

Паламар М. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом / М. Паламар, Ю. Пастернак, А. Паламар // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 76. — № 4. — С. 164-173. — (Приладобудування та інформаційно-вимірвальні технології).

УДК 681.51, 621.3.07

**М. Паламар, докт. техн. наук; Ю. Пастернак; А. Паламар**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК СИСТЕМИ ПРЕЦИЗІЙНОГО КЕРУВАННЯ АНТЕНОЮ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ**

***Резюме.** Досліджено динамічні похибки, що виникають при наведенні та супроводі траєкторій супутників у системі керування великогабаритною антеною з частотно регульованим асинхронним електроприводом при використанні різних законів керування. Наведено результати моделювання та зроблено порівняння з експериментальними даними, отриманими при випробуваннях розробленої системи керування антеною під час відпрацювання тестових траєкторій.*

***Ключові слова:** антенна система, опорно-поворотний пристрій, дистанційне зондування Землі, асинхронний двигун, імітаційне моделювання, система керування.*

**M. Palamar, Y. Pasternak, A. Palamar**

## **INVESTIGATE OF DYNAMIC ERRORS OF PRECISION SYSTEM ANTENNA CONTROL WITH ASYNCHRONOUS DRIVER**

***Summary.** This paper considers the investigation of dynamic errors occurring in the control system of precision antenna complex using frequency regulated asynchronous electric drive as the actuator. Simulation model of the system induction motor - frequency regulator is synthesized. The detailed parameters calculation of asynchronous motors (AM) and frequency regulator is carried out.*

*Simulation model of frequency speed AM adjusting for precision control of AS mechanical modules in the system Matlab/Simulink is synthesized. PID controller coefficients is synthesized for the model of frequency regulation as a part of the overall as management system to control the trajectory support. Computing power UFR appreciates the current angular position of the rotor flux linkage vector-based interpretation in real-time systems of differential equations, according to the mathematical model of the asynchronous engine.*

*The comparative results of the survey errors obtained using simulation modeling in different modes for different law of the torque support at low revs are presented. The experimental data of operation of the large-sized antenna control system with vector control in frequency regulated device during working of test trajectories are presented. The results of simulation and comparison are made on experimental data obtained while testing AS «EgyptSat-1» during working out the test trajectories.*

*The developed technique makes possible to choose reasonably the method of control and parameters of the system asynchronous motor – the device of frequency regulation in the problems of control systems synthesis by complex objects. The use of techniques for creation precision control systems for antenna complexes to ensure communication with LEO satellites of remote sensing and the radio systems is of practical value, which will improve reliability and reduce the cost of such systems.*

***Key words:** antenna system, support-rotary device, Earth remote sensing, asynchronous driver, modeling, control system.*

**Вступ і актуальність проблеми.** Побудова високоточних систем керування масивними об'єктами з метою їх наведення на задані координати, супроводу по заданих траєкторіях або слідкування за рухомим об'єктом з невизначеною наперед траєкторією є актуальною для багатьох галузей машинобудування, військової сфери. Зокрема це актуально для синтезу систем керування антенними комплексами супроводу низькоорбітальних супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), або систем радіомоніторингу, в яких несуча конструкція опорно-поворотної платформи з великогабаритним рефлектором має вагу від одиниць до десятків тонн. При цьому необхідно забезпечити високу динамічну точність наведення променя антени в одиниці

кутових мінут при великих кутових швидкостях руху по кількох координатах (до 10 град./сек) [1].

Важливим елементом такої системи керування є виконавчий електропривод великої потужності, який повинен забезпечити широкий динамічний діапазон регулювання з високою точністю та стабільним моментом. В існуючих антенних системах (АС) прецизійне керування силовими пристроями забезпечується використанням спеціальних типів двигунів ДБМ, синхронних, або двигуни постійного струму [2,3]. Асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором, що широко використовуються в промисловості, мають ряд незаперечних переваг порівняно з іншими типами електроприводів. Зокрема, це висока надійність і стійкість до жорстких кліматичних умов, менша вага на одиницю потужності, високий к.к.д. (на 24–38% перевищує двигуни постійного струму), менші вимоги до обслуговування завдяки відсутності колектора і щіткового пристрою, низька вартість, велика перевагантижувальна здатність [2]. Проте асинхронні двигуни за своєю природою не призначені для регулювання швидкостей у широкому діапазоні без втрати крутного моменту і використовуються здебільшого в задачах, де необхідна постійна швидкість обертання або незначне її регулювання.

Поява ефективних електронних пристроїв частотного регулювання (ПЧР) АД з реалізацією різних законів керування таких фірм, як ABB Industry (Швеція), Hitachi, Omron (Японія), Siemens, SEW Eurodrive (Німеччина), Telemecanique (Франція) й інших [3] дозволяє розширити динамічний діапазон регулювання із підтримкою крутного моменту. Тому перспективним є використання таких пристроїв разом з АД у системах прецизійного керування АС і актуальним заданням дослідження динаміки АС при відпрацюванні наведення та супроводу низькоорбітальних супутників ДЗЗ.

**Мета роботи** – дослідження динамічних похибок, що виникають при наведенні та супроводі траєкторій супутників у синтезованій нами системі керування АС при використанні різних законів керування обертовим магнітним полем статора АД за допомогою засобів імітаційного моделювання, а також експериментальною перевіркою результатів.

**Розрахунок параметрів асинхронного електропривода для синтезу моделі.** Для прецизійного керування наведенням АС та супроводу траєкторій супутників на основі АД з частотним регулюванням швидкості важливо правильно синтезувати систему АД – частотний регулятор – контролер із урахуванням особливостей роботи АС, методів керування, параметрів частотних регуляторів та параметрів АД, для чого необхідний детальний розрахунок електромеханічних характеристик АД та налаштування параметрів регулювання ПЧР.

Сучасні інтелектуальні електронні пристрої частотного регулювання АД містять вбудовані високопродуктивні обчислювальні блоки на основі сигнальних процесорів (DSP), в яких проводиться оцінювання поточного кутового положення вектора потокозчеплення ротора і статора ( $\Psi_1, \Psi_2$ ) на основі розв'язку в реальному часі системи диференціальних рівнянь, складених у відповідності з математичною моделлю двигуна [4], а також багатофункціональні генератори сигналів для реалізації алгоритмів векторної широтно-імпульсної модуляції та керування потужними інверторами.

Існують різні методи і алгоритми частотного керування АД, згідно з якими частотний регулятор при отриманні керуючого сигналу від контролера швидкості змінює частоту  $f$ , струм  $I$  і значення напруги живлення асинхронного двигуна  $U$  за різними законами залежно від його налаштувань:  $U/f = \text{const}$ ,  $\Psi_1 = \text{const}$ ,  $\Psi_2 = \text{const}$  [5].

Еквівалентна схема АД, що враховує електромагнітні процеси в двигуні при синтезі його моделі, наведена на рис.1.

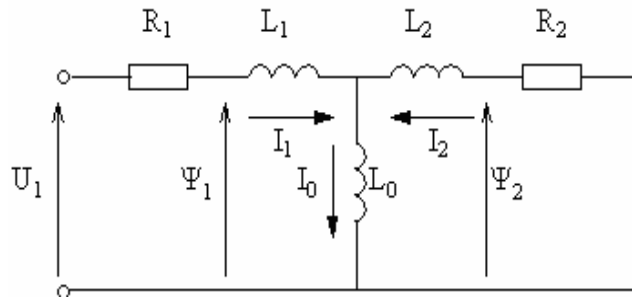


Рисунок 1. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Figure 1. T-type equivalent circuit of the induction motor

Модель АД із урахуванням низки прийнятних для моделювання припущень [5] описується системою 6 диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} u_{1a} = i_{1a} \cdot R_1 + \frac{d\psi_{1a}}{dt}, \\ u_{1b} = i_{1b} \cdot R_1 + \frac{d\psi_{1b}}{dt}, \\ u_{1c} = i_{1c} \cdot R_1 + \frac{d\psi_{1c}}{dt}, \\ 0 = i_{2a} \cdot R_2 + \frac{d\psi_{2a}}{dt}, \\ 0 = i_{2b} \cdot R_2 + \frac{d\psi_{2b}}{dt}, \\ 0 = i_{2c} \cdot R_2 + \frac{d\psi_{2c}}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}, u_{2a}, u_{2b}, u_{2c}$  – миттєві значення фазних напруги статора і ротора;

$i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}$  – миттєві значення фазних струмів статора і ротора;

$\psi_{1a}, \psi_{1b}, \psi_{1c}, \psi_{2a}, \psi_{2b}, \psi_{2c}$  – повні потокозчеплення фазних обмоток;

$R_1, R_2$  – активні опори обмоток статора і ротора.

Для дослідження динамічних властивостей двигуна з перенесенням акценту на зміну моменту на валу двигуна систему рівнянь представляють через потокозчеплення в обмотках статора і ротора як функції від струмів, індуктивностей і кутів зміщення фаз

$$\begin{bmatrix} \psi_{1a} \\ \psi_{1b} \\ \psi_{1c} \\ \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \\ \psi_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 \\ L_{12} \cos \theta_2 & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) \\ L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L_{12} \cos \theta_2 & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) \\ L_{12} \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & L_{12} \cos(\theta_2 - 4\pi/3) & L_{12} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \\ i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ ,  $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$  – повні еквівалентні індуктивності фаз статора і ротора, які складаються з індуктивностей від полів розсіювання ( $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ ) і головного потоку ( $L_m = 3/2 L_{12}$ );

$L_{12}$  – максимальна взаємна індуктивність між будь-якою обмоткою статора і будь-якою обмоткою ротора, яка має місце при суміщенні їх осей;

$\theta_2$  – поточний кут між осями обмоток фаз статора і ротора.

Рівняння (2) містить гармонічні коефіцієнти, що створює труднощі при дослідженні перехідних процесів. Щоб виключити гармонічні коефіцієнти, використовують перетворення координат. Для цього реальні змінні статора і ротора замінюються їх проекціями на взаємно перпендикулярні осі координат, що обертаються з довільною швидкістю  $\omega_k$ . Система рівнянь узагальненого асинхронного двигуна у векторній формі

$$\begin{cases} \vec{u}_1 = \vec{i}_1 R_1 + \frac{d\vec{\psi}_1}{dt}, \\ 0 = \vec{i}_2 R_2 + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt}, \\ \vec{\psi}_1 = \vec{i}_1 L_1 + \vec{i}_2 L_m e^{j\varphi}, \\ \vec{\psi}_2 = \vec{i}_1 L_m e^{-j\varphi} + \vec{i}_2 L_2, \end{cases} \quad (3)$$

Привівши систему рівнянь (3) до системи координат, яка є нерухомою відносно поля статора, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega_0$ , а потім, спроектуювши отримані рівняння на осі d і q, що обертаються з частотою поля, отримуємо систему рівнянь асинхронного двигуна в системі координат, що обертається з частотою поля:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{10d}}{dt} = u_{10d} + k_2 \alpha_1 \psi_{20d} - \alpha_1 \psi_{10d} + \omega_0 \psi_{10q}, \\ \frac{d\psi_{10q}}{dt} = u_{10q} + k_2 \alpha_1 \psi_{20q} - \alpha_1 \psi_{10q} - \omega_0 \psi_{10d}, \\ \frac{d\psi_{20d}}{dt} = k_1 \alpha_2 \psi_{10d} - \alpha_2 \psi_{20d} + \beta \psi_{20q}, \\ \frac{d\psi_{20q}}{dt} = k_1 \alpha_2 \psi_{10q} - \alpha_2 \psi_{20q} - \beta \psi_{20d}, \\ M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2 \cdot L_1'} \cdot (\psi_{20d} \psi_{10q} - \psi_{20q} \psi_{10d}), \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (pM - M_n). \end{cases} \quad (4)$$

Для розв'язку системи рівнянь (4) числовими методами з метою знаходження потокозчеплення статора і ротора  $\psi_{10}$  і  $\psi_{20}$ , моменту  $M$  і швидкості обертання ротора  $\omega$  розраховано електромеханічні параметри схеми заміщення АД, що використовується в розробленій АС для кожної осі. Потужність двигуна вибирали, виходячи з необхідного навантаження приведенного до вала: тип АИР80В4, 1,5 КВт, трифазний. Електромеханічні параметри наведені в таблиці 1 і використовуються для подальшого синтезу імітаційної моделі ПЧР у системі Matlab/Simulink.

Таблиця 1

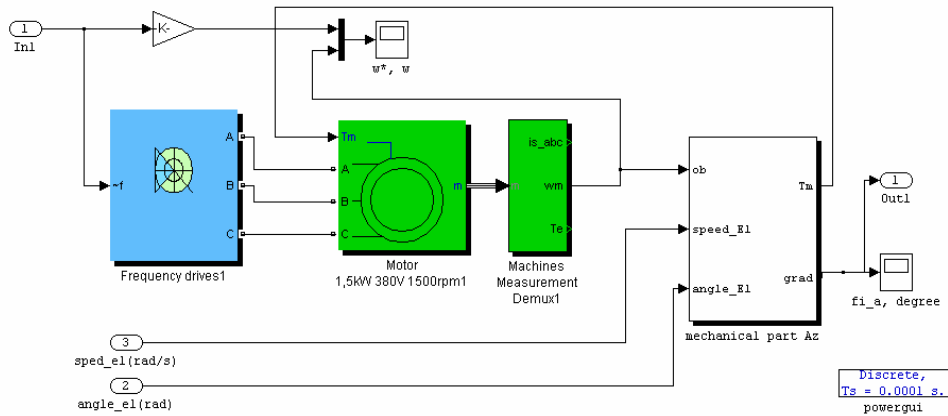
Електромеханічні параметри схеми заміщення асинхронного двигуна

Table 1

Electro-mechanical parameters of asynchronous motor replacement scheme

$U_{\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$	Фазна напруга (під'єднання фаз трикутником)
$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв}$	Синхронна швидкість
$s_n = \frac{n_1 - n_E}{n_1} = \frac{1500 - 1390}{1500} = 0,073$	Номінальне ковзання
$s_{кр} = s_n = (m_{\text{макс}} + \sqrt{m_{\text{макс}}^2 - 1}) = 0,284$	Критичне ковзання
$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = 157 \text{ рад/с}$	Швидкість обертового магнітного поля
$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = 145,5 \text{ рад/с}$	Номінальна кутова швидкість обертання вала
$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = 10,3 \text{ Н м}$	Номінальний момент
$M_{\text{макс}} = m_{\text{макс}} \cdot M_n = 22,66 \text{ Н м}$	Максимальний момент
$M_n = m_n \cdot M_n = 22,66 \text{ Н м}$	Пусковий момент
$\Pi_{\text{мех}} = (0,01 - 0,05)P_n = 15 \text{ Вт}$	Механічні втрати
$C = (1,01 - 1,05) = 1,05$	Коефіцієнт приведення
$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_n + \Pi_{\text{мех}}}{I_n^2 \cdot \frac{1-s_n}{s_n}} = 3,246 \text{ Ом}$	Приведений активний опір ротора
$R_s = \frac{U \cdot \cos \phi (1 - \mu)}{I_n} - C^2 R_r = \frac{\Pi_{\text{мех}}}{3 \cdot I_n^2} = 7,491 \text{ Ом}$	Активний опір статора
$L_{s\sigma} = L_{r\sigma} = \frac{U}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1 + C^2) \cdot K_i \cdot I_n} = 8,66 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$	Приведена індуктивність розсіяння статора і ротора
$L_s = \frac{U}{2\pi \cdot f_1 \cdot I_n \sqrt{1 - \cos^2 \phi} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2\pi \cdot f_1 \cdot M_{\text{макс}} \cdot s_n}{pU \cdot s_{кр}}} = 0,360$	Індуктивність статора
$L_m = L_s - L_{s\sigma} = 0,352 \text{ Гн}$	Індуктивність ланцюга намагнічування

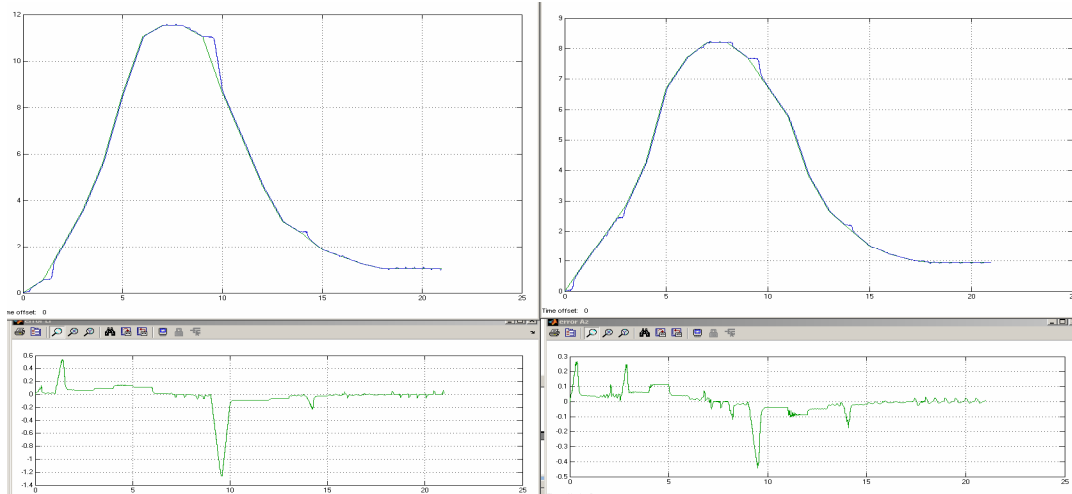
**Синтез імітаційної моделі системи керування електроприводом АС із частотним регулюванням швидкості АД.** На рис.2 наведена модель частотного регулювання обертів АД у системі Matlab/Simulink для прецизійного керування механічними модулями АС на основі закону  $U/f = \text{const}$  із використанням  $R_s I_s$  компенсації для підтримки крутного моменту ПЧР при малих обертах двигуна.



**Рисунок 2.** Модель частотного регулювання обертів АД за законом  $U/f = \text{const}$

**Figure 2.** Model of AD speed frequency regulation by law  $U/f = \text{const}$

Для керування супроводом траєкторії було синтезовано ПД-контролер, налаштовано коефіцієнти та перевірено роботу моделі частотного регулятора в складі загальної моделі системи керування АС [7] із відпрацювання гармонічних і спеціальної тестової траєкторії супроводу. Коефіцієнти ПД-регулятора й тестова траєкторія завантажувалися попередньо в робочий простір MatLab/WorkSpace. Результати відпрацювання тестової траєкторії АС із використанням ПЧР за законом регулювання  $U/f = \text{const}$  з буст-корекцією наведено на рис.3 (верхні графіки) для кута місця й азимута відповідно. По осі Y – значення кутових відхилень у градусах.



а)  $\text{std}(\text{error\_el}(:,2))$ , ans = 0.1905;

б)  $\text{std}(\text{error\_az}(:,2))$ , ans = 0.0738

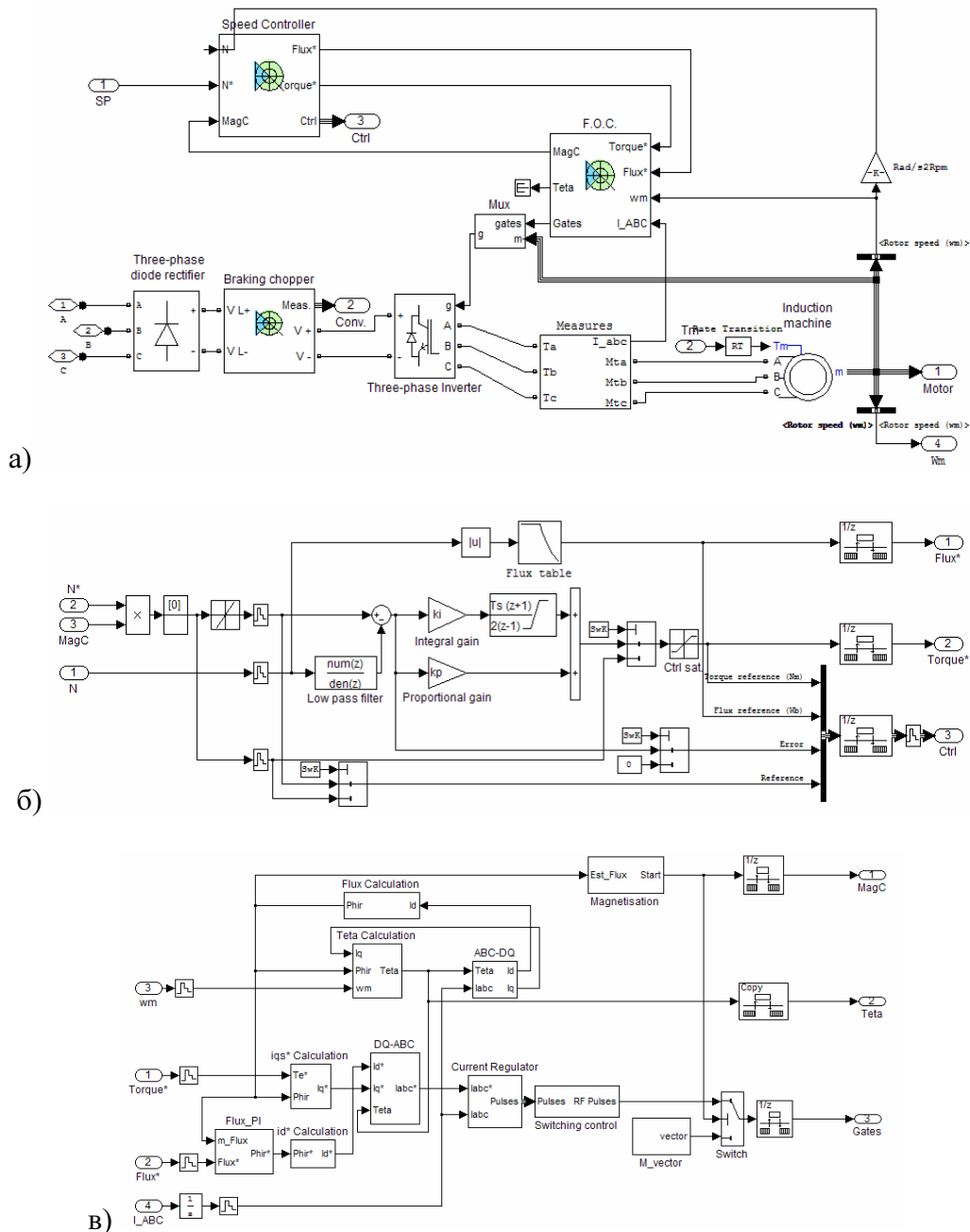
**Рисунок 3.** Результати відпрацювання тестової траєкторії за азимутом і кутом місця з частотним регулюванням згідно з законом  $U/f = \text{const}$

**Figure 3.** The results of a test trajectory tracking along azimuth and elevation using speed frequency regulation by law  $U/f = \text{const}$

На нижніх графіках наведено похибки супроводу траєкторій по куту місця й азимуту відповідно. Середньоквадратичне відхилення від заданої тестової траєкторії (ans) загалом задовільне і за кутом місця (el) становить  $= 0,1905^\circ$ , а за азимутом  $\text{ans}(\text{error\_az}) = 0,0738^\circ$ . Але на окремих ділянках траєкторії похибки досягають значення  $1,2^\circ$ , що перевищує допустиму.

При векторному керуванні в АД реалізується принцип зміни орієнтації векторів струмів і напруг щодо вектора потокозчеплення ротора, що може забезпечити ефективніше керування динамічними об'єктами [6]. Обчислювальний блок ПЧР оцінює поточне кутове положення вектора потокозчеплення ротора на основі розв'язку в реальному часі системи диференціальних рівнянь (4) відповідно до математичної моделі двигуна. При цьому забезпечується роздільне управління моментом і потокозчепленням для динамічних і статичних режимів роботи привода.

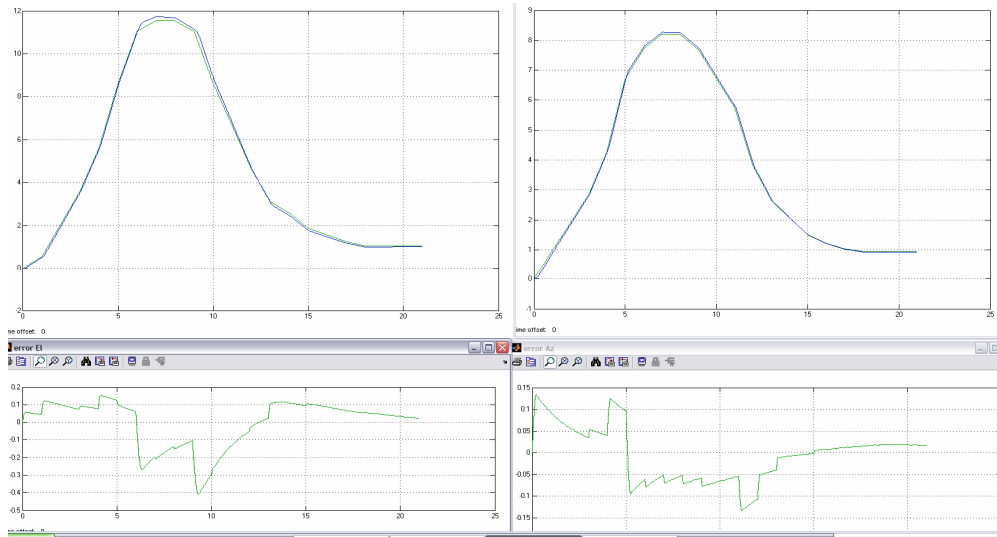
На рис.4 наведена імітаційна модель частотного регулятора швидкості обертання АД на основі векторного закону керування, яка приводить у рух механічні модулі АС, (а – загальна модель; б,в – субмоделі окремих вузлів).



**Рисунок 4.** Імітаційна модель ПЧР з АД (а) та окремих субмодулів (б,в) на основі векторного закону керування

**Figure 4.** Simulation model of frequency regulation with AM (a) and some submodule (b, c) based on vector control law

Результати моделювання роботи АС для аналогічних тестових траєкторій на основі векторного закону керування АД наведено на рис.5.



a)  $\text{std}(\text{error\_el}(:,2))$  ans = 0.1326

б)  $\text{std}(\text{error\_az}(:,2))$  ans = 0.0607

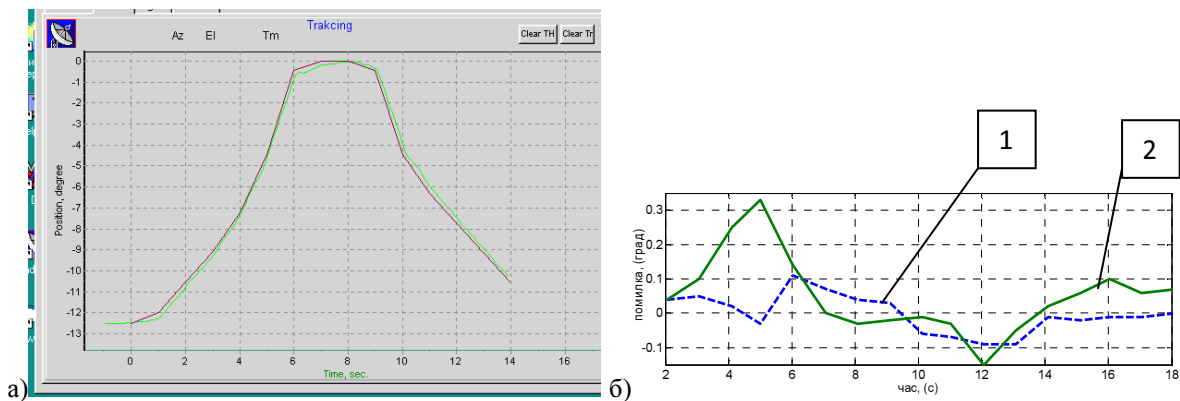
**Рисунок 5.** Результати відпрацювання тестової траєкторії АС з використанням ПЧР з векторним керуванням

**Figure 5.** Results of AS test trajectory tracking using frequency regulation with vector control

Середньоквадратичне відхилення від заданої тестової траєкторії за кутом місця становило  $0,1326^\circ$ , а за азимутом  $\text{ans} = 0,0607^\circ$ . Максимальні відхилення від тестової траєкторії знаходяться в межах:  $(-0,4^\circ \dots +0,2^\circ)$  для кута місця і  $(-0,15^\circ \dots +0,15^\circ)$  для азимута.

**Експериментальні дослідження та аналіз результатів.** Для регулювання частоти обертання АД кожної осі у розробленій нами системі керування АС «EgyptSat-1» [7] використано ПЧР типу ATV-31HU29M2 фірми Telemecanique. Частотний регулятор залежно від налаштування підтримує 3 режими роботи [9]: за законом  $U/f = \text{const}$  (режим L), з можливістю коригування крутного моменту при малих обертах; векторне керування (n) та енергоощадний режим (P).

На рис.6а наведено графік відпрацювання системою керування тестової траєкторії за азимутальною віссю з векторним керуванням ПЧР АД, а на рис.6б – графік похибок регулювання для двох осей (крива 1 – азимут, крива 2 (зелена) – кут місця).



**Рисунок 6.** Результати відпрацювання тестової траєкторії АС «EgyptSat-1»

**Figure 6.** Result of tracing test trajectory AU «EgyptSat-1»



За результати експериментальних досліджень отримано такі похибки супроводу траєкторії: с.к.в. кута місця становить  $0.1096^\circ$ , с.к.в. азимуту =  $0.0787^\circ$ , Максимальні відхилення від тестової траєкторії для кута місця становлять  $(-0,15^\circ \dots +0,35^\circ)$ , а для азимута знаходяться в межах  $(-0,15^\circ \dots +0,12^\circ)$ , що добре корелюється з результатами імітаційного моделювання.

**Висновки.** Використання АД у поєднанні з електронними пристроями частотного регулювання швидкості в системах прецизійного керування АС дозволяє забезпечити необхідну точність наведення та супроводу супутників і разом з тим підвищити надійність та здешевити систему керування антенним комплексом.

Як показали результати імітаційного моделювання та експериментальних досліджень, система керування АС з частотно регульованим асинхронним електроприводом забезпечує задовільне регулювання на гармонічних траєкторіях, але виявлено недоліки регулювання при відпрацюванні прискорень на спеціальній тестовій траєкторії з різкішою зміною швидкостей (рис.3).

Менші динамічні похибки та кращу якість регулювання забезпечує метод векторного керування АД. Проте на малих кутових швидкостях значно зростає струм споживання АД, що при довготривалій роботі може призвести до його перегрівання.

Частотне регулювання АД на основі закону  $U/f = \text{const}$  із використанням  $R_s I_s$  – корекції для підтримки крутного моменту на малих обертах при правильному виборі параметрів також може використовуватися для наведення і слідкування, але в менших динамічних діапазонах. Наприклад, при наведенні й слідкуванні за геостационарними супутниками або в АС з ширшою діаграмою направленості.

Досягнена точність моделі прийнятна для дослідження властивостей АС як динамічного об'єкта керування й дозволяє синтезувати за її допомогою систему керування та досліджувати функціональні можливості, вплив параметрів регулювання на якість керування АС без використання складного об'єкта.

**Conclusions.** The use of asynchronous motors together with frequency speed regulation electronic devices in precise control systems of AS allows to ensure the required accuracy of satellites pointing and tracking, and at the same time to increase the reliability and to reduce the cost of control system for antenna complex.

The results of simulation and experimental researches shows that the control system of AS with frequency-controlled asynchronous electric drive provides a satisfactory adjustment on harmonic trajectories. Shortcomings of regulation during acceleration testing on a special test trajectory with more abrupt speeds change were found (fig.3).

The vector control method for asynchronous motors provides the smaller dynamic errors and better quality regulation. However, current consumption of AM is sufficiently increased in the low angular speeds during long-term operation and may cause the motor overheat.

A frequency AM regulation based on the law  $U/f = \text{const}$  using  $R_s I_s$  – correction for torque support low turn based on the right parameters choice also can be used for pointing and tracking of AS on a smaller dynamic ranges.

For example, the frequency regulation can be used for pointing and tracking of geostationary satellites or in AS with wider direction chart.

The achieved model accuracy is acceptable for the study of the AS properties as a dynamic management object and allows to synthesize the control system and to investigate the functionality and influence of regulation parameters on quality of the AS control without using complex object.

#### Список використаної літератури

1. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы [Текст] / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.

2. Назаренко, Д.В. Система позиционирования на базе асинхронного частотного привода на примере привода РЛС [Текст] / Д.В. Назаренко, И.А. Семко, А.С. Чуйко // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Сб. тр. по итогам VIII междунар. открытой науч. конф. – Воронеж, 2003. – Вып.8. – С.52–63.
3. AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240. – Application Report: SPRA284A, Texas Instruments, 1998.
4. Козярук, А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов [Текст] / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков // С.-Петербургская электротехническая компания. – 2004. – С.352.
5. Математическая модель асинхронной машины в фазной системе координат // Омск: ОмГТУ, 2001. – 7 с. Рук. Г.В. Мальгин, А.Г. Щербаков. ИНВ № 50200100256.
6. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст] / А.Б. Виноградов. ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
7. M. Palamar Smart Station for Data Reception of the Earth Remote Sensing [Text] // Remote Sensing - Advanced Techniques and Platforms. – Rijeka. : InTechBook, 2012. – Ch.15. – P.341–371.
8. Shneider electric [Electronic resource] / Access mode: WWW. – URL : <http://www.schneider-electric.com/products/ww/en/2900-motion-drives/2905-compact-drives/704-altivar-31/>

*Отримано 17.11.2014*