot i_R \quad (2)$$

Підставивши (2) в (1), після перетворення отримаємо:

$$w_C = \tau \frac{P_R}{2}, \quad (3)$$

де $\tau = R \cdot C$ – стала часу RC-контурі, $P_R = R \cdot i_R^2$ – потужність на опорі R .

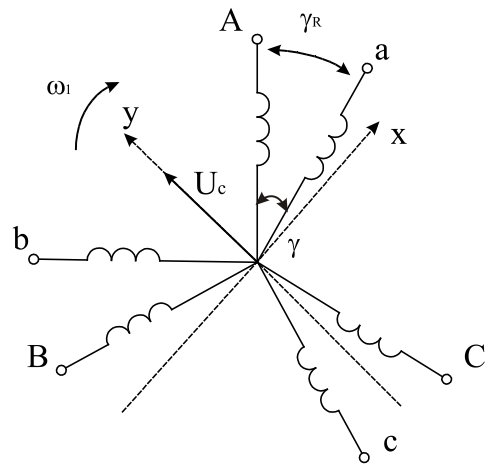


Рис. 3. Система координат (x, y)

На основі балансу потужностей електромагнітна потужність дорівнює сумі потужності на валу і втрат в колах ротора:

$$M\omega_0 = M\omega + 3R'_2 J_2'^2 + P_R. \quad (4)$$

Виразивши з (4) значення потужності на опорі та підставивши його в (3), отримаємо:

$$W_C = \frac{\tau}{2} (M\omega_0 s - 3R'_2 J_2'^2), \quad (5)$$

де $M\omega_0 s$ – потужність ковзання. Таким чином, енергія конденсатора є функцією потужності ковзання.

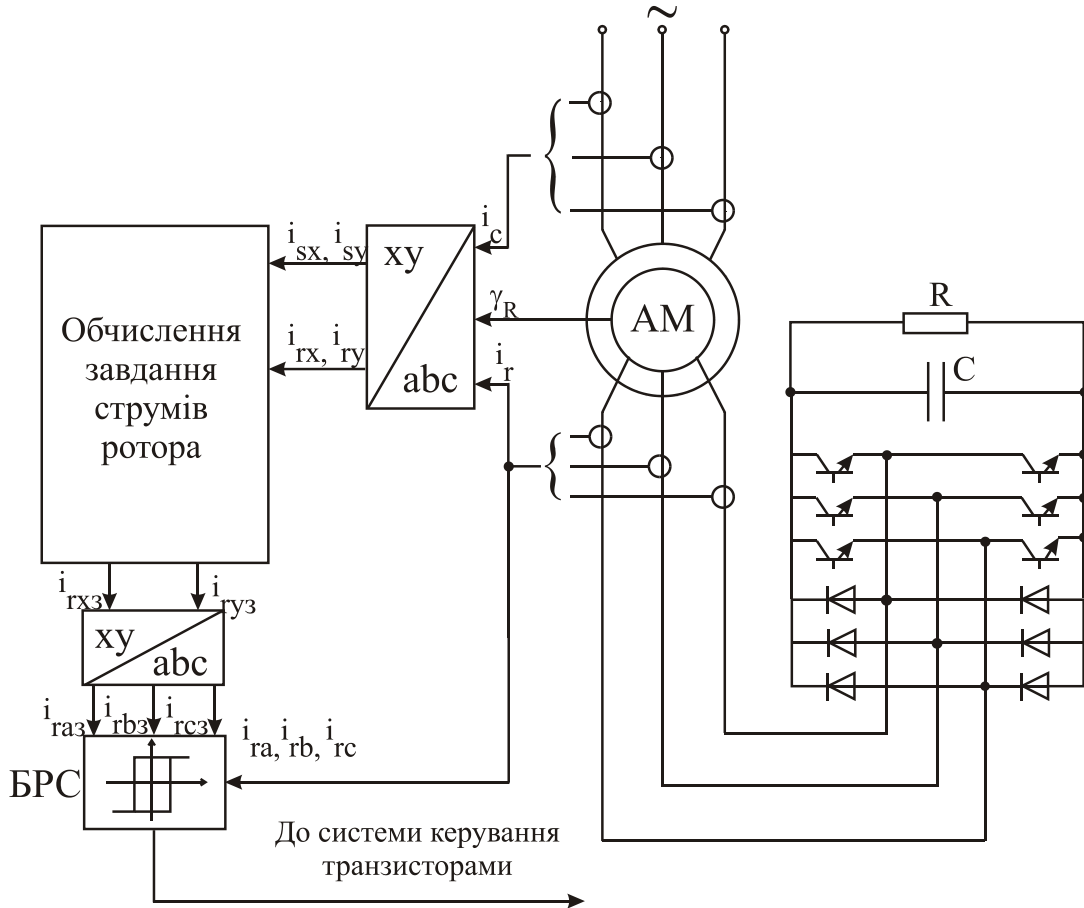


Рис. 4. Схема збудження АМФР енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням

В усталеному режимі для першої гармоніки при симетричному трифазному живленні, енергія магнітного поля машини

$$W_L = \frac{3}{2} (L_{\sigma 1} I_s^2 + L_m I_\mu^2 + L'_{\sigma 2} J_2'^2). \quad (6)$$

Зауважимо, що енергія магнітного поля може бути виражена через модулі зображуючи векторів струмів статора, намагнічення і ротора, які треба підставити замість ефективних значень цих струмів, відповідно. Тобто, енергія магнітного поля може визначатись на основі миттєвих значень струмів машини.

Для намагнічення машини енергія електричного поля конденсатора повинна бути не меншою від необхідної енергії магнітного поля:

$$W_L \leq W_C. \quad (7)$$

З (7) можна визначити необхідне τ для створення магнітного поля машини:

$$\tau \geq \frac{3(L_{\sigma 1} I_s^2 + L_m I_\mu^2 + L'_{\sigma 2} J_2'^2)}{M\omega_0 s - 3R_2' I_2'^2}. \quad (8)$$

За отриманими аналітичними залежностями розраховано величину зони обмеження, де енергія електричного поля є нижчою від енергії магнітного поля, необхідної для виконання задач керування (компенсації реакції статора і роботи з заданим $\cos \varphi$), а також встановлено, як впливають на величину цієї зони параметри схеми – АМ і кола на вході ІН – рис. 5.

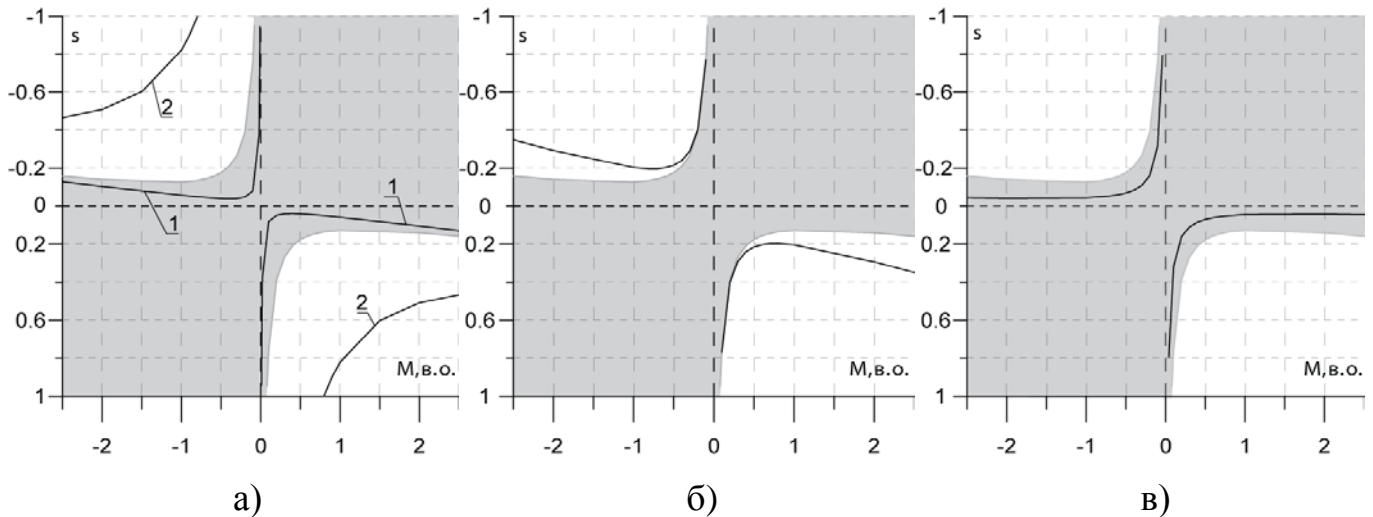


Рис. 5. Зона обмеження електроприводу при $\tau = 1$, $k_{пр} = 9$ (зафарбовано сірим), її межі при інших параметрах: а) при $\tau = 10$ (1) і при $\tau = 0,1$ (2); б) при збільшенні опору кола ротора; в) при $k_{пр} = 2$

Для дослідження вибрано асинхронну машину mSZUe 24a виробництва TAMEL, паспортні дані якої: $P_n = 0,8$ кВт, $n_n = 1390$ об/хв, $U_n = 380$ В, $I_n = 3,5/2,0$ А, $U_{гн} = 31$ В, $I_{гн} = 18$ А, $\cos \varphi = 0,78$. Параметри машини: активні опори обмоток $R_s = 6,97454$ Ом, $R_r = 0,132211$ Ом, індуктивності розсіювання $L_{\sigma s} = 0,037266$ Гн, $L_{\sigma r} = 0,037266$ Гн, індуктивність намагнічення $L_\mu = 0,454736$ Гн, момент інерції $J = 0,05$ кг·м², коефіцієнт приведення обмотки ротора до статора $k_{пр} = 9$. Сталу часу RC-ланки на вході інвертора напруги вибираємо рівною 1. Зону обмеження для цього випадку замальовано сірим кольором. Також на рисунках позначено межі зони обмеження при параметрах АЕП, відмінних від описаних.

Для керування запропонованим АЕП було використано систему підпорядкованого регулювання (СПР) з регуляторами швидкості та моменту, що використовувалась для керування МПЖ, однак при високих ковзаннях визначення моменту у даному алгоритмі відбувалось з похибкою, тому було запропоновано нову систему керування з безпосереднім формуванням механічних характеристик (рис. 6).

Ідея побудови такої системи керування полягає в наступному.

При використанні описаного вище алгоритму керування з компенсацією поля статора, $\Psi_y = 0$, у цьому випадку вираз для електромагнітного моменту записується:

$$M = \frac{3}{2} p_0 \Psi_x i_{sy}. \quad (9)$$

Оскільки Ψ_x при незмінній напрузі живлення залишається постійним, то складова струму статора i_{sy} визначає величину електромагнітного моменту АМ. Таким чином, залежність i_{sy} від швидкості задає механічну характеристику.

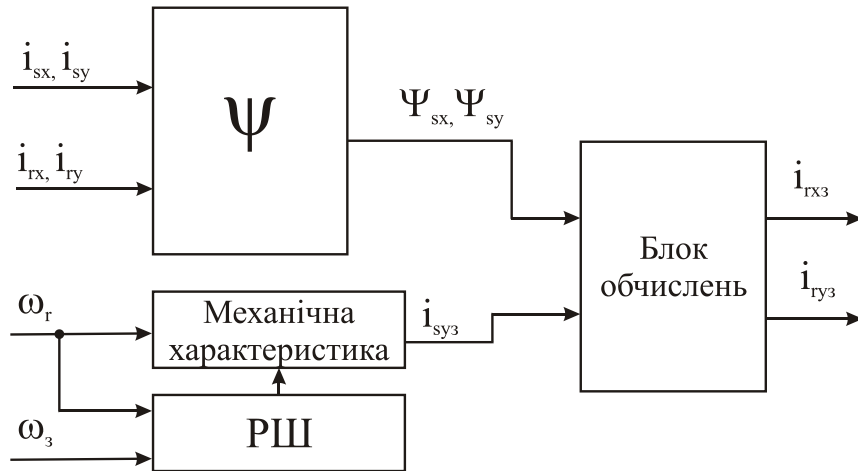


Рис. 6. Система безпосереднього формування механічних характеристик АЕП

У *третьому розділі* описано створену експериментальну установку, технічну реалізацію системи керування, алгоритм і програму керування, а також наведені результати експериментальних досліджень.

Структурну схему експериментальної установки наведено на рис. 7.

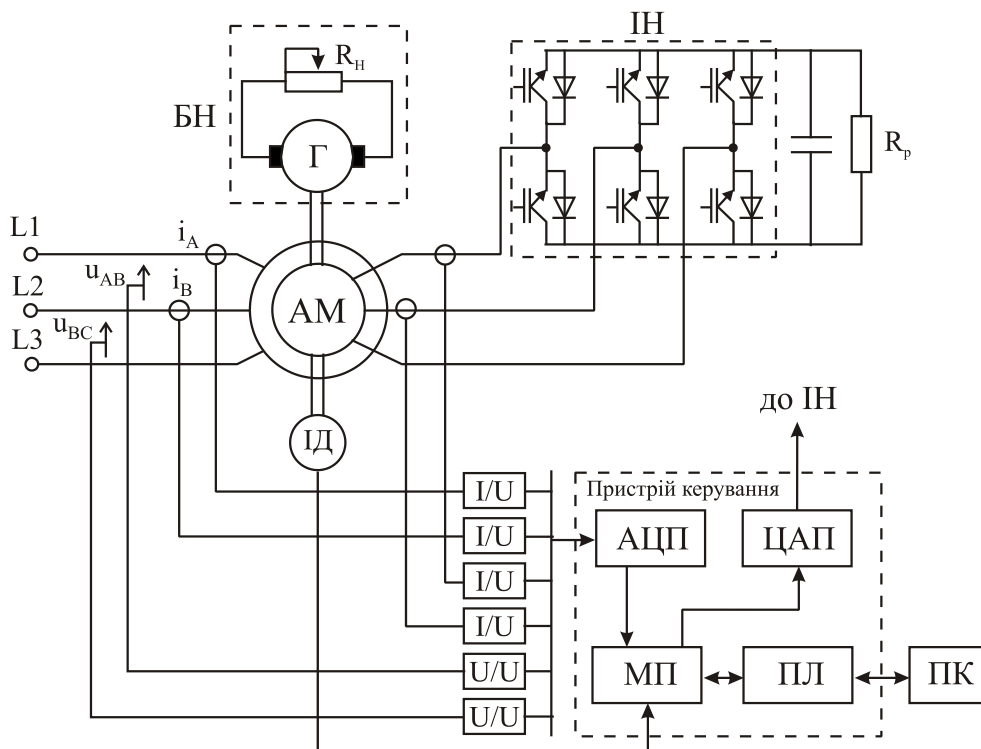


Рис. 7. Структурна схема експериментальної установки

Основним її елементом є АМФР TAMEL mSZUe 24a, паспортні дані якої наведено вище. Живлення статора АМ здійснюється від трифазної мережі L1, L2, L3. Навантаження на валу АМ формує генератор постійного струму, обмотка якоря якого замкнена на реостат R_H . В коло ротора АМ ввімкнено автономний інвертор напруги (ІН), реалізований на силовому модулі Mitsubishi PM25RSB120 з IGBT-

транзисторами, на вхід якого підключено конденсатор C і резистор R_p . Завданням ІН є сформувати необхідні струми в роторі АМ.

Пристрій керування реалізовано на основі мікропроцесора МП, пристрою програмованої логіки ПЛ, та карт ЦАП-АЦП, що забезпечують зв'язок пристрою з фізичним обладнанням.

Ядром пристрою керування є сигнальний процесор Analog Devices ADSP-21065L, характеристики якого (тактова частота 60 МГц, швидкодія 66 мільйонів операцій за секунду, внутрішня пам'ять – 544 Кбайт, час такту – 16,67 нс) дозволяють забезпечити виконання закладеного алгоритму керування з необхідною швидкістю.

Для обслуговування АЦП з мультиплексором та інкрементального датчика ІД використовується пристрій програмованої логіки ПЛ серії Altera EPF6016. Для генерування сигналів переривання для мікропроцесора використовується внутрішній таймер ПЛ.

Використані перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга забезпечують гальванічне розмежування сигналів у силовому колі та у колі керування. Інкрементальний енкадер – датчик положення ротора ІД формує на виході три імпульсні сигнали. Два сигнали, зсунуті один відносно одного на кут 90° , частота яких пропорційна швидкості обертання, використовуються для визначення напрямку обертання. Ще один імпульсний сигнал, що подається з частотою один імпульс на один оберт ротора, використовується для визначення точки відліку. На виході ІД за один оберт ротора АМ формується 2500 імпульсів.

Для перевірки теоретичних міркувань можливості роботи описаної вище системи, а також для перевірки адекватності математичної моделі проведено експериментальні дослідження на описаній установці. Дослід проводився наступним чином: спочатку на статор машини подавалась напруга і машина починала розганятись (рис. 8).

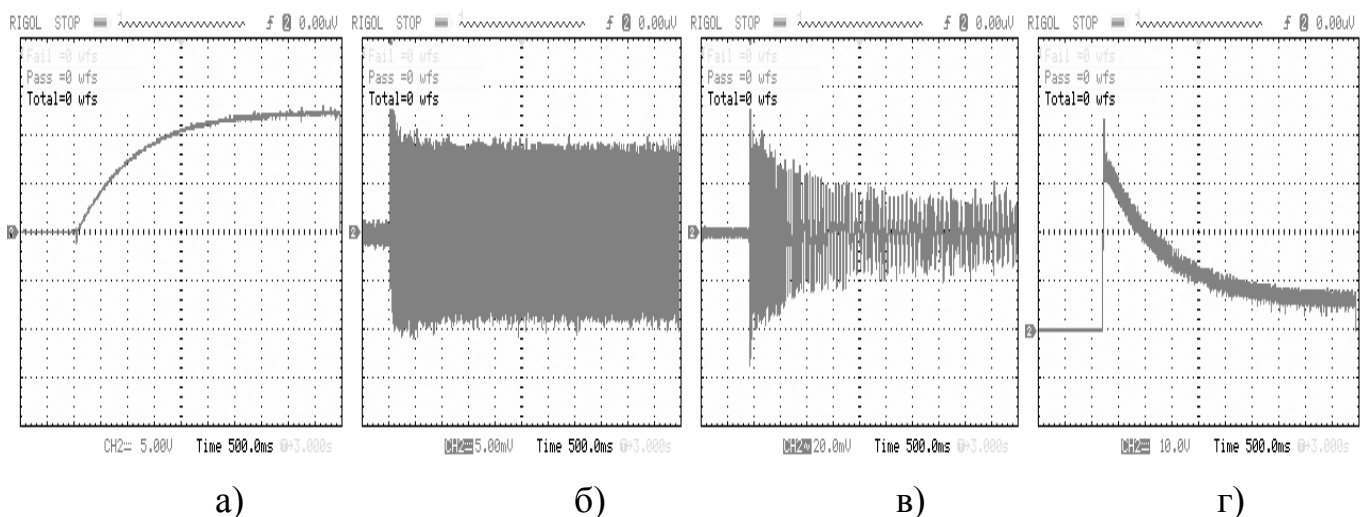


Рис. 8. Експериментально зняті осцилограми швидкості (а), струмів статора (б) і ротора (в), напруги на конденсаторі (г) для процесу запуску АМ

Після виходу на усталений режим вмикався перетворювач, струми ротора починали формуватись відповідно до закладеного алгоритму і відбувався перехід

системи до усталеного режиму, що визначався закладеною в систему керування характеристикою.

Перевірялась можливість в усталеному режимі забезпечення роботи з одиничним коефіцієнтом потужності при регулюванні швидкості (рис. 9).

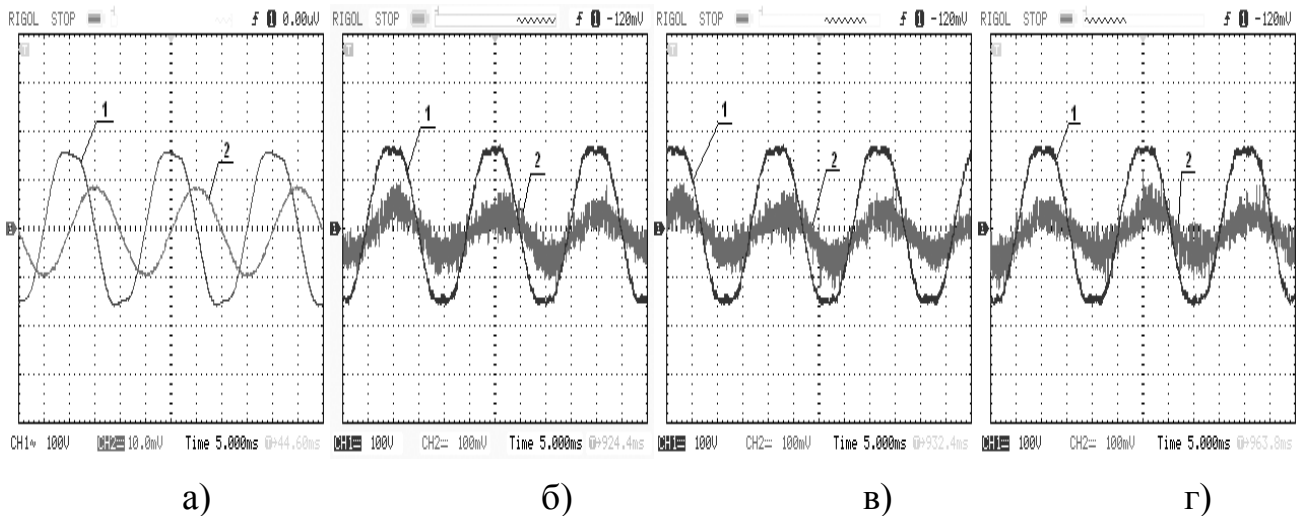


Рис. 9. Осцилограми фазної напруги (1) і струму (2) статора для усталеного режиму: а) при розімкненому роторі; при СПР, на швидкостях: б) 50 с^{-1} ; в) 120 с^{-1} ; г) для системи безпосереднього формування механічних характеристик

При розімкненому роторі зсув фаз між струмом та напругою складає 90° (струм носить чисто реактивний характер). В робочих режимах при різних стратегіях керування в усталеному режимі зсув фаз є рівним нулю.

У четвертому розділі описано математичну модель АЕП зі збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, створену з використанням методу середньокрокових напруг другого порядку, запропонованим проф. О.Г. Плахтиною.

Для вітки багатополюсника, що складається з послідовно з'єднаних ідеальних джерела напруги, активного опору, конденсатора і обмотки індуктивності рівновага електричного кола описується рівнянням:

$$u + e - u_R - u_C - u_L = 0, \quad (10)$$

де u , e , u_R , u_C , u_L – миттєві значення напруги між вузлами, е.р.с., напруги на активному опорі, ідеальному конденсаторі та ідеальній обмотці, відповідно.

Згідно з використаним методом, при допущенні, що струм на кроці інтегрування змінюється як поліном 2-го степеня, рівняння (10) розписується як:

$$U + E - u_{R0} - u_{C0} + \left(\frac{R}{3} - \frac{5\Delta t}{12C} + \frac{L_0}{\Delta t} \right) i_0 - \left(\frac{R\Delta t}{6} + \frac{\Delta t^2}{12C} \right) \frac{di_0}{dt} - \left(\frac{R}{3} + \frac{\Delta t}{12C} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) i_1 = 0. \quad (11)$$

де $U = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u \cdot dt$, $E = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} e \cdot dt$ – середні крокові напруга між вузлами і е.р.с.

відповідно; u_{R0} , u_{C0} – значення напруг в точці $t = t_0$ (на початку кроку); i_0 , i_1 , L_0 , L_1 –

значення струму та індуктивності на початку і в кінці кроку; R, C – активний опір та ємність конденсатора.

Згідно з обраними принципами математичного моделювання ЕМВС електричні схеми кожного з елементів розглядаються як багатополюсники, а електрична схема системи в цілому є з'єднанням тим чи іншим способом цих багатополюсників.

Для методу середніх крокових напруг вузлове векторне рівняння для електричного багатополюсника матиме вигляд:

$$\vec{i}_{e(t_0+\Delta t)} + \check{G}_{ke} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \vec{\varphi}_e dt + \vec{C}_{ke} = 0. \quad (12)$$

де $\vec{i}_e = (i_1, \dots, i_n)_t$, $\vec{\varphi}_e = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)_t$ – вектори струмів зовнішніх віток і потенціалів зовнішніх полюсів багатополюсника; $\vec{i}_{e(t_0+\Delta t)}$ – значення вектору струмів зовнішніх віток на кінці кроку; \check{G}_{ke} та \vec{C}_{ke} – відповідно матриця розмірності $(n \times n)$ і вектор розмірності n , елементи яких визначаються параметрами структурного елемента (n – кількість полюсів багатополюсника).

Зв'язок між вектором потенціалів зовнішніх полюсів електричного багатополюсника та вектором потенціалів зовнішніх вузлів ЕМВС для методу середньокрокових напруг описується рівнянням

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \vec{\varphi}_{ej} dt = \check{\Pi}_j^T \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \vec{\varphi}_c dt, \quad (j = 1, \dots, m) \quad (13)$$

де m – кількість структурних елементів, які входять в ЕМВС, $\vec{\varphi}_c = (\varphi_{c1}, \dots, \varphi_{ck})_t$ – вектор потенціалів незалежних вузлів системи; $\check{\Pi}_j$ – матриця, що визначає спосіб під'єднання j -го структурного елемента в системі.

Вектор інтегралів потенціалів незалежних вузлів системи знаходиться шляхом розв'язку векторного рівняння

$$\check{G}_{kc} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \vec{\varphi}_c dt + \vec{C}_{kc} = 0, \quad (14)$$

де \check{G}_{kc} та \vec{C}_{kc} – відповідно матриця і вектор векторного вузлового рівняння, які визначаються так:

$$\check{G}_{kc} = \sum_{j=1}^m \check{\Pi}_j \check{G}_{kej} \check{\Pi}_j^T; \quad \vec{C}_{kc} = \sum_{j=1}^m \check{\Pi}_j \vec{C}_{kej}, \quad (15)$$

де \check{G}_{kej} та \vec{C}_{kej} – коефіцієнти зовнішнього вузлового векторного рівняння виду (12) для j -го структурного елемента.

Після розв'язку рівняння (14) відносно вектора інтегралів потенціалів незалежних вузлів системи з рівняння (13) знаходимо вектор інтегралів потенціалів зовнішніх вузлів структурного елемента. Знайшовши цей вектор з рівняння (12), знаходимо вектор струмів зовнішніх віток для даного структурного елемента. За цим вектором, а також вектором інтегралів потенціалів зовнішніх вузлів можуть бути за необхідності розраховані також значення інших змінних.

Для перевірки переваг застосування вибраного методу перед методом Рунге-Кутта 2-го порядку, що застосовувався для розрахунку ЕМВС раніше у відомих роботах, проведено порівняння розрахунку досліду пуску АМ з короткозамкненим ротором з номінальним моментом навантаження двома методами при різних кроках розрахунку. Для розрахунку використано параметри АМ, що використовувалась в експериментальній установці. Параметри цієї АМ наведено вище.

На рис. 10 наведено результати розрахунку перехідних процесів прямого запуску АД при кроці розрахунку 10^{-4} с – 2000 точ./період, які вибрано за еталонні для порівняння. При збільшенні кроку розрахунку (рис. 11) для методу середньокрокових напруг похибка є меншою (результати розрахунку практично співпадають з "еталонними"), а для методу Рунге-Кутта – більшою.

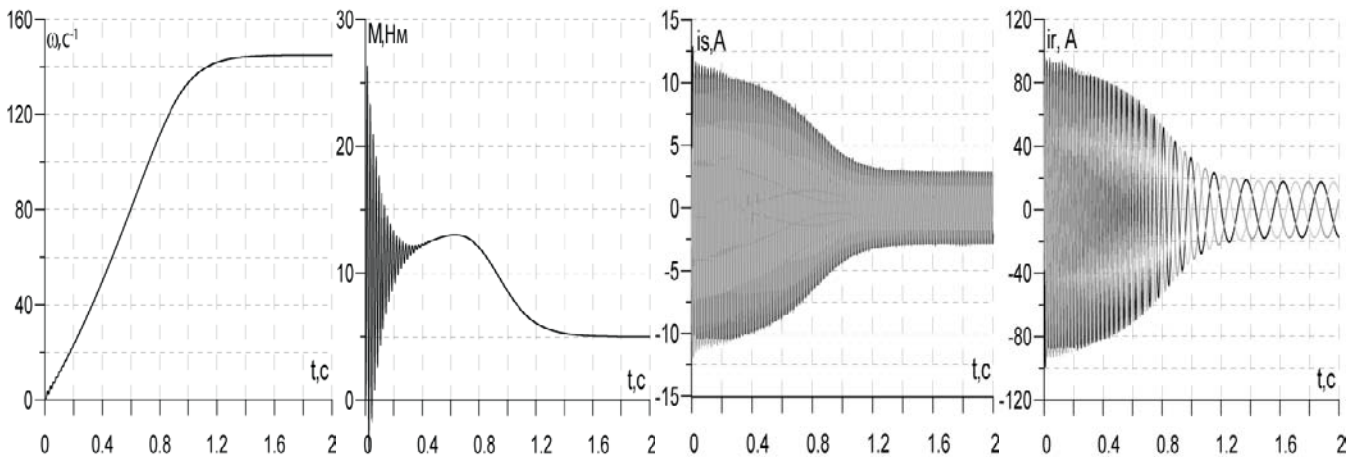


Рис. 10. Розраховані "еталонні" осцилограми для АМ (крок розрахунку 10^{-4} с)

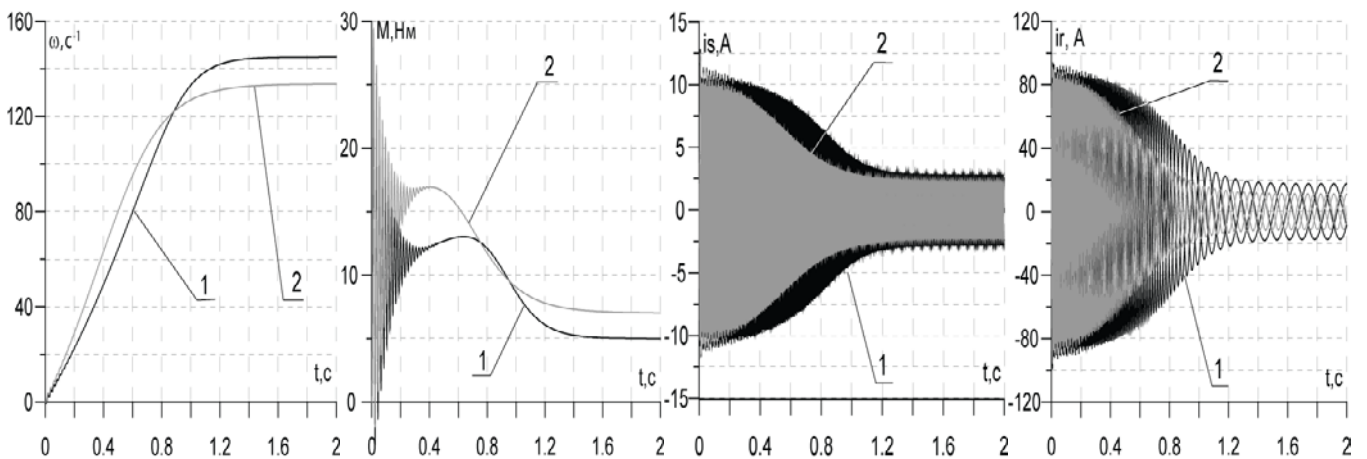


Рис. 11. Осцилограми для кроку $1,5 \times 10^{-3}$ с: 1 – для розрахунку методом середніх крокових напруг, 2 – методом Рунге-Кутта

За результатами порівняння зроблено висновок, що при розрахунку методом середніх крокових напруг в порівнянні з методом Рунге-Кутта можна використати вищий крок для досягнення такої ж точності розрахунку; при одному і тому ж кроці розрахунку метод середніх крокових напруг забезпечує вищу точність розрахунку.

Так, метод Рунге-Кутта стає нестійким при кроці 2×10^{-3} с (100 точ./період), метод середньокрокових напруг – при 2×10^{-2} с (10 точ./період); результати розрахунку суттєво відрізняються від "еталонних": для методу Рунге-Кутта – для

кроку $1,5 \times 10^{-3}$ с (133,3 точ./період), для методу середньокрокових напруг – для кроку 10^{-2} с (20 точ./період).

Для розрахунку за методом середньокрокових напруг модифіковано математичні моделі АМФР, вентильних перетворювачів, інших елементів силової схеми, а також створено модель електроприводу в цілому (рис. 12).

Використання обраного підходу дозволяє представити вентиля перетворювача активним опором, що приймає малі значення у відкритому стані і великі – у закритому (при використанні методу Рунге-Кутта необхідним було введення додаткової штучної індуктивності вентиля).

Згідно з запропонованим доц. А.С. Куциком об'єктно-орієнтованим підходом до створення комп'ютерної моделі, модель складної ЕМВС представляємо як сукупність типових об'єктів, що взаємодіють між собою. Зокрема, це об'єкти-моделі типових структурних елементів, об'єкти-моделі силової схеми, об'єкт-модель системи керування та об'єкт-модель системи в цілому, завданням якого є координація роботи всіх об'єктів у складі моделі.

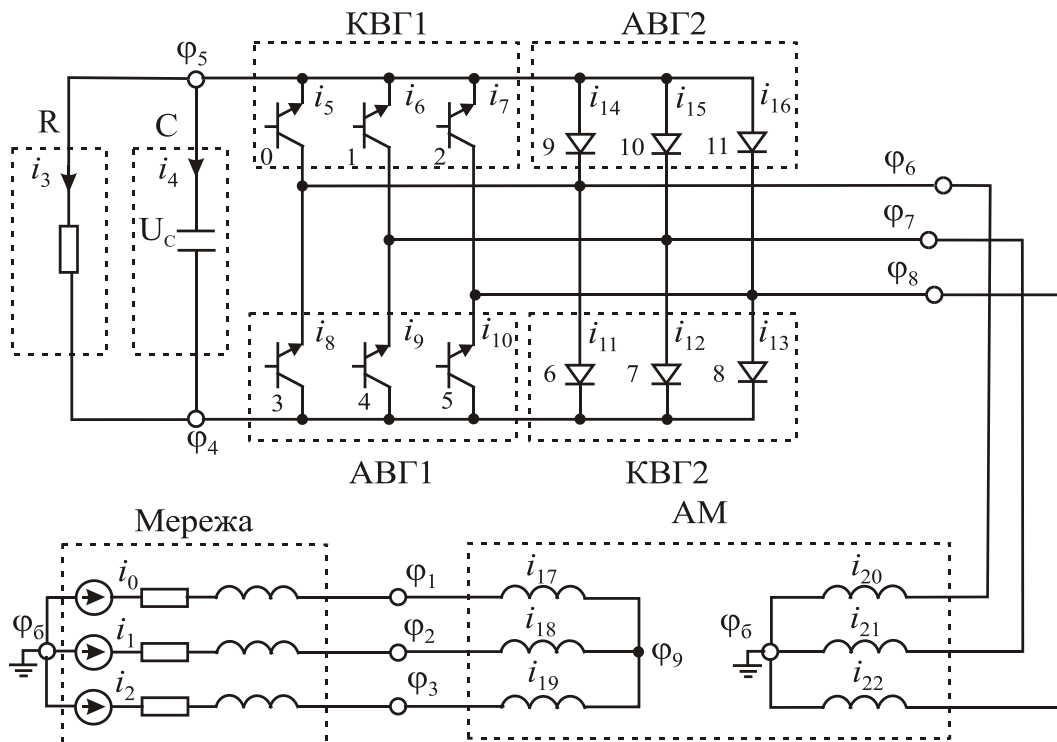


Рис. 12. Розрахункова схема силової частини АЕП

Під час моделювання процесів в АЕП використано параметри АМ, що була використана в експериментальній установці.

У п'ятому розділі перевірено адекватність створеної математичної моделі електроприводу, а також описано результати досліджень процесів у запропонованій системі електроприводу методом математичного моделювання.

Після порівняння результатів математичного моделювання досліду запуску з експериментально отриманими осцилограмами (рис. 13) зроблено висновок про високий рівень адекватності розробленої математичної моделі і про придатність її для дослідження асинхронного електроприводу зі збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням.

Для дослідження можливості виконання у АМФР зі збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, тих самих задач керування, що забезпечувались раніше у відомих роботах введенням додаткової напруги живлення ІН (схема МПЖ), проведено досліди пуску при різних заданих швидкостях, зміни завдання швидкості та зміни моменту навантаження на валу з використанням СПР, яка використовувалась у схемі з МПЖ (рис. 14 – 15).

Дослідження показали, що в запропонованому АЕП можна досягнути виконання тих самих задач керування (регулювання швидкості при забезпеченні $\cos \varphi = 1$), що і при підключенні АМ за схемою МПЖ з відповідними обмеженнями, описаними у другому розділі. При цьому відпадає необхідність у введенні додаткового живлення в коло ротора.

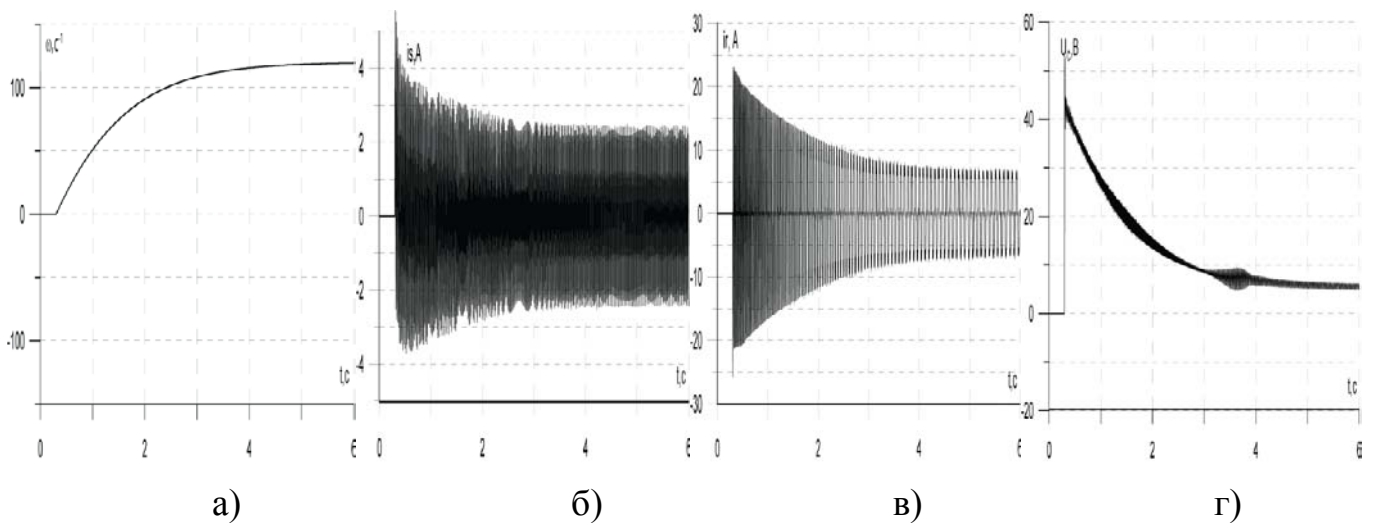


Рис. 13. Розраховані осцилограми швидкості (а), струмів статора (б) і ротора (в), напруги на конденсаторі (г) для процесу запуску АМ

Для досліду пуску (рис. 14) в перший момент часу ковзання має великі значення, потужність ковзання у роторі є великою, конденсатор дуже швидко заряджається. При збільшенні швидкості АД потужність ковзання падає; конденсатор розряджається. Усталене значення напруги на конденсаторі U_c визначається величиною ковзання (рис. 14).

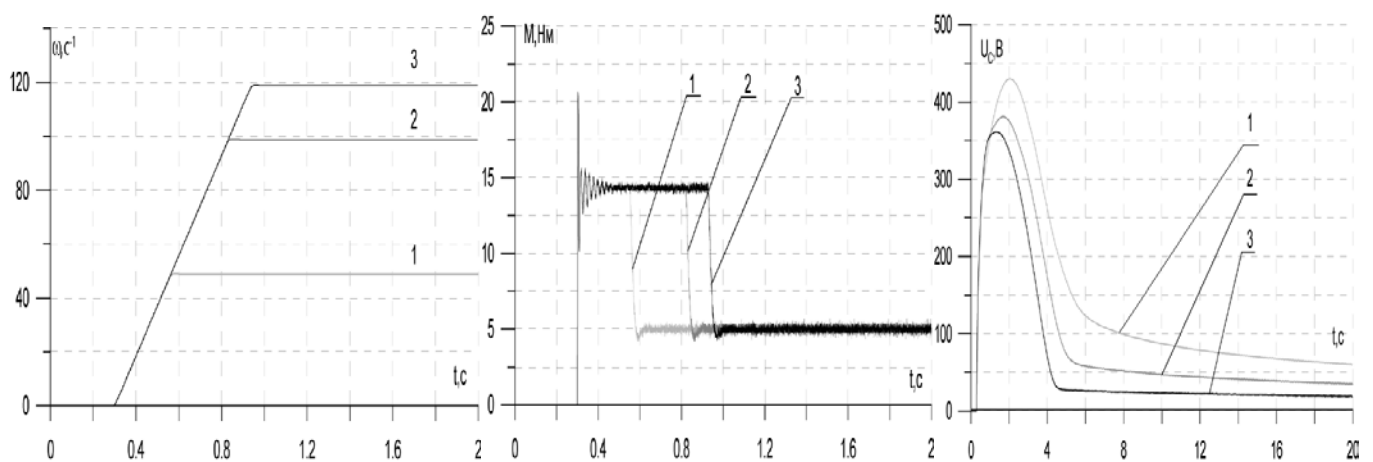


Рис. 14. Дослід пуску при використанні СПР

Результати досліду зміни завдання швидкості дозволили дослідити роботу АЕП в зоні обмеження електроприводу, коли виконання задач керування порушується.

При роботі в усталеному режимі на ділянці механічної характеристики, що належить до зони обмеження, поставлені задачі керування не виконуються, при роботі в перехідному режимі на цій ділянці характеристики системи можуть погіршуватись. Коли зі зменшенням швидкості напруга на конденсаторі досягає рівня, достатнього для виконання задач керування, система повертається до стану з одиничним коефіцієнтом потужності (рис. 15).

Оскільки навантаження для всіх АМФР впливає на величину потужності ковзання, у запропонованій схемі при зменшенні навантаження змінюється потужність у роторі, що використовується даною схемою для її роботи. При малих навантаженнях на валу потужності ковзання стає недостатньо для виконання поставлених задач керування.

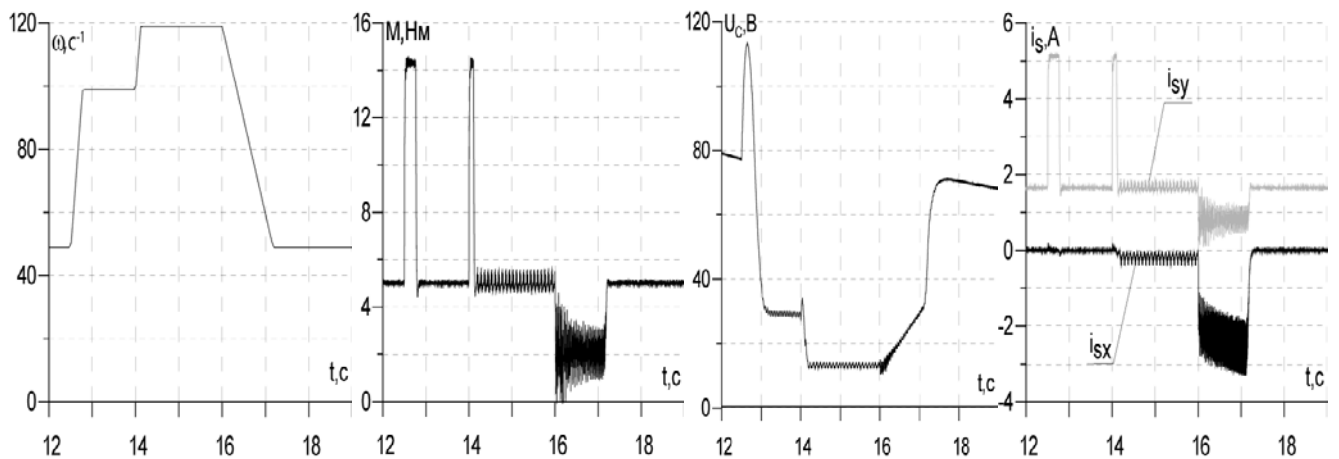


Рис. 15. Дослід зміни завдання швидкості при використанні СПР

Система безпосереднього формування механічних характеристик забезпечує відпрацювання закладених характеристик в статичних режимах. Задача забезпечення одиничного коефіцієнта потужності виконується при використанні запропонованої системи керування у статичних та динамічних режимах (при зміні моменту навантаження та при переході з однієї закладеної характеристики на іншу).

Зміною закладених характеристик можна досягти необхідного регулювання швидкості (рис. 16).

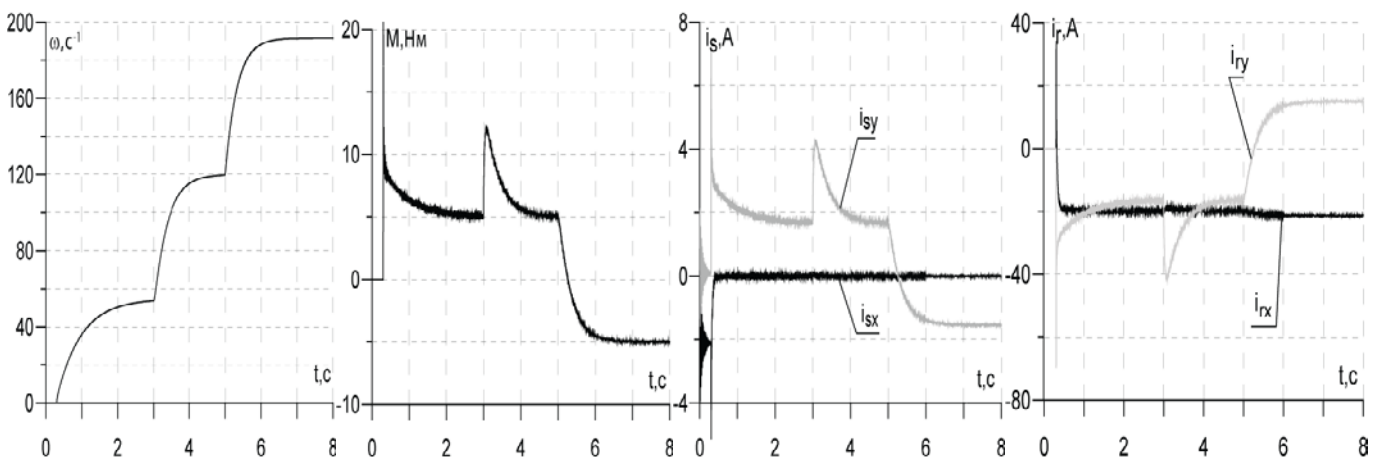


Рис. 16. Пуск, регулювання швидкості, зміна знаку моменту

Таке регулювання швидкості дає широкі можливості формування характеристик в чотирьох квадрантах: при зміні знаку моменту на валу (рис. 16),

зміні напрямку обертання (рис. 17), при гальмуванні (рис. 18), і т. ін. В динамічних режимах, коли за час перебування системи в зоні обмеження потужність на конденсаторі не зменшується до рівня, який не може забезпечити створення необхідного магнітного поля, перехідний процес протікає без погіршення характеристик системи (рис. 16).

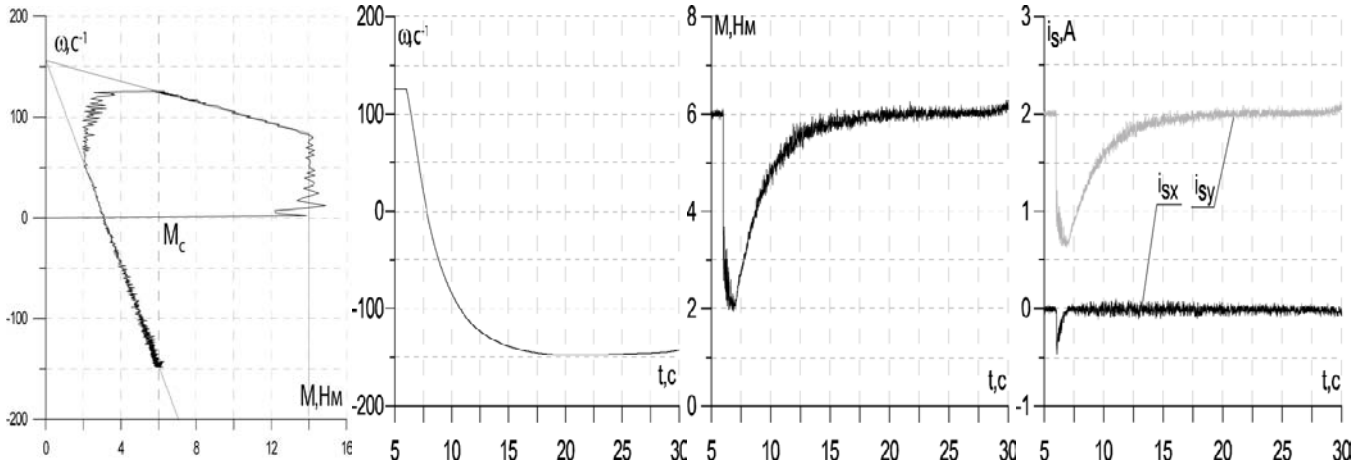


Рис. 17. Зміна закладеної характеристики з переходом в IV квадрант

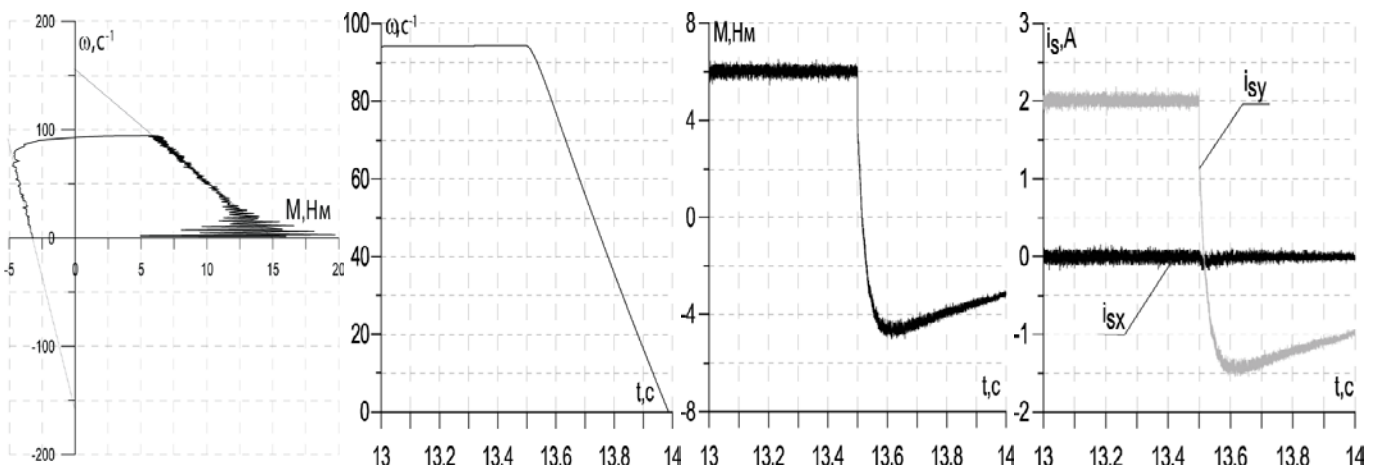


Рис. 18. Гальмування АМ з переходом в II квадрант

Порівняно межі зони обмеження, отримані розрахунком за аналітичними виразами, з розрахованими методом математичного моделювання. На рис. 19 розраховану для даних умов величину зони обмеження зафарбовано сірим кольором, та наведено чотири закладені характеристики, на яких кружечками позначено граничні точки, на яких робота в усталеному режимі неможлива. Чим менша жорсткість, тим більш помітною стає похибка. Її наявність пояснюється тим, що в теоретичних викладках рівняння (6) було записане для першої гармоніки. Однак реалізація

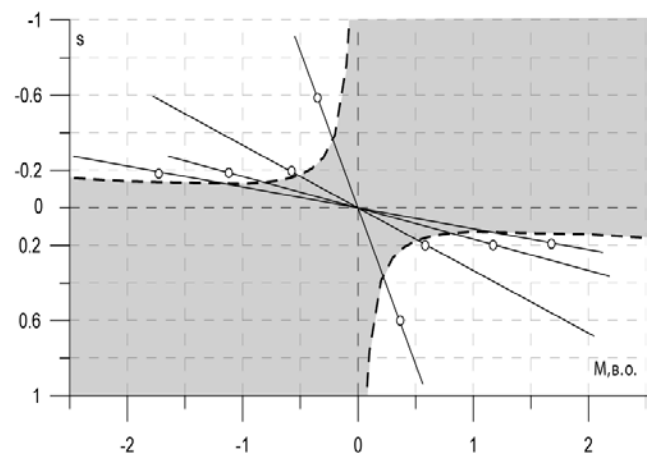


Рис. 19. Зона обмеження електроприводу

алгоритму керування (за допомогою гістерезисних регуляторів) приводить до наявності вищих гармонік струму, які створюють додатковий момент. При навантаженнях, вищих половини номінального, ці відхилення є малими, проте, вони стають помітними при малих моментах навантаження.

У додатках наведено програмну реалізацію алгоритму керування вентилями інвертора напруги, опис методів, що стосуються розрахунку за методом середніх крокових напруг 2-го порядку та текст основної програми програмного комплексу.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована схема електроприводу з інвертором напруги в колі ротора забезпечує виконання поставлених задач керування, а саме:

- забезпечення $\cos \varphi = 1$;
- регулювання швидкості вище і нижче синхронної;
- формування необхідних механічних характеристик;
- робота як в режимі двигуна, так і в режимі генератора.

2. Виконання поставлених задач керування в запропонованій схемі АЕП забезпечується використанням для її роботи енергії конденсатора, яка зумовлена ковзанням.

3. Існує зона обмеження, при якій енергія електричного поля є нижчою від енергії магнітного поля, необхідної для виконання задач керування (компенсації реакції статора і роботи з заданим $\cos \varphi$). Величина цієї зони залежить від параметрів АМ, а також параметрів кола на вході інвертора напруги (значення опору резистора та ємності конденсатора). Зокрема, величина зони обмеження є тим меншою, чим

- більшою є $\tau = R \cdot C$ – стала часу кола на виході інвертора;
- меншим є значення активного опору кола ротора;
- меншим є значення коефіцієнту приведення обмотки ротора до статора.

4. Запропонований спосіб керування запропонованою схемою АЕП забезпечує безпосереднє формування необхідних механічних характеристик без необхідності визначення електромагнітного моменту як в режимі двигуна, так і генератора.

5. Розроблена з використанням методу середньокрокових напруг математична модель запропонованого АЕП дає змогу дослідити електромагнітні та електромеханічні процеси в запропонованій схемі з підвищеною швидкістю та точністю розрахунку.

6. Коректність аналітичних виразів, що пояснюють можливість роботи запропонованої схеми, працездатність запропонованої схеми АЕП зі збудженням електричним полем, створеним потужністю ковзання, а також адекватність створеної математичної моделі підтверджується результатами фізичних експериментів.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Плахтина О.Г.* Експериментальні дослідження статичних характеристик в асинхронному електроприводі зі збудженням енергією ковзання / О.Г. Плахтина,

А.С. Куцик, О.О. Кузнецов // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – Львів, 2008. – № 615. – С. 111–115.

2. *Плахтина О.Г.* Асинхронна машина зі збудженням від потужності ковзання / О.Г. Плахтина, А.С. Куцик, О.О. Кузнецов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 30. – С. 217–218.

3. *Плахтина О.Г.* Формування механічних характеристик в асинхронному електроприводі зі збудженням потужністю ковзання / О.Г. Плахтина, О.О. Кузнецов // Тем. вип. "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" наук.-техн. журн. "ЕЛЕКТРОІНФОРМ". – Львів, ЕКОінформ, 2009. – С. 151–152.

4. *Кузнецов О.О.* Математична модель асинхронного електроприводу зі збудженням потужністю ковзання / О.О. Кузнецов // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи” – Львів, 2009. – № 653. – С. 109 – 113.

5. *Кузнецов О.* Експериментальна установка для дослідження асинхронного електроприводу зі збудженням потужністю ковзання / Олександр Кузнецов // Енергетика та системи керування: Матеріали I Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2009. – Львів: Видавництво НУ "ЛП", 2009. – С. 25–27.

6. *Плахтина О.Г.* Збудження асинхронної машини з фазним ротором енергією конденсатора, зумовленою потужністю ковзання / О.Г. Плахтина, О.О. Кузнецов // Технічна електродинаміка – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2010. – Ч.1 – С. 153 – 158.

АНОТАЦІЯ

Кузнецов О.О. Процеси і характеристики асинхронного електроприводу зі збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2010.

Дисертація присвячена розв’язанню науково-прикладної проблеми створення нових систем АЕП, в яких збудження АМ здійснюється енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, що дає змогу забезпечити коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 1$ у статорі при регулювання швидкості вище і нижче синхронної. Одержані аналітичні вирази, які описують процес електромеханічного перетворення енергії в АМ з компенсованим магнітним полем обмотки статора і збудженням енергією конденсатора, яка зумовлена ковзанням, дали можливість обґрунтувати можливість збудження асинхронної машини від енергії конденсатора, яка зумовлена ковзанням. Запропоновано схему керування асинхронною машиною з фазним ротором, що дозволяє реалізувати таку задачу. Запропоновано систему керування таким електроприводом, що дозволяє безпосередньо формувати механічні характеристики такої системи без необхідності визначення електромагнітного моменту. Створено експериментальну установку, за допомогою якої підтверджено можливість технічної реалізації запропонованої системи електроприводу. Розроблено математичну та

цифрову моделі електроприводу з використанням методу середньокрокових напруг, за допомогою яких проаналізовано процеси в даній схемі. Виконано комплекс досліджень електромеханічних та електромагнітних процесів в розробленій системі асинхронного електроприводу з використанням математичної та фізичної моделей.

Ключові слова: асинхронний електропривод, ковзання, конденсатор в колі ротора, математична модель асинхронного електроприводу, фізична модель.

АННОТАЦИЯ

Кузнецов А.А. Процессы и характеристики асинхронного электропривода с возбуждением энергией конденсатора, которая обусловлена скольжением. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы, Национальный университет "Львовская политехника". – Львов, 2010.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы создания новых систем АЭП, в которых возбуждение АМ производится энергией конденсатора, которая обусловлена скольжением, что дает возможность обеспечить коэффициент мощности в статоре $\cos \varphi = 1$ при регулировании скорости выше и ниже синхронной.

В первом разделе рассмотрено системы векторного управления асинхронной машиной с фазным ротором и сформулировано задание исследования – создание системы с такой машиной, которая использует для работы мощность скольжения.

Во втором разделе описано использованный способ векторного управления асинхронной машиной с фазным ротором, аналитически показана возможность возбуждения асинхронной машины энергией конденсатора, которая обусловлена скольжением. Предложено схему электропривода, который обеспечивает такую возможность. Предложено систему управления таким электроприводом, который позволяет непосредственно формировать необходимые механические характеристики системы без использования расчета электромагнитного момента.

В третьем разделе описано экспериментальную установку – физическую модель такого электропривода, рассмотрено техническую реализацию системы управления, а также описано алгоритм и программу управления. Приведено результаты исследований на экспериментальной установке, которые подтвердили теоретические обоснования, приведенные во втором разделе, а также подтвердили возможность технической реализации предложенной системы электропривода.

В четвертом разделе описан метод средних шаговых напряжений, который был использован для создания математических моделей элементов электропривода – асинхронной машины с фазным ротором, вентильных преобразователей, других элементов силовой схемы, а также модели системы в целом. Проведено сравнение результатов расчета пуска асинхронной машины с использованием метода Рунге-Кутты и метода средних шаговых напряжений, которые позволили сделать вывод о более высоком быстродействии и точности метода средних шаговых напряжений.

В пятом разделе описано результаты исследований электромеханических и электромагнитных процессов в предложенной системе электропривода, проведенных методом математического моделирования.

В выводах отмечено, что научные исследования предложенной системы электропривода, проведенные путем математического моделирования и физического эксперимента, подтвердили основные научные положения диссертации.

В приложениях приведено программную реализацию алгоритма управления вентилями инвертора напряжения, описание методов, которые относятся к расчету по методу средних шаговых напряжений 2-го порядка, а также текст основной программы программного комплекса.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, скольжение, конденсатор в цепи ротора, математическая модель асинхронного электропривода, физическая модель.

ABSTRACT

Kuznyetsov O.O. Induction drive excited by slip caused capacitor energy processes and characteristics. – Manuscript.

The thesis is presented for Ph. D. degree by the specialty 05.09.03 – Electric engineering complexes and systems. Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2010.

The work is devoted to solution of scientific and applied problem constructing a new induction electric drive systems, in which induction machine excitation is produced with slip caused capacitor energy, that provides $\cos \varphi = 1$ in stator. Analytical equations obtained that describe electromechanical energy conversion process in induction machine with compensated stator winding magnetic field with slip caused capacitor energy excitation made possible to prove the possibility of induction machine with capacitor caused by slip excitation. Wound rotor induction machine control scheme that realizes such task has been offered. Control system for such electric drive that makes possible to form immediately the mechanical characteristics of such system without necessity to estimate the electromagnetic torque has been proposed. The experimental installation has been created in order to confirm the possibility of technical realization of the electric drive system offered. Mathematic and digital models of electric drive with the use of middle step voltages method has been developed with the use of which the processes in the scheme has been analyzed. The complex of researches of electromechanical and electromagnetic processes in developed system of induction drive with the use of mathematical and physical models.

Keywords: induction drive, slip, capacitor in rotor circuit, induction drive mathematical model, physical model.