

механіка. – К.: Либідь, 2002. – 390 с. 7. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. Магнитные наноструктуры. – Воронеж: ВГТУ, 2003. – 113 с. 8. Захарія Й.А. Методи прикладної електродинаміки. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 351 с. 9. Пеленський Р.А. Симетрична система рівнянь електродинаміки // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2007. – № 587. – С. 75–80.

УДК 621.3.019:51.001

О.Г.Плахтина, А.С.Куцик, О.О.Кузнєцов  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ЕНЕРГІЄЮ КОВЗАННЯ

О Плахтина О.Г., Куцик А.С., Кузнєцов О.О., 2008

**Проаналізовано роботу асинхронного електропривода зі збудженням від енергії ковзання. Модифіковано алгоритм керування машиною подвійного живлення. Наведено результати експериментальних досліджень.**

**Functioning of induction electric drive with slip energy exciting has been analyzed. Doubly fed machine's control algorithm has been improved. Results of experimental investigations are described.**

**Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень.** Електромеханічні системи на основі машин подвійного живлення (МПЖ) набувають все більшого застосування у енергетиці та промисловості через низькі капітальні затрати, що пояснюється меншою потужністю перетворювача частоти в колі ротора у разі обмеженого діапазону регулювання швидкості, можливістю незалежного регулювання моменту і коефіцієнта потужності статора.

Запропоновано\* систему керування асинхронною машиною (АМ) з фазним ротором на основі схеми МПЖ, що передбачає векторне керування напругою ротора. До того ж забезпечується можливість регулювання швидкості АМ як нижче, так і вище від синхронної та робота АМ з одиничним коефіцієнтом потужності. Перевагами цього алгоритму є його простота та інваріантність до частоти напруги статора. Крім того, у цій схемі є можливість використання енергії ковзання для виконання задач керування. Однак, ці особливості схеми вимагають додаткових досліджень, які є предметом статті.

**Теоретичні засади збудження асинхронної машини енергією ковзання.** Електрична потужність, що підводиться до двигуна з мережі, перетворюється в механічну, що відбирається з вала машини. Це перетворення супроводжується втратами.

До двигуна підводиться з мережі електрична потужність

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

яка частково іде на покриття втрат в обмотці статора  $P_{ст}$ , а решта – електромагнітна потужність  $P_{ем}$  – передається в ротор. Частина електромеханічної потужності – енергія ковзання  $P_s = s P_{ем}$  – витрачається на нагрівання міді обмоток ротора, а решта перетворюється в повну механічну

---

\* Плахтина О.Г., Куцик А.С., Йовбак В.Д. Електромагнітні та електромеханічні процеси асинхронної машини з інвертором напруги в колі ротора при векторному керуванні // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 30–36

потужність двигуна  $P_m$ . Корисна механічна потужність на валу  $P_2$  отримується, віднімаючи від повної механічної потужності  $P_m$  механічних  $P_{мх}$  і додаткових  $P_d$  втрат.

Нехай в роторне коло АМ з фазним ротором ввімкнено перетворювач за схемою рис. 1. Тоді потужність ковзання, яка виділяється в роторі, може передаватись через діодний випрямляч до конденсатора і заряджати його.

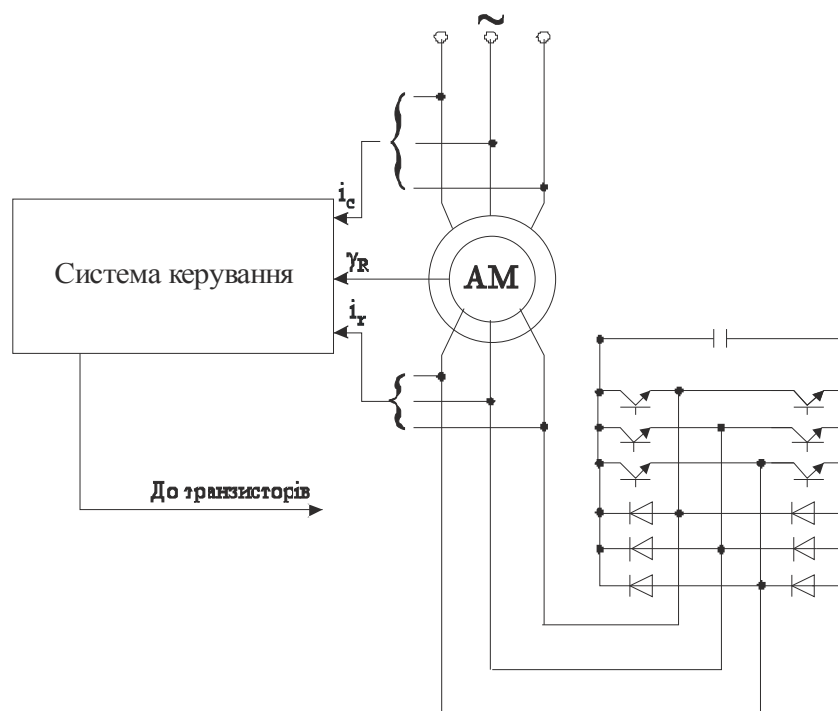


Рис. 1. Структурна схема асинхронного електропривода зі збудженням енергією ковзання

У систему керування транзисторами можна закласти, зокрема, векторний спосіб керування напругою ротора АМ, запропонований в роботі О.Г. Плахтина, А.С. Куцик, В.Д. Йовбак (див. с. 111). У цій схемі вимірюються струми та напруги фаз статора, струми ротора та кут повороту ротора  $\gamma_R$ . Кутове положення зображувального вектора напруги статора розраховується за вимірними напругами статора з виразів, наведених в роботі О.Г. Плахтина, А.С. Куцик, В.Д. Йовбак (див. с. 111).

Завдання струму ротора визначається на основі потокозчеплень статора АМ в обертовій (x,y) системі координат, зв'язаній з напругою статора,  $\Psi_{sx}$ ,  $\Psi_{sy}$  (що можуть бути вимірні, або розраховані за струмами), а також завдань струмів статора за формулами

$$i_{rx3} = \frac{\Psi_{sx} - (L_m + L_{\sigma s})i_{sx3}}{L_m}, \quad i_{ry3} = \frac{\Psi_{sy} - (L_m + L_{\sigma s})i_{sy3}}{L_m}, \quad (1)$$

де  $i_{sx3}$ ,  $i_{sy3}$  – завдання струму статора за осями x та y;  $L_m$ ,  $L_{\sigma s}$  – робоча індуктивність та індуктивність розсіювання статора.

Струм  $i_{sx3}$  визначається з умови забезпечення заданого значення коефіцієнта потужності статора ( $\text{tg}\phi = \frac{i_{sx3}}{i_{sy3}}$ ). Під час роботи з одиничним коефіцієнтом потужності статора  $i_{sx3} = 0$ .

Струм статора за віссю y визначає величину електромагнітного моменту (активної потужності) асинхронної машини і в системі векторного керування, описаний в роботі О.Г. Плахтина, А.С. Куцик, В.Д. Йовбак (див. с. 111). формується системою автоматичного регулювання швидкості АМ, яка побудована за підпорядкованим принципом і містить зовнішній контур регулювання швидкості та внутрішній контур регулювання моменту зі зворотним зв'язком за розрахованим електромагнітним моментом.

Однак на практиці визначення електромагнітного моменту в системі відбувається з деякою похибкою, причому на низьких швидкостях ця похибка доволі значна. Тому пропонуємо вдосконалити алгоритм керування, використавши лінійну залежність струму статора за віссю  $y$  від швидкості

$$i_{syз} = i_{sy0} - \left( \frac{i_{sy0}}{\omega_0} \right) \omega, \quad (2)$$

де  $i_{sy0}$  – значення струму за віссю  $y$  за синхронної швидкості обертання,  $\omega_0$  – значення синхронної швидкості,  $\omega$  – дійсна швидкість обертання ротора АМ.

Процеси в цій системі було досліджено експериментально на лабораторній установці.

**Схема експериментальної установки.** Структурну схему установки зображено на рис. 2. Живлення статора АМ здійснюється від трифазної мережі L1, L2, L3. У коло ротора ввімкнено автономний інвертор напруги ІН, на вході якого ввімкнено конденсатор С. На пристрій керування подаються вхідні сигнали: струми двох фаз статора АМ, дві лінійні напруги статора АМ, струми двох фаз обмотки ротора АМ (через перетворювачі з гальванічним розмежуванням типу струм/напруга I/U та напруга/напруга U/U) та кут повороту ротора АМ (від імпульсного давача ІД). Сигнали через аналого-цифровий перетворювач АЦП подаються на пристрій програмованої логіки ПЛ, керований мікропроцесором МП, що може обмінюватись даними з персональним комп'ютером ПК. Імпульси від пристрою керування подаються на транзистори ІН. Момент навантаження на валу АМ створює машина постійного струму, обмотка якоря якої замкнена на реостат.

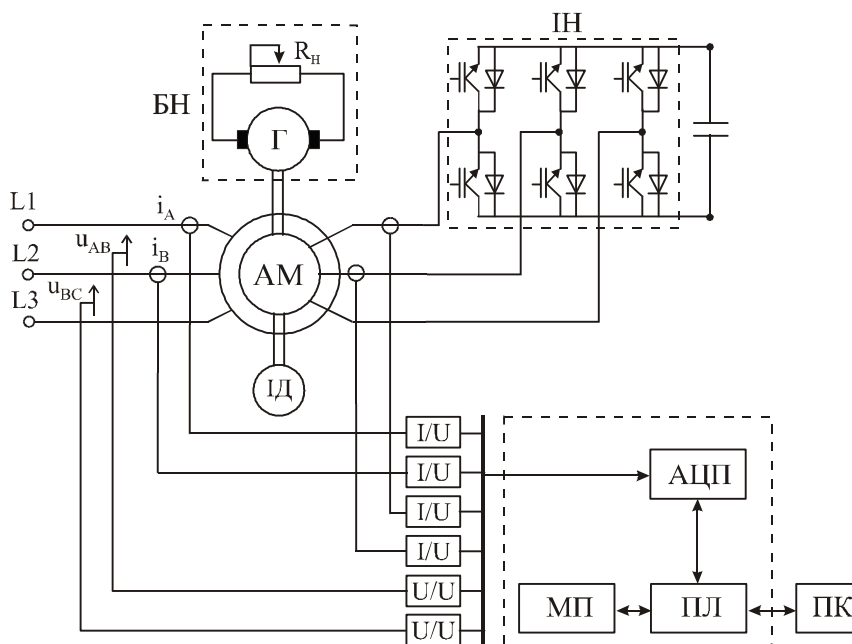


Рис. 2. Структурна схема експериментальної установки

У мікропроцесор закладені алгоритми керування, описані вище. Крім того, в схемі передбачено обмеження струму ротора.

В експериментальній установці використана асинхронна машина 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,  $U_{rn} = 31$  В,  $I_{rn} = 18$  А,  $\cos \phi = 0.78$ .

**Результати експериментальних досліджень.** Результати експериментальних досліджень системи показано на рис. 3–5. На рис. 3 зображено зняті осцилограми напруги і струму статора в різних режимах роботи. На рис. 3, а зображено осцилограми під час подавання напруги на статор у разі розімкненого кола ротора. Як зрозуміло в цьому випадку коефіцієнт потужності  $\cos \phi = 0$ , в статорі протікає реактивний струм намагнічення.

Осцилограми роботи системи з закладеною програмно системою підпорядкованого регулювання (СПР) показано на рис. 3, б–г. На рисунках зображено осцилограми напруги і струму статора за заданих швидкостей 50 об/хв (рис. 3, б), 100 об/хв (рис. 3, в), 150 об/хв (рис. 3, г) за номінальних навантажень. Рис. 3, д ілюструє роботу системи за закладеної лінійної залежності струму статора від швидкості у разі номінального навантаження на швидкості 115 об/хв. Наведені осцилограми ілюструють, що за номінальних навантажень забезпечується відпрацювання швидкості завдання (для варіанта з СПР) та одиничний коефіцієнт потужності. Високочастотні пульсації у кривій струму за номінальних навантажень пояснюються наявністю гістерезисних регуляторів струму ротора АД. У разі збільшення навантаження зростає потужність ковзання, а відповідно і напруга на конденсаторі, тому за тої самої ширини гістерезису регуляторів спостерігається збільшення амплітуди пульсацій.

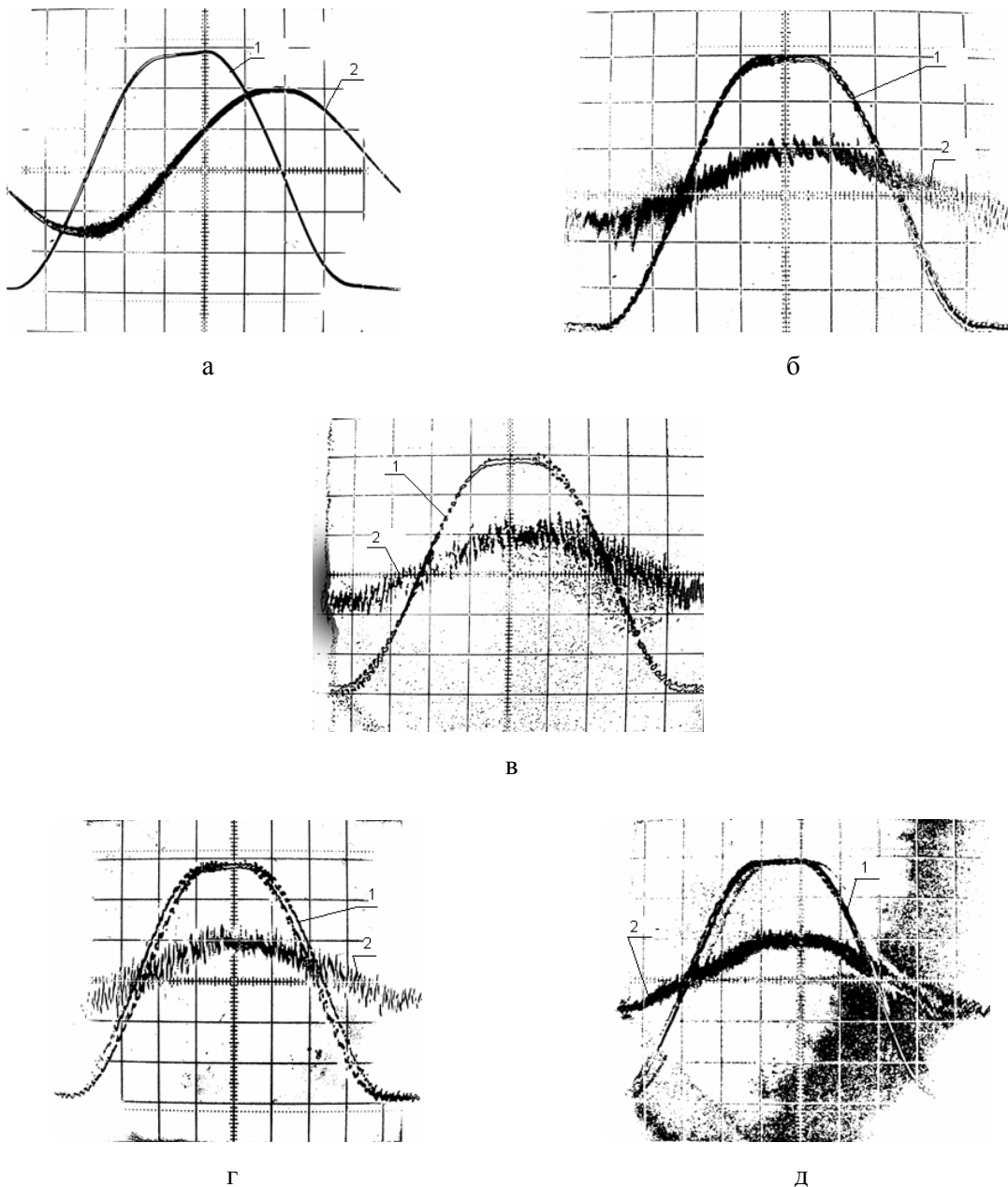


Рис. 3. Осцилограми напруг (1) і струмів (2) статора у разі розімкненого ротора (а); під час роботи з СПР – при  $\omega_s = 50$  об/хв (б); при  $\omega_s = 100$  об/хв (в); при  $\omega_s = 150$  об/хв (г); при закладеній лінійній залежності (д)

Статичні характеристики залежності швидкості, напруги на роторі, струму статора і ротора від навантаження, розрахованого як момент на валу, показані на рис. 4. Алгоритм керування працює коректно до досягнення струму ротора значення обмеження (номінального). Після обмеження величини струму ротора характеристики приводу погіршуються.

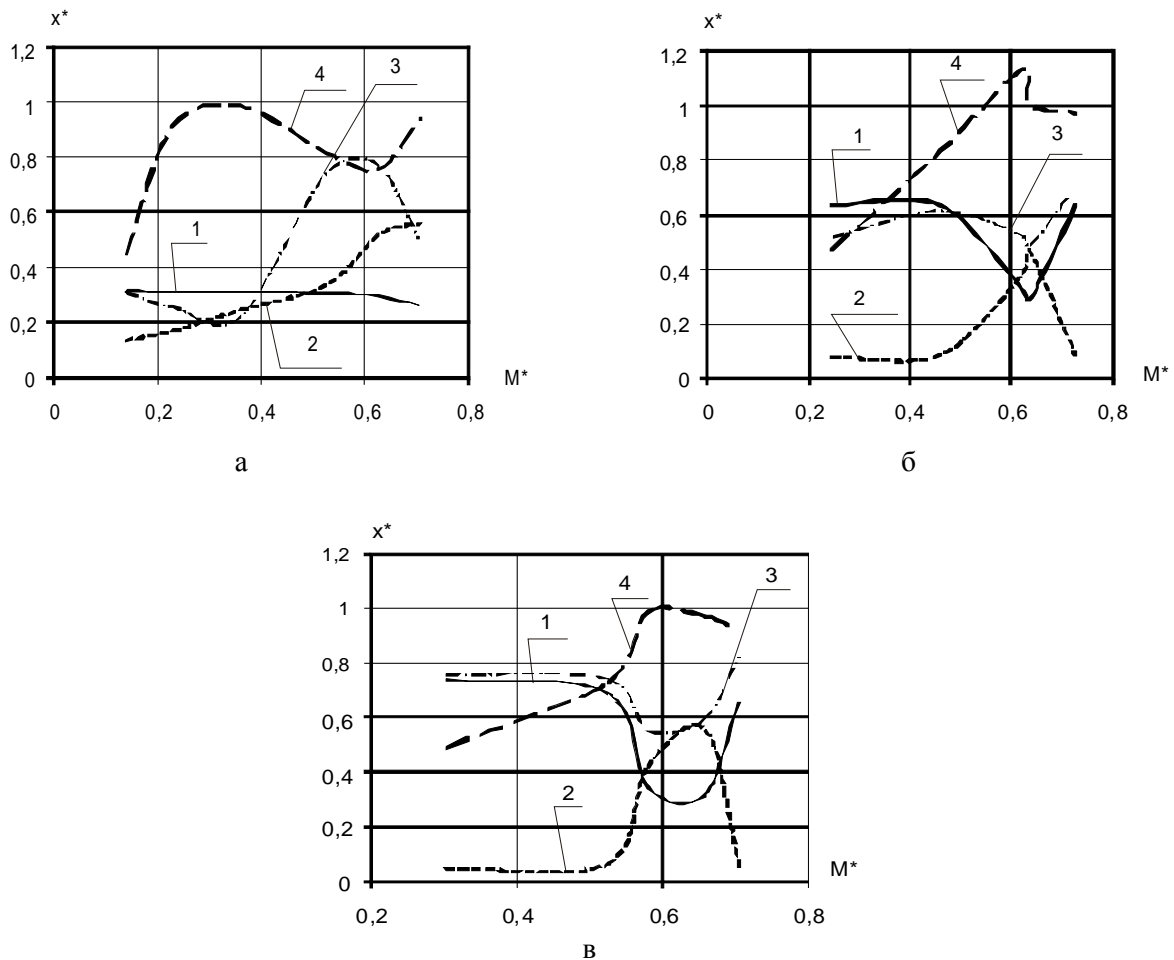


Рис. 4. Швидкість (1), напруга на роторі (2), струм статора (3), струм ротора (4) у відносних одиницях – при СПР:  
а –  $\omega_s = 50$  об/хв, б –  $\omega_s = 100$  об/хв, в – лінійний закон

**Висновки.** 1. Збудження АМ з фазним ротором можна здійснювати потужністю ковзання, що інакше затрачається на нагрівання міді ротора.

2. Для керування асинхронною машиною з подвійним живленням можна використати відомий алгоритм з СПР, або його модифікацію з закладеною лінійною залежністю швидкості від струму статора.

3. За номінальних навантажень у разі застосування СПР, а також у разі закладеної лінійної залежності струму статора від швидкості забезпечується коефіцієнт потужності статора  $\cos\phi=1$ , струм статора має суто активний характер.

4. Алгоритм керування працює коректно до досягнення струмом ротора значень обмеження. Після обмеження струму характеристики приводу погіршуються.