

Математичне моделювання системи електроприводу тпн-ад у пакеті matlab simulink

АНДРЮЩЕНКО О.А., БОЙКО А.О., БЕРЕСАН О.О.

Одеський національний політехнічний університет

Сформована інноваційна математична модель системи електроприводу «Тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун» в нерухомій системі $\alpha, \beta, 0$ з урахуванням нелінійностей параметрів схеми заміщення двигуна. Отримані графіки перехідних процесів, а також порівняльні показники експериментального дослідження і моделювання пуску асинхронного двигуна.

The «Thyristor voltage converter – induction motor» as a formed innovative mathematic model of the electric drive system in constant $\alpha, \beta, 0$ system with consideration of nonlinear parameters of motor replacement diagram. Achieved graphs of transient processes and comparative values of experimental investigation and simulation of asynchronous motor start.

Сформирована инновационная математическая модель системы электропривода «Тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» в неподвижной системе $\alpha, \beta, 0$ с учетом нелинейностей параметров схемы замещения двигателя. Получены графики переходных процессов, а также сравнительные показатели экспериментального исследования и моделирования пуска асинхронного двигателя.

Постановка проблеми. Сучасний асинхронний електропривод на базі тиристорних перетворювачів напруги (ТПН) використовується для формування статичних та динамічних режимів, наприклад, пуску із обмеженням прискорення, або струму статора. Ці пристрої приваблюють простотою, малими габаритами і невеликою вартістю. Широке застосування системи ТПН-АД визначає актуальність дослідження його засобами математичного моделювання. Маючи в своєму розпорядженні математичний опис процесів роботи асинхронного двигуна і перетворювача в статичному і динамічному режимах, можна отримати залежності від часу струмів статора і ротора, визначити втрати в асинхронній машині, проаналізувати можливості їх зниження при використанні енергозберігаючих алгоритмів управління електроприводом в перехідних і сталих режимах і вибрати раціональні за електроспоживанням способи і закони управління асинхронними двигунами.

Аналіз досліджень та постановка задачі. Метод математичного моделювання є найбільш поширеним методом дослідження асинхронних електроприводів з вентильними перетворювачами, завдяки високій точності і практично необмеженим можливостям з урахування нелінійностей будь-якого характеру. Відомо і використовується багато варіантів моделей асинхронного двигуна і тиристорного перетворювача напруги. Проте, розробки нових адекватних швидкодіючих моделей, оцінки необхідних для урахування параметрів і способів їх урахування, є як і раніше, актуальними. Одним з

найпоширеніших дослідницьких пакетів є MATLAB Simulink, його засобами можливе математичне моделювання практично будь-яких електромеханічних систем. Проте, вкладені бібліотеки, які описують електромеханічні перетворювачі, а перш за все асинхронний двигун мають ряд обмежень, перш за все по урахуванню нелінійності параметрів. Ці функціональні обмеження не дозволяють отримати модель системи ТПН-АД адекватну фізичним процесам в реальному електроприводі для всіх режимів роботи. Актуальною представляється створення інноваційної моделі ТПН-АД, що виконана в MATLAB Simulink, яка б, будучи нелінійною, дозволяла б вирішувати всі поставлені перед нею завдання.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1. представлена функціональна схема розімкненої системи електроприводу для випадку синхронізації вентилів ТПН з напругою мережі [1]. Асинхронний двигун представлений в нерухомій системі координат $\alpha, \beta, 0$. Напруга управління, що подається на систему електроприводу при аналоговому виконанні змінюється в межах ± 10 В. На систему імпульсно-фазового керування (СІФК) напруга керування подається при ручному керуванні від потенціометра П, а при автоматичному від датчика інтенсивності ЗІ. Кут керування вентильми

$\alpha = 120 - 12U_{\epsilon}$. Для математичного опису процесів в асинхронній машині використовуються диференціальні рівняння узагальненої двофазної машини змінного струму, отримані при загальноприйнятих припущеннях

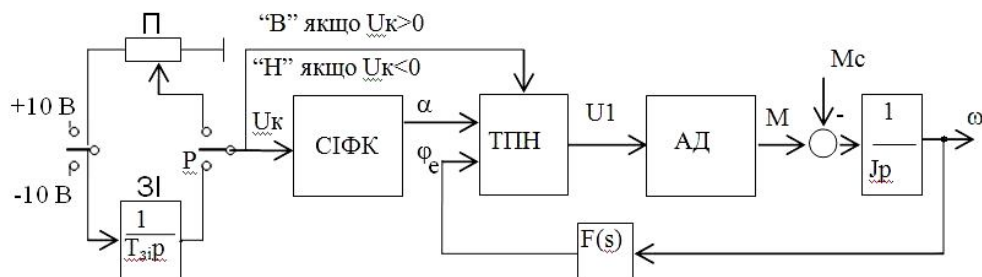


Рис. 1. Функціонально-структурна схема розімкненої системи електроприводу ТПН-АД

Рівняння рівноваги напруги ланцюгів статора і ротора мають вигляд:

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = i_{1\alpha} \cdot r_1 + \dot{\psi}_{1\alpha}; \\ U_{1\beta} = i_{1\beta} \cdot r_1 + \dot{\psi}_{1\beta}; \\ 0 = \dot{\psi}_{2\alpha} + i_{2\alpha} \cdot r_2 + \omega_2 \dot{\psi}_{2\beta}; \\ 0 = \dot{\psi}_{2\beta} + i_{2\beta} \cdot r_2 - \omega_2 \dot{\psi}_{2\alpha}. \end{cases} \quad (1)$$

Рівняння струмів статора і ротора, виражені через потокозчеплення

$$\begin{cases} i_{1\alpha} = \frac{\omega_0}{x_s x_r - x_0} (\psi_{1\alpha} x_r - \psi_{2\alpha} x_0); \\ i_{1\beta} = \frac{\omega_0}{x_s x_r - x_0} (\psi_{1\beta} x_r - \psi_{2\beta} x_0); \\ i_{2\alpha} = \frac{\omega_0}{x_s x_r - x_0} (\psi_{2\alpha} x_s - \psi_{1\alpha} x_0); \\ i_{2\beta} = \frac{\omega_0}{x_s x_r - x_0} (\psi_{2\beta} x_s - \psi_{1\beta} x_0). \end{cases} \quad (2)$$

Електромагнітний момент двигуна і рівняння руху

$$M_{em} = \frac{3 p \delta \omega_0 x_0}{2 (x_s x_r - x_0)} (\psi_{2\alpha} \psi_{1\beta} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}); \quad (3)$$

$$M_{em} - M_s = J_{\Sigma} \dot{\omega}_r, \quad (4)$$

де r_1, r_2 - активні опори фази обмотки статора і, приведені, ротора, Ом; x_0 - індуктивний опір контуру намагнічування, Ом; $x_s = x_1 + x_0$; $x_r = x_2 + x_0$ - повні індуктивні опори статора і ротора, Ом; $\psi_{i,j}; \dot{\psi}_{i,j}$ - потокозчеплення статора і ротора (i) по осях моделі (j) та їх похідні, В·с; ω_0, ω_2 - кутова частота обертання синхронна і ротора, 1/с; p_p - число пар полюсів АД.

На основі даних рівнянь в пакеті MATLAB Simulink була сформована інноваційна математична модель асинхронного двигуна в нерухомій системі α, β, θ з урахуванням нелінійностей, рис. 2.

Методика урахування ефекту витіснення струму при моделюванні АД, ґрунтується на використанні опорів ротора в режимі короткого замикання – R_k, X_k . Надалі ці параметри уточнюються в залежності від поточного значення ковзання. При роботі АД в області номінального ковзання використовуються розрахункові опори

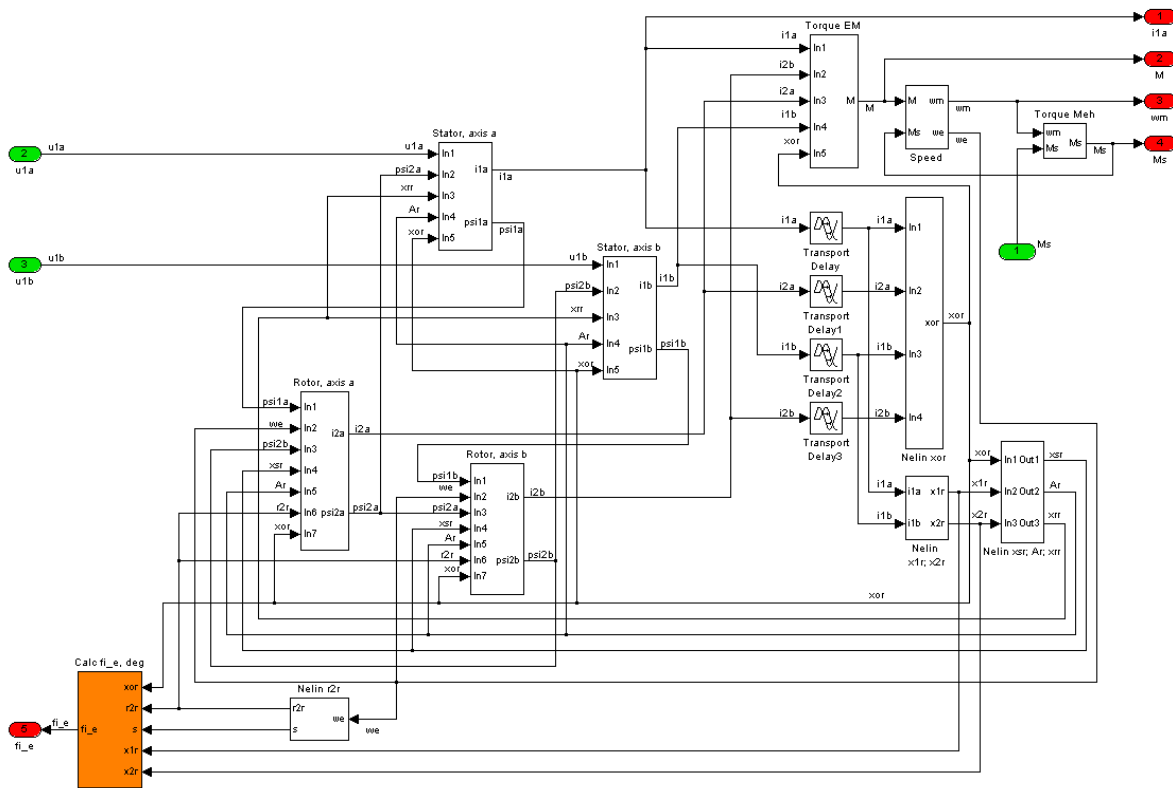


Рис. 2. Математична модель асинхронного двигуна

R_H, X_H , які відповідають номінальному режиму роботи. Функціональна залежність опорів від ковзання в області між R_k і R_H, X_k і X_H є нелінійною. При проектуванні асин-

хронних машин для зниження маси АД робоча точка номінального режиму вибирається на нелінійній ділянці характеристики намагнічування. Ще більше ефект на-

сичення має прояви в перехідних процесах, коли миттєве значення узагальненого вектору поточкозчеплення може набагато перевищувати номінальне. Урахування насичення проводиться за допомогою кривих, що визначають залежність опору контуру намагнічування від струму намагнічування $X_{\mu}^* = f(I_{\mu}^*)$, які визначені експериментально [2], і для зручності відображені у відносних одиницях.

Для урахування насичення по шляху головного магнітного потоку АД необхідно за допомогою поточного корегуючого коефіцієнта X_{μ}^* визначити нове значення опору контуру намагнічування

$$X_{\mu} = X_{\mu}^* \cdot X_{\mu i}, \quad (5)$$

де $X_{\mu i}$ - індуктивний опір контуру намагнічування в номінальному режимі.

Кратність струму намагнічування визначається відношенням поточного значення амплітуди струму намагнічування до номінального значення

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu \max}}{I_{\mu i}}, \quad (6)$$

Номінальне значення струму намагнічування

$$I_{\mu i} = \frac{U_i}{\sqrt{(X_{\mu} + X_1)^2 + R_1^2}}, \quad (7)$$

де U_i - номінальна напруга АД, В; X_{μ}, X_1, R_1 - параметри схеми заміщення АД, Ом.

Поточне значення амплітуди струму намагнічування визначається на кожному кроці розрахунку

$$I_{\mu \max} = \sqrt{I_{\mu \alpha}^2 + I_{\mu \beta}^2}, \quad (8)$$

де $I_{\mu \alpha}, I_{\mu \beta}$ - розрахункові струми намагнічування по осях координат α і β .

Для урахування насичення по шляхах розсіювання можливе використання коефіцієнта насичення $K_{нас} = \frac{X_K}{X_1}$, який, у свою чергу, залежить від величини струму короткого замикання і може бути заданий в графічному або табличному вигляді.

Модель системи «Тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун» показана на рис. 3.

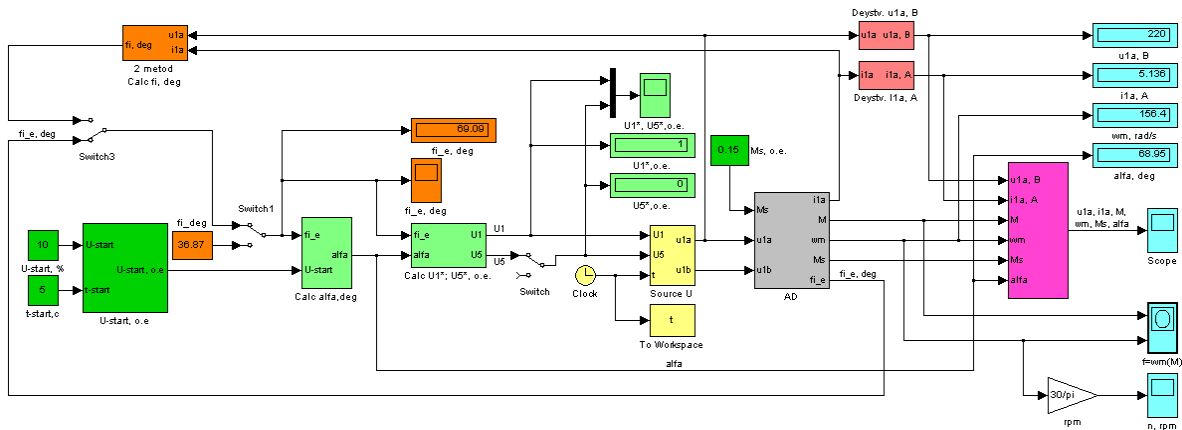


Рис. 3. Математична модель системи ТПН-АД

Тиристорний перетворювач напруги представлений як джерело полігармонічних напруг. Для адекватного відображення фізичних процесів в електроприводі достатньо на модель АД подавати першу, основну гармонічну складову U_{1TPH} та п'яту U_{5TPH} [1]. В розробленій математичній моделі ТПН-АД реалізована система керування, яка забезпечує функціональну залежність між напругою керування U_k і вихідною напругою ТПН, при чому дія внутрішнього зворотного зв'язку автоматично компенсується відповідними змінами поточного кута керування α . Для реалізації такої системи використовувалась відома аналітична залежність $U_{1TPH} = f(\alpha, \varphi_e)$ [1,2], яка була перетворена до вигляду $\alpha = f(U_{1TPH}, \varphi_e)$, де керуючою дією являється U_{1TPH} , збудуючою дією є фаза струму φ_e , а кут включення вентилів α автоматично розраховується для підтримки заданої напруги, незалежно від поточної фази струму статора АД [2].

$$U_{1TPH} = A_0 + A_1 \cdot \alpha + A_2 \cdot \alpha^2, \quad (9)$$

де A_0, A_1, A_2 – коефіцієнти рівняння регресії

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= -0,1291 + 0,06165 \cdot \varphi_e - 7,2407 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi_e^2 \\ A_1 &= 0,02723 - 1,5212 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi_e + 2,038 \cdot 10^{-5} \cdot \varphi_e^2 \\ A_2 &= -2,1534 \cdot 10^{-4} + 8,2836 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi_e - 1,194 \cdot 10^{-7} \cdot \varphi_e^2 \end{aligned} \right\} (10)$$

В виразах (9) і (10) кутові величини вимірюються в електричних градусах, а вихідна напруга у відносних одиницях. Аналогічно визначається відносна напруга п'ятої гармоніки U_5 . Таким чином, задаючи початкове значення напруги $U-start$ у відсотках та час її наростання $t-start$ до номінальної, маємо, в залежності від вирішуваного завдання, амплітуду першої та п'ятої гармонійної складової напруги, яка поступає на модель асинхронного двигуна. Застосовані в моделі пристрої

індикації та візуалізації потрібних величин дають змогу наглядно слідкувати за їх зміною у реальному часі.

При дослідженні розробленої моделі виконувалася плавний пуск АД з різноманітними початковими умовами.

В результаті отримані графіки перехідних процесів приведені на рис 4(б) та рис 5(б). При моделюванні обирались такі умови та параметри пускового режиму, які характерні для софтстартера DM4 фірми Moeller із метою можливості їх співставлення. Експериментальні дослідження аналогічних режимів були проведені на спеціально розробленому стенді. Значення струму двигуна I_1 та швидкість обертання валу ω були отримані в цифровому вигляді завдяки використанню аналогово-цифрового перетворювача NI-Speed USB Carrier (NI USB-9162) фірми NATIONAL INSTRUMENTS. З пристрою дані надходили до персонального комп'ютера і оброблялись в

програмі LabVIEW. В результаті були отримані осцилограми струму статора I_1 та швидкості обертання валу ω (рис 4 (а) та рис 5(а)).

Порівняльні показники експериментального дослідження і моделювання пуску АД при $U\text{-start}=10\%$, $t\text{-start}=5\text{с}$, $J=10J_{\text{дв}}$, $M_c=0$ наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Час $t, \text{с}$	Швидкість обертання валу двигуна ω , рад/с		Відносна похибка, %
	Експеримент	Моделювання	
1	7,28	4,56	37,36
2	29,81	27,99	6,1
3	96,5	102,84	6,57
4	153,9	157,02	2,03

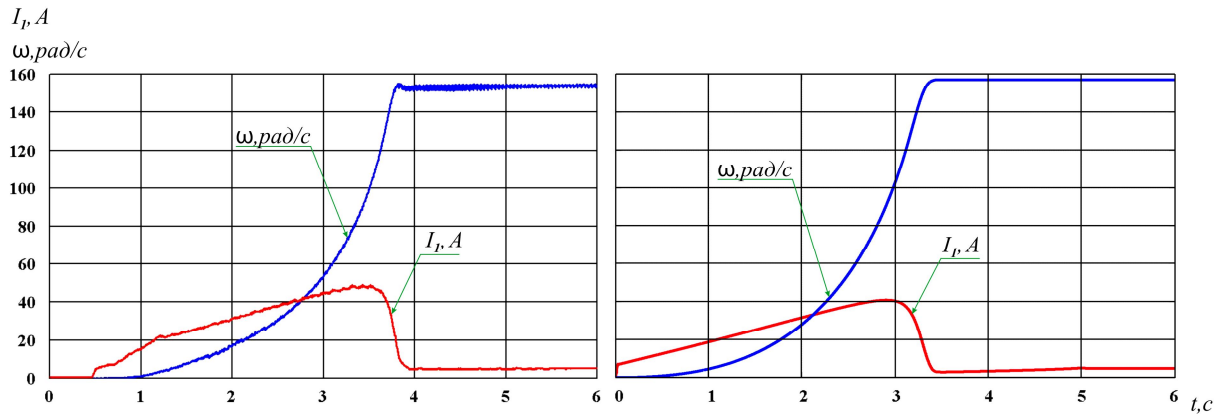


Рис. 4. Осцилограми струму статора I_1 та швидкості обертання валу ω при $U\text{-start} = 10\%$, $t\text{-start}=5\text{с}$, $J=10J_{\text{дв}}$, $M_c=0,01M_n$, АИРХМ132S4У3: а) - експеримент; б) - моделювання

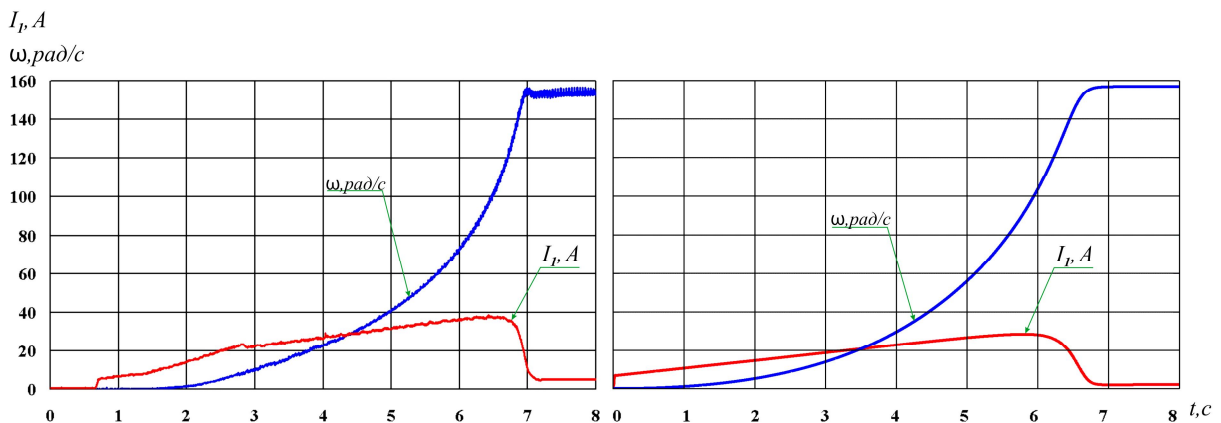


Рис. 5. Осцилограми струму статора I_1 та швидкості обертання валу ω при $U\text{-start} = 10\%$, $t\text{-start}=15\text{с}$, $J=10J_{\text{дв}}$, $M_c=0,01M_n$, АИРХМ132S4У3: а) - експеримент; б) - моделювання

Висновки

Результатом даної роботи є інноваційна математична модель електропривода «Тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун» в середовищі Simulink програмного пакета MATLAB. Адекватність

розробленої моделі фізичним процесам в реальному електроприводі ТПН-АД перевірена і підтверджена проведеними експериментами. Модель може застосовуватися для подальших досліджень електроприводу системи ТПН-АД в статичних та динамічних режимах.