

зможу розробити складніші та ефективніші керуючі системи та комп'ютерні моделі електромеханічних систем. Запропоновані рекурентні рівняння дають також змогу здійснити просту процедуру зміни кроку дискретизації.

1. Куцук А.С., Плахтина О.Г. Розробка цифрових моделей електромеханічних систем на основі теорії об'єктно-орієнтованого проектування // Вісн. Нац. тех. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". – 2005. – Вип. 45. – С. 128–129.
2. MATLAB Help Center. – <http://www.mathworks.com/access/helpdesk>.
3. Shampine L., Reichelt M. The MATLAB ODE Suite. – http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/otherdocs/ode_suite.pdf.
4. The MathWorks, Inc. Numerical Computing with MATLAB. – 2004. – <http://www.mathworks.com/moler>.
5. Научные ресурсы – Численные методы. – <http://www.scientific.narod.ru/numerical.htm>.
6. Костинюк Л., Мороз В., Паранчук Я. Моделивання електроприводів: Навч. посібник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 404 с.
7. Мороз В. Особливості застосування числових методів у моделюванні сучасних електроприводів // Теоретична електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 130–137.
8. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.
9. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы: Справочное пособие. – К.: Наук. думка, 1986. – 544 с.
10. Шитилло В.П. Операторно-рекуррентный анализ электрических цепей и систем. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 312 с.
11. Лозинський О.Ю., Мороз В.І. Синтез і моделювання цифрових електромеханічних систем на основі апроксимацій інтегралу згортки // Сб. тр. конф. "Моделювання-2006 (Simulation-2006)". – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова НАН України, 16–18 травня 2006. – С. 309–313.
12. Мороз В. Числові інтегратори в цифрових системах керування // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2006. – № 563. – С. 99–104.
13. Moroz V. Calculations of Electrical Circuits Using the Convolution Integral Approximations // Proc. of VII International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" CPEE'06 (under auspices IEEE). – 27–30 August 2006. – Ukraine, Odessa. – P. 115–117.

УДК 621.313.333

А.С. Куцук, В.Д. Йовбак

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра ЕАП

Свялявський технічний коледж

Національного університету харчових технологій

АСИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗБУДЖЕННЯ ТА ШВИДКОСТІ СТРУМОМ РОТОРА

© Куцук А.С., Йовбак В.Д., 2007

Описано схему та алгоритм векторного керування асинхронним генератором у схемі подвійного живлення, що забезпечує регулювання збудження та швидкості обертання генератора струмами ротора з формуванням заданого значення коефіцієнта потужності на виході генератора. Наведено результати математичного моделювання, що демонструють виконання поставлених задач керування.

The scheme and the algorithm of vector control of an asynchronous generator is described, that provides adjusting of excitation and speed of generator by the rotor currents with forming of the set value of a power-factor on the output of generator. The results of mathematical modeling are presented, that demonstrate implementation the set control problems.

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень. Основними перевагами асинхронних генераторів (АГ) на основі машин подвійного живлення (МПЖ), що робить перспективним їх

використання як при роботі на автономне навантаження, так і паралельно з мережею, є можливість роботи з регулюванням коефіцієнта потужності на виході генератора, зокрема і в режимі генерування реактивної енергії. Магнітний потік у такому разі можна регулювати струмом ротора, а потужність перетворювача, який живить коло ротора, є пропорційною до ковзання. У цих системах, крім того, можливим є регулювання швидкості обертання асинхронного генератора, що необхідно для кращого відбору потужності від рушія у багатьох генераторних установках, зокрема вітроенергетичних.

Для побудови систем керування машинами подвійного живлення, зокрема і генераторами, здебільшого використовують принципи векторного керування, а для живлення кола ротора застосовують перетворювачі частоти з інверторами напруги, або безпосередні (матричні перетворювачі, або циклоконвертори). У роботі [1] описано алгоритм та систему векторного керування, які забезпечують асимптотичне відпрацювання генерованого АГ моменту з одночасною стабілізацією коефіцієнта потужності статора асинхронної машини (АМ) на одиничному рівні, для чого використано систему координат, зв'язану з зображувальним вектором напруги статора АМ. Зауважимо, що в цьому алгоритмі керування прийняті допущення про постійність амплітуди та частоти напруги статора АМ, вимірюваність швидкості, кутового положення ротора γ_R , кутового положення вектора напруги статора γ_0 та струмів ротора. Недоліком цього алгоритму, на нашу думку, є значний обсяг необхідних розрахунків, в яких крім заданих значень координат входять їх перші та другі похідні, що ускладнює його технічну реалізацію.

У роботі [2] запропоновано систему векторного керування напругою ротора АМ, у якій забезпечується робота АМ з одиничним коефіцієнтом потужності статора в режимах двигуна та генератора з регулюванням швидкості обертання вище і нижче від синхронної. Особливістю запропонованого алгоритму керування є його відносна простота (і, відтак, простота технічної реалізації) та інваріантність до частоти напруги статора АМ. Водночас у наведеному алгоритмі не передбачено регулювання коефіцієнта потужності статора та реалізація режимів роботи зі споживанням та генеруванням реактивної енергії, які, однак, є важливими для генераторних установок зокрема.

Постановка завдання. Завданням дослідження є вдосконалення алгоритму керування машиною подвійного живлення в напрямку забезпечення роботи асинхронної машини:

- у режимах двигуна та генератора зі споживанням та генеруванням реактивної енергії та з забезпеченням заданого значення коефіцієнта потужності в статорі;
- з регулюванням швидкості обертання в зазначених вище режимах.

Система та алгоритм векторного керування асинхронною машиною з забезпеченням регулювання збудження та коефіцієнта потужності струмами ротора. У запропонованому в [2] алгоритмі векторного керування використано систему координат (x,y) , в якій ордината y збігається з зображуючим вектором напруги живлення статора, а вісь x – є перпендикулярною до вектора цієї напруги (рис. 1).

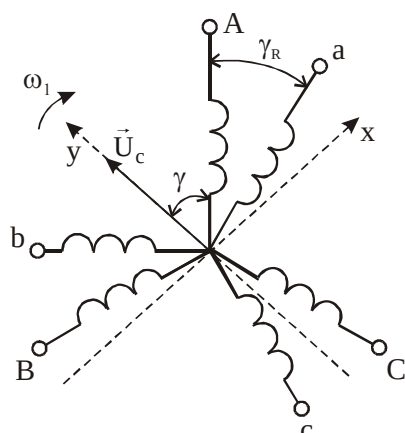


Рис. 1. Система координат x, y

При протіканні по обмотках струмів створюються потокозчеплення, які в статорі за осями (x,y) визначаються формулами

$$\begin{aligned}\psi_{sx} &= (L_m + L_{\sigma s}) \cdot i_{sx} + L_m i_{rx}, \\ \psi_{sy} &= (L_m + L_{\sigma s}) \cdot i_{sy} + L_m i_{ry},\end{aligned}\quad (1)$$

де L_m , $L_{\sigma s}$ – робоча індуктивність та індуктивність розсіювання статора; i_{sx} , i_{sy} , i_{rx} , i_{ry} – струми статора і ротора в системі координат x,y .

На основі потокозчеплень ψ_{sx} , ψ_{sy} , які можуть бути виміряні, або розраховані за струмами, а також завдань струмів статора, визначаються завдання струмів ротора

$$i_{rx3} = \frac{\psi_{sx} - (L_m + L_{\sigma s}) \cdot i_{sx3}}{L_m}, \quad (2)$$

$$i_{ry3} = \frac{\psi_{sy} - (L_m + L_{\sigma s}) \cdot i_{sy3}}{L_m}, \quad (3)$$

де i_{sx3} , i_{sy3} – завдання струму статора за осями x та y.

Струм статора за віссю y визначає величину електромагнітного моменту (активної потужності) асинхронної машини і може формуватися системою автоматичного регулювання швидкості АМ. Для забезпечення роботи АМ з заданим значенням коефіцієнта потужності статора завдання струму статора за віссю x визначатимемо з умови: $i_{sx3} = i_{sy3} \cdot \tan \varphi$ (де φ – фазовий зсув між напругою та струмом статора асинхронного генератора), з врахуванням якої вираз (2) набуде вигляду

$$i_{rx3} = \frac{\psi_{sx} - (L_m + L_{\sigma s}) \cdot i_{sy3} \cdot \tan \varphi}{L_m}. \quad (4)$$

Рівняння (3) та (4) визначають задані значення струмів ротора з умови забезпечення заданих значень коефіцієнта потужності статора та електромагнітного моменту асинхронної машини. Для завдання режиму генерування реактивної енергії $\tan \varphi$ у виразі (4) повинен задаватися з від'ємним знаком, а для завдання режиму споживання реактивної енергії – з додатним. Ці рівняння покладено в основу запропонованого алгоритму керування, який реалізується схемою, показаною на рис. 2.

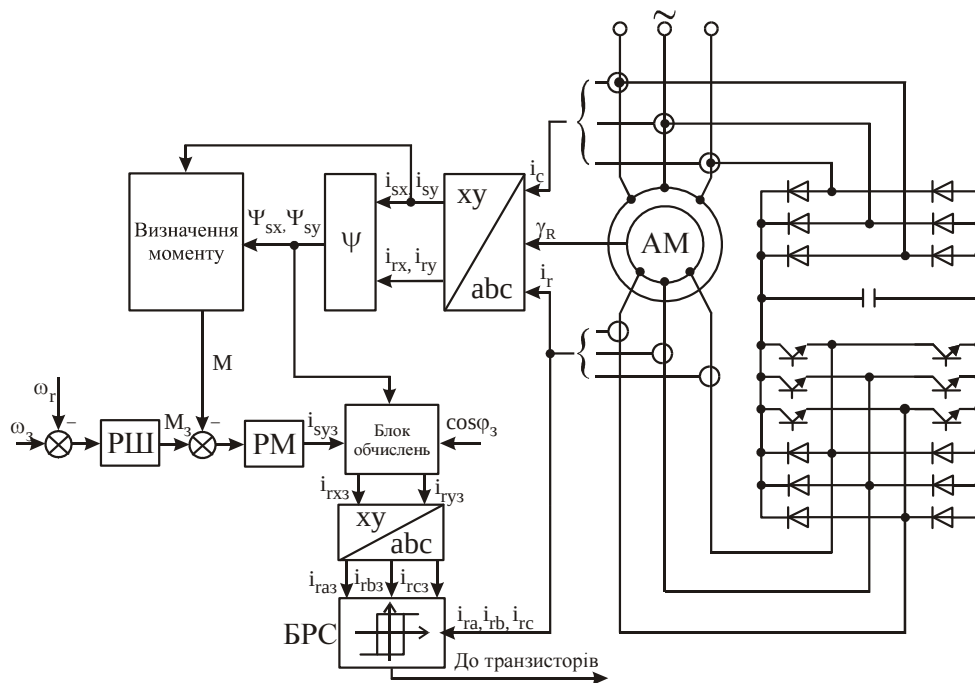


Рис. 2. Асинхронна машина з системою векторного керування струмами ротора

Потокозчеплення АМ у формулах (3), (4) визначаються на основі вимірних струмів статора і ротора АМ. Система автоматичного регулювання підпорядкованого типу з регуляторами швидкості (РШ) та моменту (РМ) забезпечує роботу АМ з заданою швидкістю обертання, причому вихідний сигнал регулятора моменту є завданням струму статора за віссю y.

Задані значення струмів ротора в системі координат (x,y) перетворюються у завдання фазних струмів ротора, які реалізуються блоком гістерезисних регуляторів струмів (БРС), що керує автономним інвертором напруги перетворювача, який живить коло ротора.

Зауважимо, що в цьому алгоритмі керування кутове положення зображувального вектора напруги статора (тригонометричні функції кута γ , рис. 1) розраховується за вимірними напругами статора з виразів, наведених у [2]. Крім напруг статора вимірюються струми статора і ротора та кут повороту ротора γ_R .

Результати досліджень. Дослідження процесів в описаній вище системі було проведено з застосуванням математичної та комп'ютерної моделей, створених за допомогою запропонованого в [3] методу, що передбачає формування моделі системи поєднанням об'єктів, які реалізують моделі типових елементів в об'єктно-орієнтованому вигляді.

Параметри системи, що використовувалися під час розрахунків процесів, були такими. Параметри асинхронної машини: номінальна потужність $P_n = 1.5$ кВт; номінальна напруга $U_n = 380$ В; робоча індуктивність $L_m = 0.3696$ Гн; індуктивності розсіювання статора і ротора (приведена) $L_{\sigma 1} = 0.014$ Гн, $L'_{\sigma 2} = 0.09$ Гн; активні опори статора і ротора (приведений) $R_s = 7.32$ Ом, $R'_r = 4.0$ Ом; момент інерції $J = 0.04$ кг·м²; кількість пар полюсів $p_0 = 2.0$; коефіцієнт приведення струмів ротора до статора $k_i = 2.0$, параметри регуляторів: $k_\omega = 4.0$, $k_{\omega i} = 30.0$, $k_m = 1.7$, $k_{mi} = 0.001$ (параметри підібрані експериментально), розраховані значення потокозчеплень статора фільтруються (стала часу фільтра 0.002 с). Ємність конденсатора на вході інвертора напруги 1 мФ.

На рис. 3–6 показано результати дослідження режиму завантаження асинхронного генератора реактивною потужністю під час його роботи на швидкості 100 рад/с зміною завдання коефіцієнта потужності статора з 1.0 до 0.7 (режим генерування реактивної потужності) при незмінному моменті рушія на валу АГ та незмінному завданні швидкості обертання.

При заданому коефіцієнті потужності статора, якому відповідає кут між струмом і напругою статора АГ, що дорівнює 45° , струм статора за віссю x за величиною дорівнює струму статора за віссю y , оскільки $i_{sx}/i_{sy} = \tan \varphi = 1$ (за модулем), що і видно з рис. 3. Додатний знак струму статора за віссю x означає, що АГ працює в режимі генерування реактивної потужності. Зміна фази струму статора при зміні завдання коефіцієнта потужності проілюстрована на рис. 6.

В умовах постійності зовнішнього моменту на валу та незмінності сигналу завдання швидкості АГ електромагнітний момент та швидкість АГ залишаються постійними. Відповідно, постійними є струм статора та ротора за віссю y (рис. 3, б, рис. 4, б). Оскільки збудження АГ здійснюється в цій схемі струмами ротора, збільшення генерування генератором реактивної потужності досягається збільшенням струму ротора за віссю x (рис. 4, а).

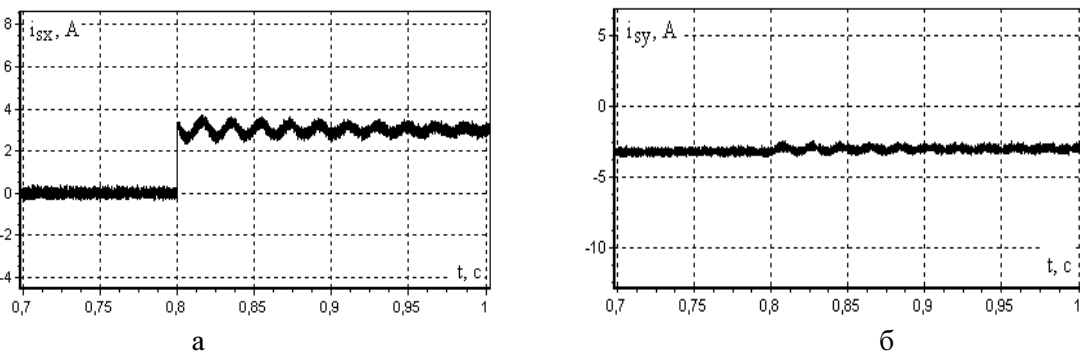


Рис. 3. Струми статора АГ по осях x (а) та y (б) в режимі завантаження реактивною потужністю

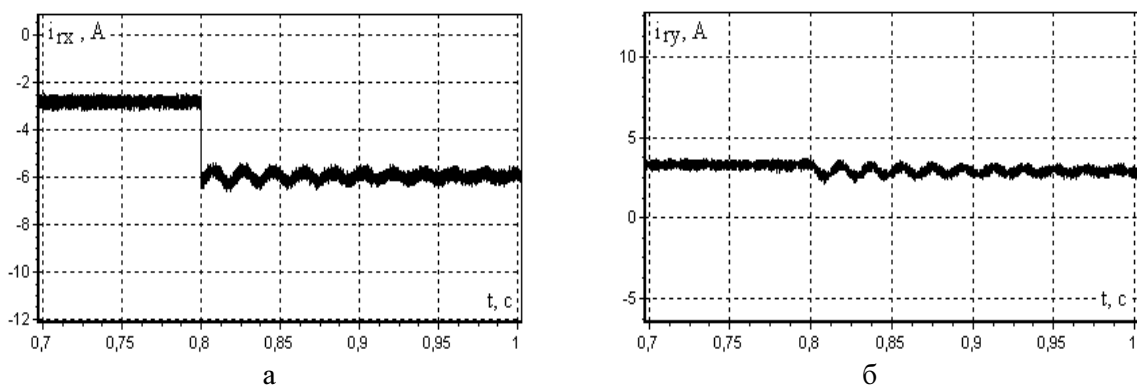


Рис. 4. Струми ротора (приведені) АГ по осях x (а) та y (б)

Значення активної потужності на виході АГ після появи реактивної потужності практично не змінюється (за винятком нетривалого перехідного процесу), причому при заданому коефіцієнті потужності значення активної та реактивної потужностей збігаються (рис. 5). Повна потужність на виході АГ становить 2.2 кВт.

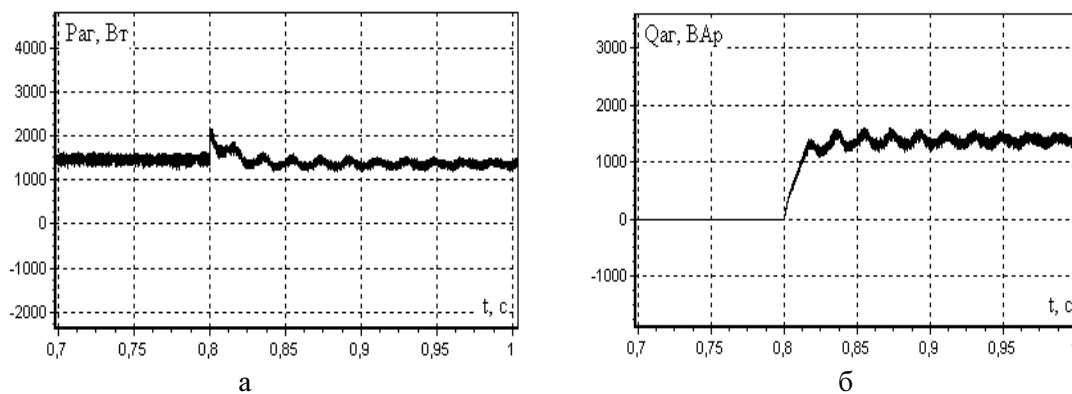


Рис. 5. Активна (а) та реактивна (б) потужності на виході АГ

Як показали результати досліджень, у разі збільшення генерування реактивної потужності і відповідного зростання струму ротора (рис. 4) зростатиме струм на виході діодного випрямляча, що, в умовах незмінності напруги на виході випрямляча, призведе до збільшення потужності, яку споживає (відбирає з виходу АГ) ротор. При цьому, величина цієї потужності зменшується при зростанні швидкості обертання асинхронного генератора.

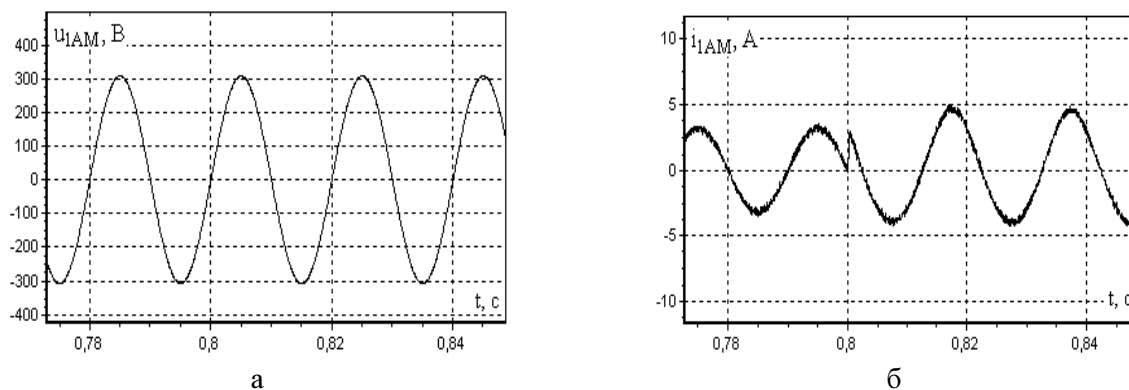


Рис. 6. Напруга (фазна) (а) та струм (б) статора АМ

На рис. 7–9 показано результати розрахунку режиму переходу АГ у режим споживання реактивної енергії з незмінним завданням коефіцієнта потужності статора (рис. 7, б) та з подальшим регулюванням швидкості (сигнал завдання швидкості обертання змінюється до 170 рад/с і до 100 рад/с).

Після переходу в режим споживання реактивної потужності спостерігається зміна знака струму статора за віссю x (рис. 9, а) та відповідне зменшення струму ротора по осі x (векторна сума векторів струмів статора та ротора за осями x є струмом намагнічування АГ). Струми статора та ротора за віссю y визначаються величиною електромагнітного моменту АГ і не залежать від заданого значення коефіцієнта потужності (рис. 9, б, рис. 10, б). Відтак струм ротора в режимі споживання реактивної потужності (в певних межах) зменшується за величиною (рис. 8, б).

Частота струмів ротора АМ визначається ковзанням (при роботі на синхронній швидкості дорівнює 0), а при переході через синхронну швидкість обертання змінюється чергування фаз в роторі (рис. 8, б). Збільшення електромагнітного моменту АМ, і відповідне зростання струму статора за віссю y , призводить до збільшення струму ротора (за рахунок збільшення складових за осями y та x під час збереження заданого коефіцієнта потужності).

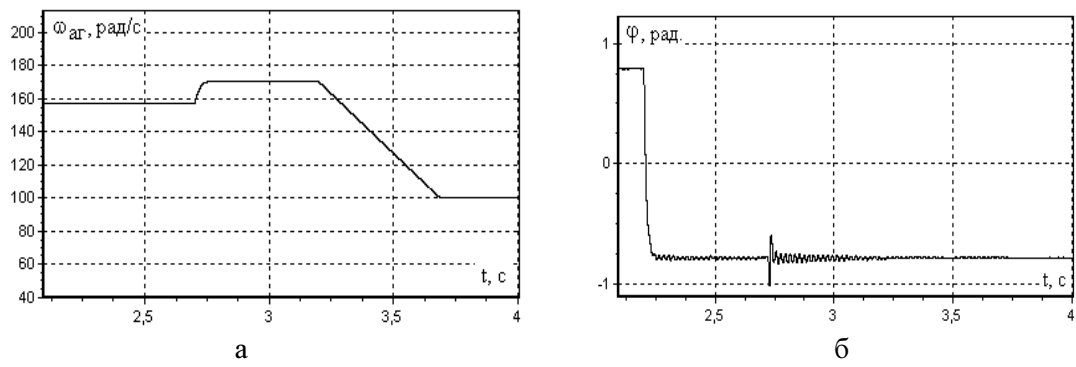


Рис. 7. Швидкість вала (а) та кут між напругою та струмом статора АГ (б) при переході в режим споживання реактивної потужності та подальшому регулюванні швидкості

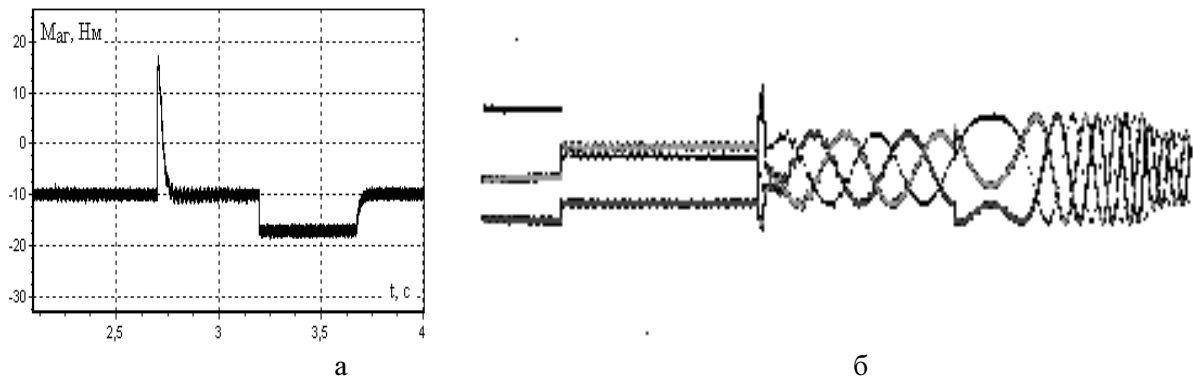


Рис. 8. Електромагнітний момент АГ (а) та струм ротора АГ (б)

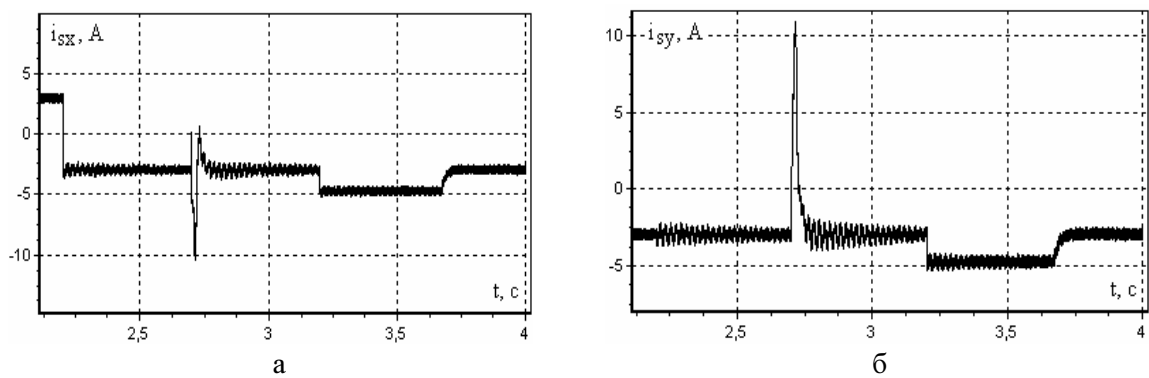


Рис. 9. Струми статора АГ по осях x (а) та y (б)

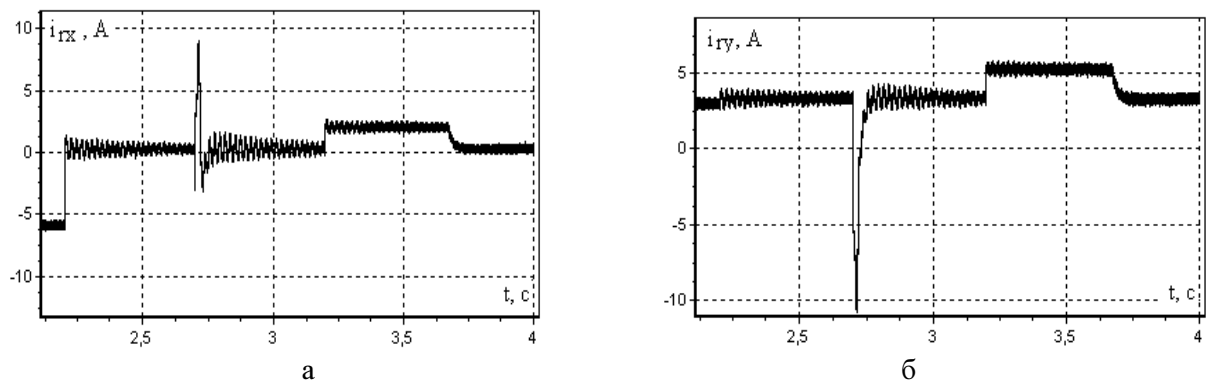


Рис. 10. Струми ротора (приведені АМ по осях x (а) та y (б))

Висновки. 1. Запропонована схема векторного керування асинхронною машиною забезпечує роботу асинхронної машини в режимі генератора з регулюванням швидкості обертання ротора (нижче і вище від синхронної) з генеруванням або споживанням реактивної потужності та регулюванням коефіцієнта потужності статора генератора.

2. В умовах наявності діодного випрямляча, який живить коло ротора, коло ротора не споживає з виходу асинхронного генератора додатково реактивної енергії, відтак, запропонована схема забезпечує регулювання коефіцієнта потужності генераторної установки загалом.

3. Швидкість асинхронного генератора в цій системі у всіх перерахованих режимах визначається винятково сигналом завдання, що забезпечується системою автоматичного регулювання підпорядкованого типу з ПІ-регулятором швидкості та ПІ-регулятором моменту. Регулювання швидкості обертання асинхронного генератора є доцільним в деяких генераторних установках, зокрема у вітроенергетичних, для кращого відбору потужності від рушія і забезпечення максимального ККД.

1. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Чехет Э.М., и др. Векторное управление генератором на основе машины двойного питания // Вестн. Харьков. гос. политехн. ун-та. – 1999. – Вып. 61. – С. 49–55. 2. Плахтина О.Г., Куцук А.С., Йовбак В.Д. Электромагнитні та електромеханічні процеси асинхронної машини з інвертором напруги в колі ротора при векторному керуванні // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 5. – С. 30–36. 3. Куцук А.С. Об'єктно-орієнтований метод аналізу електромеханічних систем // Технічна електродинаміка. – 2006. – № 2. – С. 57–63.

УДК 621.311.2

Г.М. Лисяк, В.С. Коновал, О.Р. Пастух

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕСМ

ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОБЛОКА З ДОДАТКОВИМ РОБОЧИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ

© Лисяк Г.М., Коновал В.С., Пастух О.Р., 2007

Здійснено порівняльний аналіз динамічної стійкості режимів енергоблока електростанцій, електрична частина якого виконана як за схемою з додатковим робочим трансформатором власних потреб, так і за традиційною схемою. Наведено результати комп'ютерного симулювання електромеханічних перехідних процесів енергоблока з турбогенератором ТГВ-200М.

The comparative analysis of dynamic stability of modes power unit of power stations is made, which electrical part is executed behind the circuit with the additional working transformer of own needs, and behind the traditional circuit. The results of komputer simulating elektromechanical transients for power unit with turbogenerator ТГВ-200М are given.

Постановка проблеми. Функціонування електроенергетичних систем (ЕЕС) відбувається в умовах діяння неперервних та дискретних збурень. Неперервні збурення зазвичай є порівняно невеликими і найчастіше зумовлені природною зміною в часі навантаження ЕЕС. Для забезпечення належної якості електроенергії в нормальних експлуатаційних режимах під час діяння неперервних і порівняно невеликих збурень в ЕЕС застосовують відповідні системи автоматичного регулювання. Для забезпечення динамічної стійкості режимів ЕЕС під час виникнення дискретних, зазвичай