

3. Кувшинов, В. В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 [Текст] / В. В. Кувшинов, Е. Г. Какушина, А. Г. Косий // Энергетические установки и технологии. – 2017. – Т.3. – №3. – С. 73–78.
4. Патент України по заявці № а2006 06729, МПК 7 H02 К 1/12, Буферний накопичувач кінетичної енергії / М. Я. Житник, Ю. І. Ліпський, С. В. Плаксін, Л. М. Погоріла, І. І. Соколовський; власник Інститут транспортних систем і технологій НАНУ «Трансмаг». – від 16.06.2006.
5. Будник, В. С. Инерционные механические энергоаккумулирующие системы [Текст] / В. С. Будник, Н. Ф. Свириденко, В. Н. Кузнецов и др. – К.: Наукова думка, 1986. – 176 с.
6. Накопители энергии: Учебное пособие для вузов [Текст] / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. // Под ред. Д. А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
7. Белый, П. Н. Моментный магнитоэлектрический двигатель дисковой конструкции [Текст] / П. Н. Белый. // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 4. – С. 74–77.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 621.311.004

А. А. Колб, Ант. А. Колб, Д.В. Циленков канд-ти техн. наук

(Україна, Дніпро, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка")

А.В. Бобров кан-т техн. наук

(Україна, Дніпро, Коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара)

ВПЛИВ ВНУТРІШНІХ І ПЕРЕХРЕСНИХ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ НА ДИНАМІКУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Анотація. *Можливість регулювання миттєвих значень потокозчеплення і моменту двигуна дозволяє реалізувати швидкодіючі приводи з високою точністю регулювання в сталому і перехідному режимах. Отримано рівняння асинхронного двигуна в обертовий з синхронною швидкістю системою координат x, y , дійсна вісь якої орієнтована по потокозчепленню ротора. На основі наведених рівнянь наведена структурна схема асинхронного двигуна з синхронно обертовою системою координат, орієнтованою по вектору потокозчеплення ротора. Розроблена функціональна схема регулювання моменту та потоку асинхронного двигуна на основі АІН з ШІМ та структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі АІН-ШІМ.*

Ключові слова: асинхронний електропривод, потокозчеплення, частотне регулювання.

Аннотация. *Возможность регулирования мгновенных значений потокозчепления и момента двигателя позволяет реализовать быстродействующие приводы с высокой точностью регулирования в установившемся и переходном режимах. Получены уравнения асинхронного двигателя во вращающейся с синхронной скоростью системой координат x, y , действительная ось которой ориентирована по потокозчеплению ротора. На основе приведенных уравнений получена структурная схема асинхронного двигателя в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору потокозчепления ротора. Разработана функциональная схема регулирования момента и потока асинхронного двигателя на основе АИИ с ШИМ и структурная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе АИИ-ШИМ.*

Ключевые слова: асинхронный электропривод, потокозчепление, частотное регулирование.

Abstract. *The ability to control the instantaneous values of the flux linkage and the motor torque makes it possible to realize high-speed drives with high control accuracy in the steady state and transient modes. The equations of an asynchronous engine are obtained in a coordinate system x, y rotating at a synchronous speed, whose real axis is oriented along the rotor flux linkage. Based on the above equations, a structural diagram of an asynchronous motor in a synchronously rotating coordinate system oriented along the rotor flux linkage vector is obtained. A functional scheme for controlling the moment and flow of an asynchronous motor based on AVI with PWM and a block diagram of a frequency-controlled asynchronous electric drive based on AVI-PWM has been developed.*

Keywords: asynchronous electric drive, linkage, frequency regulation.

Актуальність роботи. Тенденція розвитку частотно-регульованих приводів така, що область їх застосування постійно розширюється. Можливість регулювання миттєвих значень потокозчеплення і мо-

менту двигуна дозволяє реалізувати швидкодіючі приводи з високою точністю регулювання в сталому і перехідному режимах.

Основною областю застосування векторного управління є приводи з напруженими динамічними режимами роботи, які вимагають великого діапазону регулювання швидкості і високої швидкодії.

Метою роботи є дослідження впливу чотирьох внутрішніх і перехресних зв'язків, три з яких є нелінійними, на динамічні показники асинхронного електроприводу на основі АІН з ШІМ.

Матеріали і результати досліджень. В обертовій з синхронною швидкістю системі координат x, y дійсна вісь x може бути орієнтована по одному з основних векторів: $\bar{U}_1, \bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$, а уявна вісь y упереджає вісь x на 90° . Оскільки в усталеному режимі просторові вектори взаємно нерухомі (при синусоїдальній напрузі живлення), то система координат, орієнтована по одному з вказаних векторів, придатна для синтезу регуляторів та оптимізації приводу.

Додаткові переваги, з погляду простоти уявлення асинхронного двигуна як об'єкту регулювання й синтезу регуляторів, одержуються в синхронно обертовій системі координат, вісь x якої орієнтована по потокозчепленню ротора. Це зумовлено тим, що при будь-якій іншій орієнтації системи координат потокозчеплення ротора визначається як сума проєкцій векторів струмів статора і ротора на напрям вектора потокозчеплення ротора. Лише у тому випадку, коли як опорний вектор вибрано потокозчеплення ротора, проєкція струму ротора на цю вісь буде дорівнювати нулю. Внаслідок цього потокозчеплення ротора залежить тільки від проєкції струму статора на вісь x (потокостворююча складова), а інша проєкція на вісь y є при цьому моментостворюючою складовою. При записі рівнянь у системі координат x, y асинхронний двигун описується такими ж рівняннями, як і двигун постійного струму. При цьому складова струму статора i_{1x} виконує роль струму збудження. Складова i_{1y} аналогічно струму якоря взаємодіє з потокозчепленням ротора і створює електромагнітний момент. Це надає можливості роздільного керування потокозчепленням і моментом двигуна. Керування асинхронним двигуном стає таким же, як і машиною постійного струму, з тією лише різницею, що обидві регульовані змінні є проєкціями i_{1x} і i_{1y} одного і того ж струму статора.

Для отримання рівнянь асинхронного двигуна в обертовій з синхронною швидкістю $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ (де ω_1 кутова частота напруги живлення або швидкість ідеального холостого ходу двополосної узагальненої машини) системою координат x, y , дійсна вісь якої орієнтована по потокозчепленню ротора, використовуються початкові рівняння (1-5) [1, 2].

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + \frac{d\bar{\psi}_1}{dt}; \quad (1)$$

$$0 = \bar{I}_2 R_2' + \frac{d\bar{\psi}_2}{dt}; \quad (2)$$

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 L_1 + \bar{I}_2 L_m = \bar{\psi}_m + L_{1\sigma} \bar{I}_1 = k_2 \bar{\psi}_2 + \bar{I}_1 L_{1n}; \quad (3)$$

$$\bar{\psi}_2 = \bar{I}_2 L_2 + \bar{I}_1 L_m = \bar{\psi}_m + L_{2\sigma} \bar{I}_2 = k_1 \bar{\psi}_1 + \bar{I}_2 L_{2n}; \quad (4)$$

$$\bar{\psi}_m = \bar{\psi}_1 - L_{1\sigma} \bar{I}_1 = k_2 (\bar{\psi}_2 + \bar{I}_1 L_{2\sigma}), \quad (5)$$

де \bar{I}_1, \bar{I}_2 – узагальнені вектори струмів статора і ротора; $\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$ – узагальнені вектори потокозчеплення статора і ротора; $L_1 = L_m + L_{1\sigma}, L_2 = L_m + L_{2\sigma}$ – повна індуктивність статора і ротора в результаті дії трьох фаз; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивність розсіювання обмоток статора і ротора; $L_m = \frac{3}{2} L_{1,2}$ – еквівалентна взаємна індуктивність статора і ротора в результаті дії трьох фаз, яка у півтора рази більше взаємної індуктивності $L_{1,2}$ окремо взятої фази.

Згідно виразів (3) та (4) маємо:

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 L_{1n} + K_2 \bar{\psi}_2; \quad (6)$$

$$\bar{I}_2 = K_2 (\bar{\psi}_2 / L_m - \bar{I}_1), \quad (7)$$

де $L_{1n} = L_1 - L_m^2 / L_2$ – перехідна індуктивність кола статора; $K_2 = L_m / L_2$ – коефіцієнт зв'язку обмоток ротора.

З спільного вирішення наведених виразів отримаємо після перетворень

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \bar{I}_1 R_1' (1 + pT_1') + j\bar{I}_1 L_{1n} \omega_1 + jK_2 Z_n \omega \bar{\psi}_2 - K_2 \frac{\psi_2}{T_2}; \\ 0 &= \frac{\bar{\psi}_2 R_2'}{L_2} - K_2 R_2' \bar{I}_1 + p\bar{\psi}_2 + j(\omega_1 - Z_n \omega) \cdot \bar{\psi}_2, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де $T_1' = L_{1n} / R_1'$ – перехідна стала часу; $R_1' = R_1 + R_2' K_2^2$.

Розкладаючи (8) на дійсну і уявну складові, отримаємо з урахуванням $\psi_{2y} = 0$:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= i_{1x}R_1'(1 + pT_1') - i_{1y}L_{1n}\omega_1 - \frac{K_2}{T_2}\psi_{2x}, \\ U_{1y} &= i_{1y}R_1'(1 + pT_1') + i_{1x}L_{1n}\omega_1 + K_2Z_n\omega\psi_{2x}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{2x}(1 + pT_2) &= L_m i_{1x}; \\ \psi_{2x}\omega_2 &= i_{1y}R_2'K_2 \quad \text{або} \quad \psi_{2x}(\omega_1 - Z_n\omega) = i_{1y}R_2'K_2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де $\omega_2 = \omega_1 - Z_n\omega$ – частота струму ротора; $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ стала часу кола ротора.

На основі наведених рівнянь на рис.1 наведена структурна схема асинхронного двигуна з синхронно обертовою системою координат, орієнтованою по вектору потокозчеплення ротора.

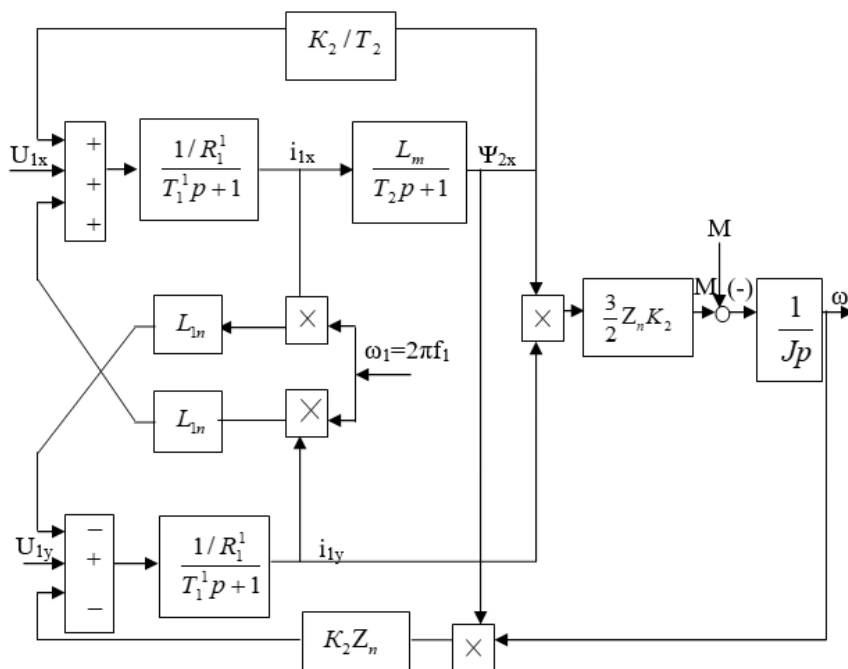


Рис. 1. Структурна схема асинхронного двигуна в синхронно обертовій системі координат, орієнтованій по вектору потокозчеплення ротора

Структурна схема асинхронного двигуна в синхронно обертовій системі координат, орієнтованій по потокозчепленню ротора, має найменшу кількість перехресних зв'язків, простий вираз для моменту двигуна, відсутні нелінійності в прямому каналі регулювання. Головною перевагою цієї структурної схеми є те, що вона містить лише одну складову потокозчеплення. Передаточні функції регуляторів є найпростішими, хоча через наявність перехресних зв'язків не вдається їх синтезувати класичним способом.

Отже, в обертових та орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора осях x, y реальні напруги, що прикладені до обмоток статора, перетворюються в постійну напругу $U_{1x} = U_{\phi,max}$, прикладену лише до обмотки по осі x. До обмотки, розташованої по осі y, прикладена напруга дорівнює нулю. Це пояснюється тим, що обертове магнітне поле в обертовій системі координат може створюватися постійним струмом.

На рис. 2 наведена функціональна схема регулювання моменту та потоку асинхронного двигуна. Відповідно до принципу підпорядкованого регулювання координат САР містить два канали керування (потоку та моменту). Внутрішніми регуляторами обох каналів є регулятори струмів i_{1x} і i_{1y} , на виході яких здійснюється компенсація основних перехресних зв'язків. Аналогічним чином компенсуються внутрішні зворотні зв'язки по ψ_2 . Зовнішнім контуром регулятора моменту є регулятор швидкості.

На рис. 3 наведена структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі АІН-ІШМ.

Передаточні функції регуляторів з урахуванням позначень рис.3 мають вигляд:

– регулятори струму по осях x і y

$$W_{pc} = \frac{T_1'p+1}{a_c T_{\mu} K_{np} K_c (1/R_1')p};$$

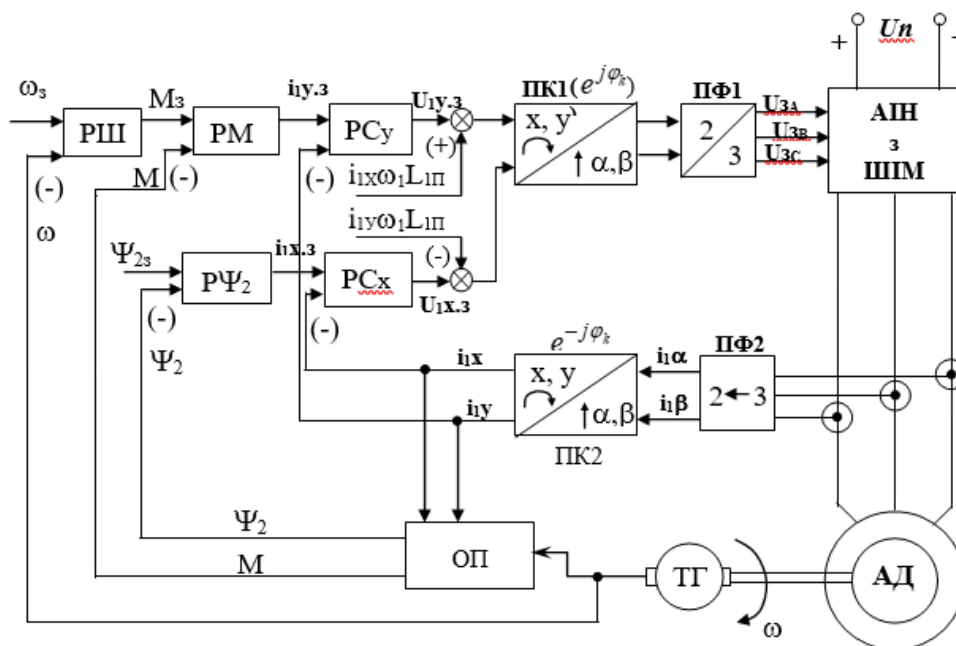


Рис. 2. Функціональна схема регулювання моменту та потоку асинхронного двигуна на основі АИH з ШИМ:
 ОП – обчислювальний пристрій; $i_x\omega_1 L_{1п}$, $i_y\omega_1 L_{1п}$ – компенсація перехресних зв'язків;
 ПК1...ПК2 – перетворювачі координат; ПФ1...ПФ2 – перетворювачі фаз

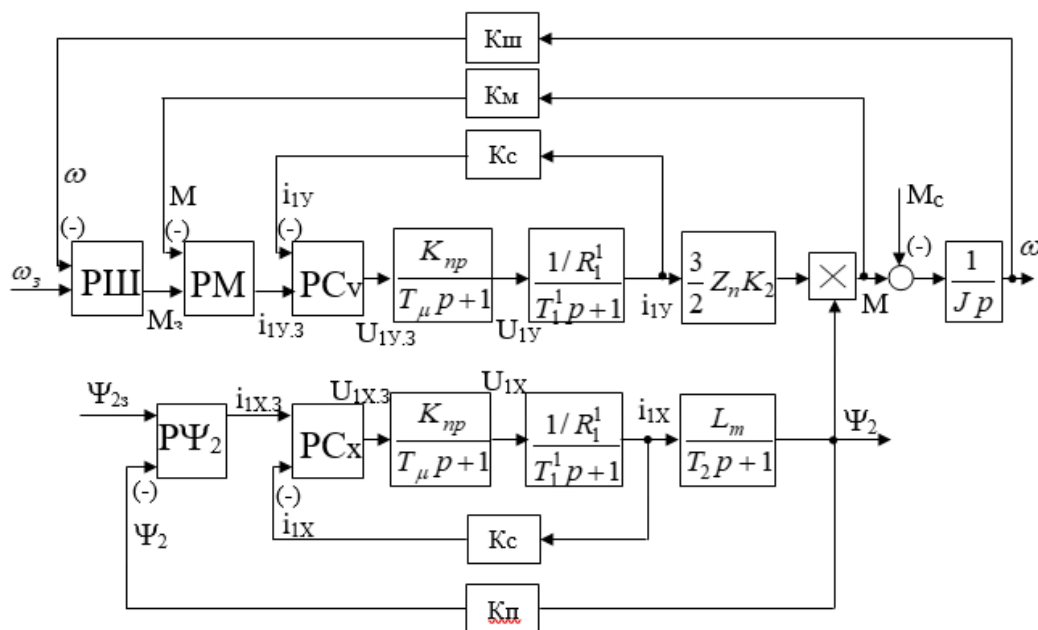


Рис. 3. Структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу на базі АИH з ШИМ

– регулятор моменту

$$W_{p.m} = \frac{K_c}{a_c a_m T_\mu K_m K_p}; \text{ де } K = \frac{3}{2} Z_n \psi_2 K_2;$$

– регулятор швидкості (пропорційний)

$$W_{p.w} = \frac{J}{a_w a_c a_m T_\mu K_w (1/K_m)} = K_{pш};$$

– ПІ-регулятор швидкості

$$W_{p,ш} = K_{pш} \frac{4T_{мш}^{p+1}}{T_{мш}^p};$$

– регулятор потоку ψ_2

$$W_{p\psi} = \frac{T_2^{p+1}}{a_c a_\psi T_\mu (1/K_c) L_m K_{np}},$$

де $K_{np} = U_{кн}/U_d$ – коефіцієнт передачі перетворювача; $U_{кн}, U_d$ – номінальна напруга керування й у ланці постійного струму; $T_{мш} = a_{ш} a_c a_m T_\mu$. Для розглянутої схеми некомпенсована мала стала часу внутрішнього контуру струму приймається $T_\mu = 0,001 \dots 0,002$ с.

Висновки.

Комп'ютерне моделювання динаміки асинхронного електроприводу на підставі структурної схеми рис.3 показало:

1. Задовільна компенсація перехресних зворотних зв'язків вимагає високої швидкодії як вимірюваних цих сигналів, так і внутрішніх контурів регулювання.
2. Найбільший вплив на характер перехідних процесів роблять перехресні зворотні зв'язки.
3. При високій швидкодії внутрішніх контурів ($T_\mu = 0,001 - 0,002$ с) і достатній резерв напруги в колі постійного струму вплив перехресних зв'язків на динамічні процеси стає незначним.

Список використаних джерел

1. Колб Ант. А. Теорія електроприводу [Текст]: навч. посібник / Ант. А. Колб, А.А. Колб. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Д., Національний гірничий університет, 2011. – 565 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер.с нем.-М.-Л.:Госэнергоиздат, 1963. – 744с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 621-926

В.А. Бородай, канд. техн. наук, Р.О. Боровик, Д.О. Шепетько

(Україна, Дніпро, Національний технічний університет „Дніпровська політехніка”)

РАЦІОНАЛЬНА СХЕМА ЗБУДЖЕННЯ З НЕПРЯМИМ РОЗЦЕПЛЕННЯМ І КОНДЕНСАТОРАМИ ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ПРИВОДІВ З ГАРАНТОВАНИМ ЗАПУСКОМ

Анотація. Запропоновано результати пошуку раціонального схемного рішення системи збудження із непрямим розщепленням і однаковими ємностями при регулюванні числа вільних від конденсаторів полюсів, що забезпечить гарантований запуск і синхронізацію потужних синхронних приводів механізмів з важким пуском за умови одночасного зниження масо-габаритних показників зосереджено-розподілених реактивних компонентів.

Ключові слова: механізми з важким пуском, потужний синхронний привід, система збудження із непрямим розщепленням і однотипними конденсаторами, резонансні режими роботи збудження, раціональна схема системи збудження.

Аннотация. Предложены результаты поиска рационального схемного решения системы возбуждения с косвенным расщеплением и одинаковыми емкостями при регулировании числа свободных от конденсаторов полюсов, что обеспечит гарантированный запуск и синхронизацию мощных синхронных приводов механизмов с тяжелым пуском при условии одновременного уменьшения массо-габаритных показателей сосредоточенно-распределенных реактивных компонентов.

Ключевые слова: механизмы с тяжелым пуском, мощный синхронный привод, система возбуждения с косвенным расщеплением и однотипными конденсаторами, резонансные режимы работы возбуждения, рациональная схема системы возбуждения.