

# **Вдосконалення системи векторного керування асинхронним двигуном при роботі на низьких кутових швидкостях**

**Керівник: к.т.н., доц.**

**Богачук В.В.**

**Виконав: ст. гр. ЕПА-18м**

**Ідальго Кішпе Педро Давід**

# Мета роботи, об'єкт та предмет дослідження, задачі дослідження

**Мета роботи** полягає в покращенні основних характеристик якості керування асинхронних електродвигунів шляхом застосування векторного керування з безсенсорним визначенням кутової швидкості та потокозчеплення.

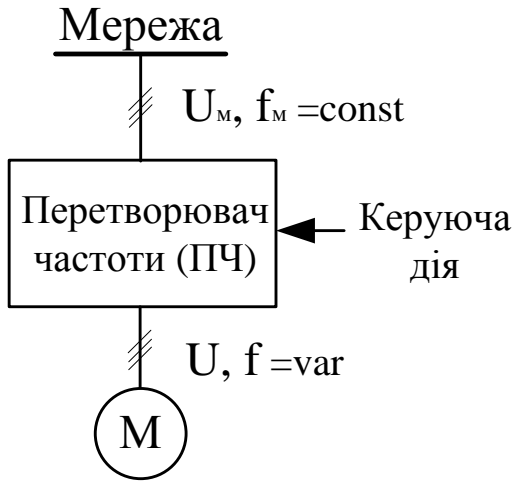
**Об'єктом дослідження** є динамічні процеси у асинхронному електроприводі з векторним керуванням при роботі на низькій кутовій швидкості та процеси у автономному інверторі з широтно-імпульсною модуляцією, що живить його.

**Предметом дослідження** є способи непрямого бездатчикового визначення частоти обертання ротора та потокозчеплення асинхронного двигуна.

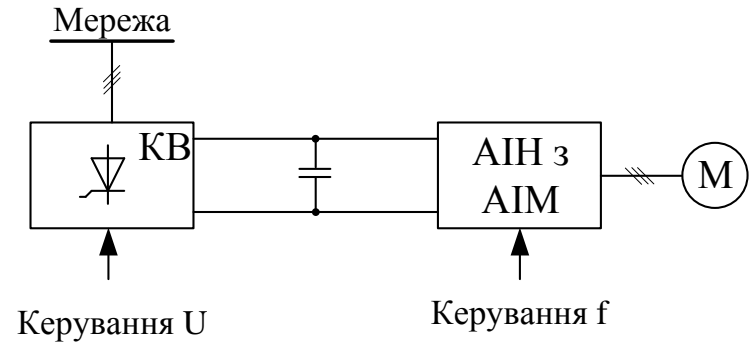
## **Задачі дослідження:**

- аналіз стану проблеми і постановка завдання дослідження;
- дослідження впливу нелінійних властивостей інвертора напруги при роботі двигуна на низьких кутових швидкостях;
- бездатчикове оцінювання кутової швидкості та потокозчеплення на низькій кутовій швидкості.

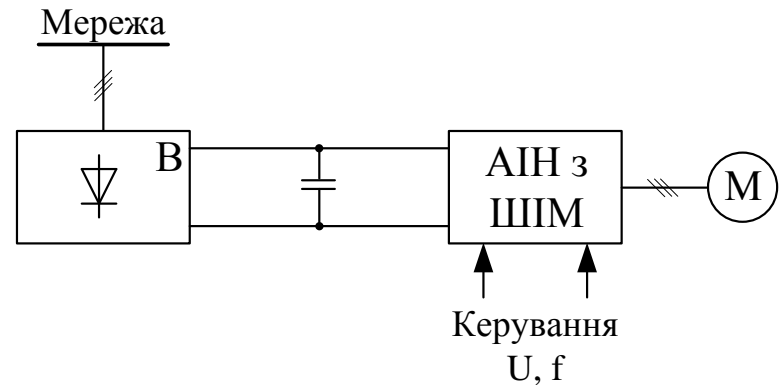
# Принципи побудови перетворювачів частоти



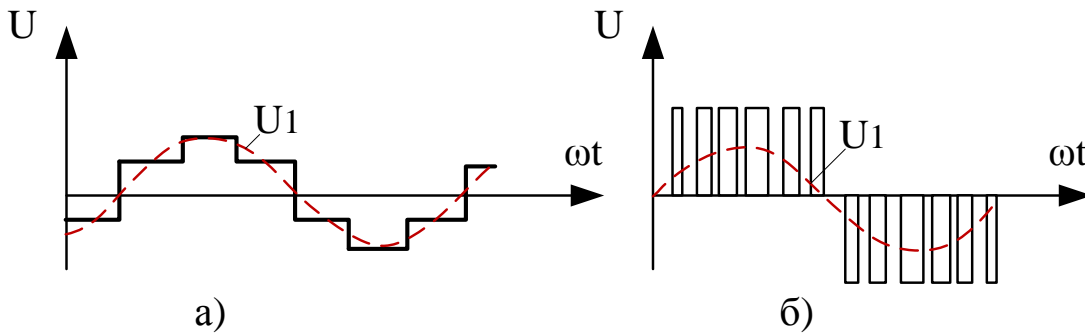
Узагальнена структура частотно-регульованого ЕП



Типова структура ПЧ з АІН при АІМ



Типова структурна схема ПЧ з АІН при ШІМ

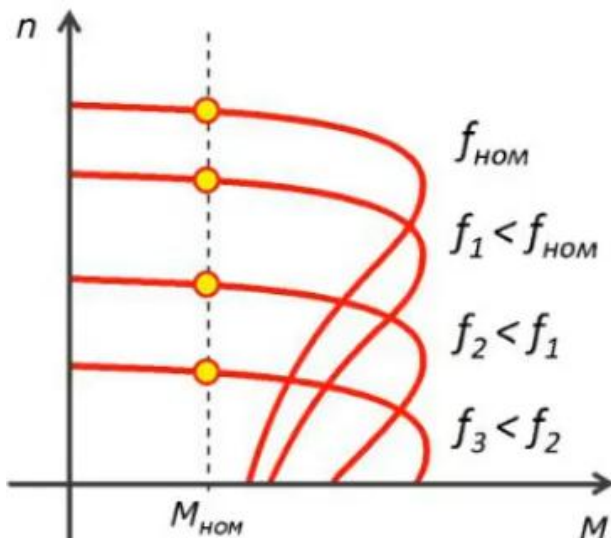


Діаграми вихідних напруг АІН при АІМ (а) та ШІМ (б)

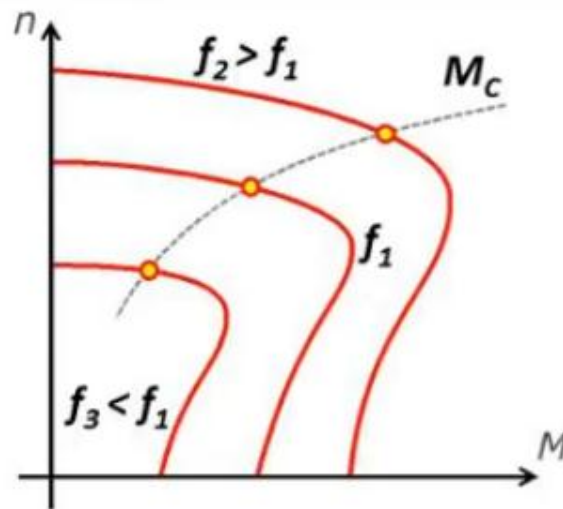
# Скалярне керуванням швидкістю асинхронного двигуна

Скалярним керуванням швидкістю асинхронного двигуна називають таке керування, при якому зміна швидкості досягається шляхом впливу на частоту напруги статора при одночасній зміні діючого значення цієї напруги

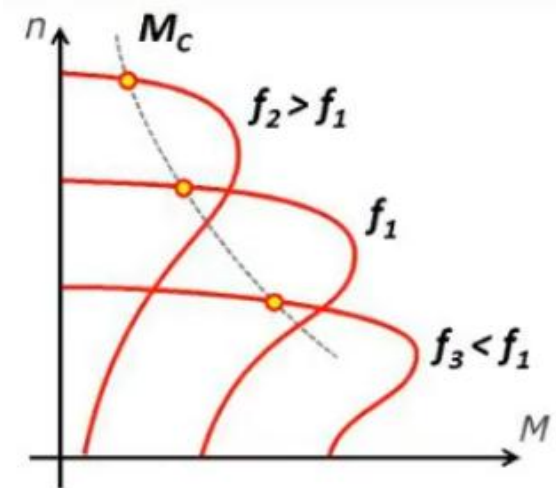
$$\frac{U_1}{U_{1\text{НОМ}}} = \frac{f_1}{f_{1\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{M_c}{M_{c\text{НОМ}}}}$$



Механічні характеристики АД при закон керування  $U_1/f_1 = \text{const}$



Механічні характеристики АД при закон керування  $U_1/f_1^2 = \text{const}$

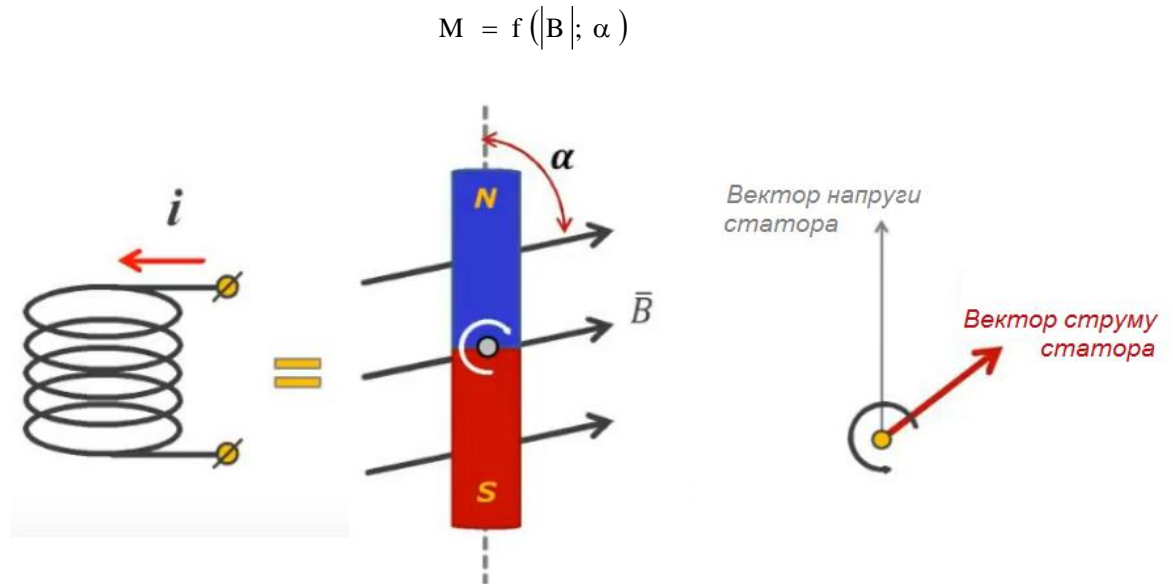


Механічні характеристики АД при закон керування  $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$

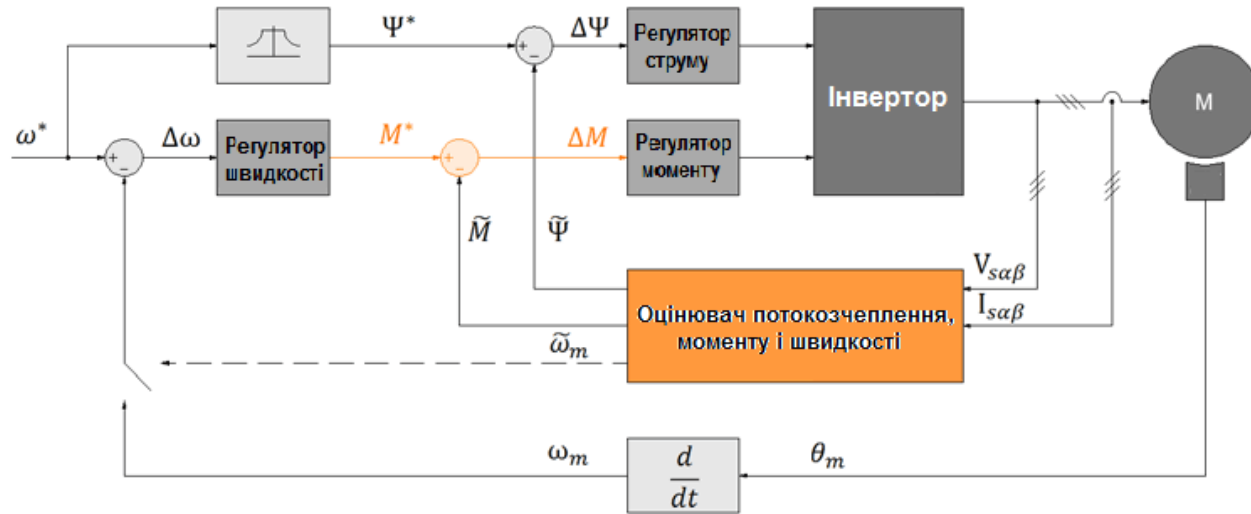
# Векторне керування швидкістю асинхронного двигуна

Головна ідея **векторного** керування полягає в тому, щоб контролювати не тільки величину і частоту напруги живлення, але і фазу (керувати моментом двигуна шляхом зміни вектора струму статора)

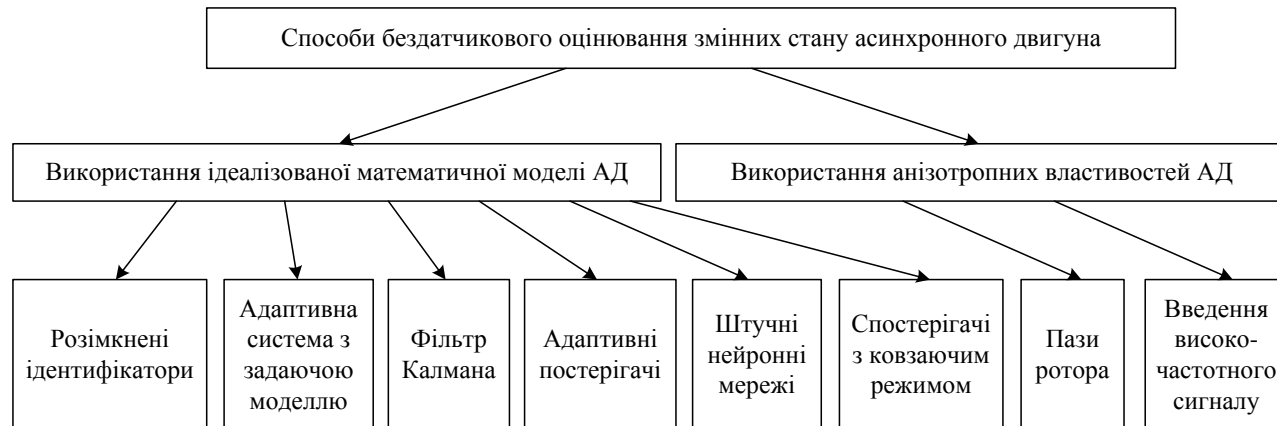
$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{ds}}{dt} &= U_{ds} - R_s i_{ds} + \omega \psi_{qs}, \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} &= U_{qs} - R_s i_{qs} + \omega \psi_{ds}, \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= U_{dr} - R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \psi_{qr}, \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= U_{qr} - R_r i_{qr} - (\omega - \omega_r) \psi_{dr}, \\ \psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr}, \\ \psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr}, \\ \psi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds}, \\ \psi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs}, \\ M_e &= \frac{3}{2} p (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}), \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (M_e - M_{cr}). \end{aligned} \right.$$



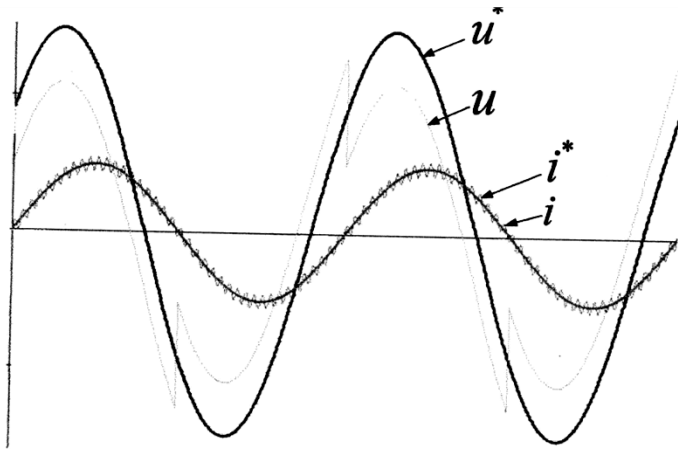
# Бездатчикове векторне керуванням швидкістю асинхронного двигуна



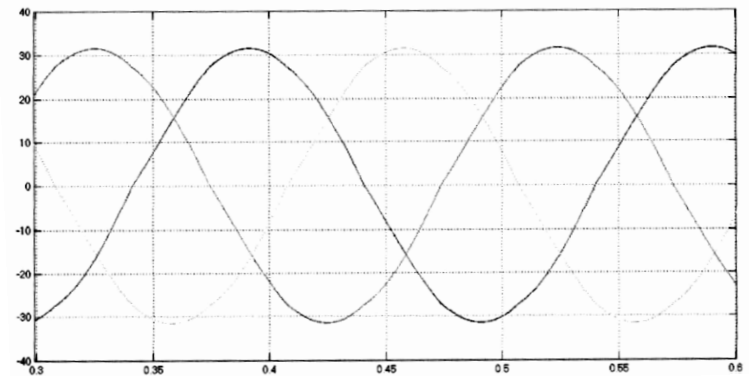
Загальна функціональна схема векторного керування



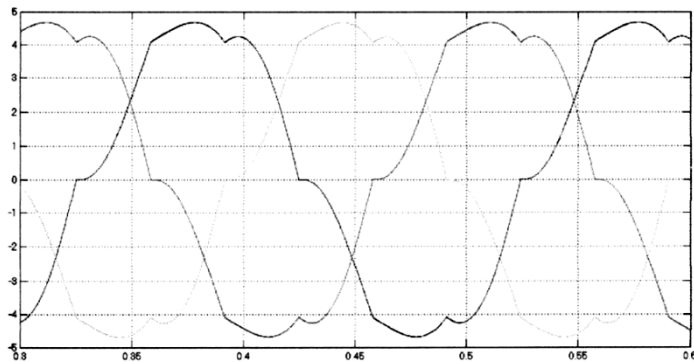
# Вплив нелінійних властивостей автономного інвертора напруги з широтно-імпульсною модуляцією



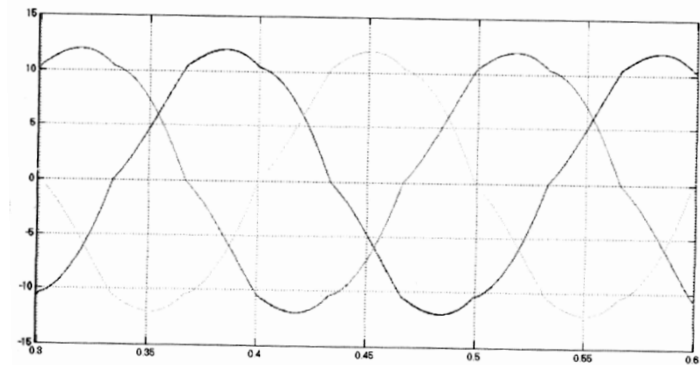
Вплив «мертвого часу» на вихідну напругу інвертора



Графік вихідного струму інвертора напруги при коефіцієнті модуляції 0,2



Графік вихідного струму інвертора напруги при коефіцієнті модуляції 0,067



Графік вихідного струму інвертора напруги при коефіцієнті модуляції 0,1

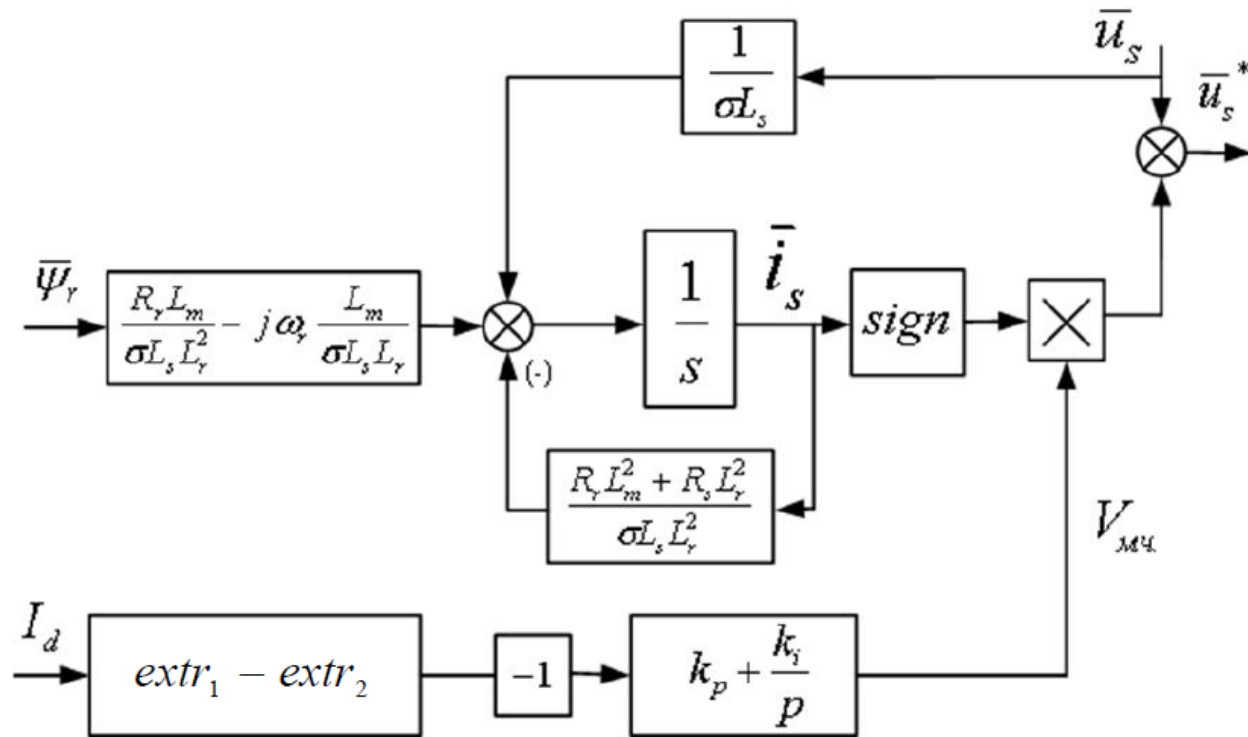
# Адаптивний спостерігач струму статора асинхронного двигуна

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{i}_s}{dt} = -\frac{R_r L_m^2 + R_s L_r^2}{\sigma L_s L_r} \bar{i}_s + \frac{1}{\sigma L_s} \bar{u}_s + \\ + \left( \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r^2} - j\omega_r \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \right) \bar{\psi}_r; \\ \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} = \frac{R_r}{L_r} (L_m \bar{i}_s - \bar{\psi}_r) + j\omega_r \bar{\psi}_r, \end{array} \right.$$

де  $R_s, R_r, L_m, L_s, L_r$  – активні опори та індуктивності схеми заміщення асинхронного двигуна;  $\bar{i}_s, \bar{u}_s$  – вектор струму та напруги статора;  $\bar{\psi}_r$  – вектор потокозчеплення ротора;  $\omega_r$  – частота обертання ротора.



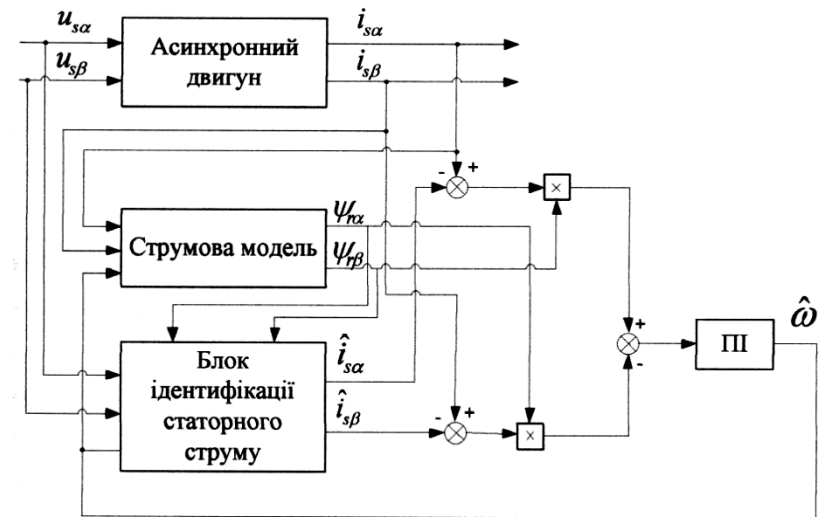
# Структура запропонованого способу компенсації нелінійних властивостей інвертора



# Дослідження адаптивних системи з задаючою моделлю



Загальна структура адаптивної системи з задаючою моделлю



Структура адаптивної системи з задаючою моделлю з використанням складових вектору статорного струму в якості вихідного сигналу задаючої та адаптивної моделей

# Синтез спостерігача з ковзним режимом

Рівняння математичної моделі асинхронного двигуна у матричній формі можна записати

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \left( \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & \omega_r \\ -\omega_r & \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} - \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \right) - \frac{R_s}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix} = - \left( \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & \omega_r \\ -\omega_r & \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} - \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \right)$$

Тоді матрицю  $S$ , що представляє собою спільний доданок для рівнянь струмів та потокозчеплень машини:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & \omega_r \\ -\omega_r & \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} - \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Взаємозв'язок процесів по двом ортогональним вісям  $\alpha$  та  $\beta$  виконується з ідентичним коефіцієнтом, що дозволяє замінити складові взаємовпливу аналогічною функцією ковзання  $\rho_{\alpha\beta}$ . Оцінка значення матриці  $S$ :

$$\hat{S} = \begin{bmatrix} \rho_\alpha \\ \rho_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & \omega_r \\ -\omega_r & \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} - \frac{L_m R_r}{L_r} \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix}$$

Тоді рівняння спостерігача струму можна записати так:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} \rho_\alpha \\ \rho_\beta \end{bmatrix} - \frac{R_s}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}$$

# Синтез спостерігача з ковзним режимом (продовження)

Спостерігач потокозчеплення описується таким чином:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \rho_{\alpha} \\ \rho_{\beta} \end{bmatrix}$$

При цьому складові обох спостерігачів визначаються за допомогою перемикаючих функцій:

$$\begin{cases} \rho_{\alpha} = -k \cdot \text{sign}(s_{s\alpha}) \\ \rho_{\beta} = -k \cdot \text{sign}(s_{s\beta}) \end{cases}$$

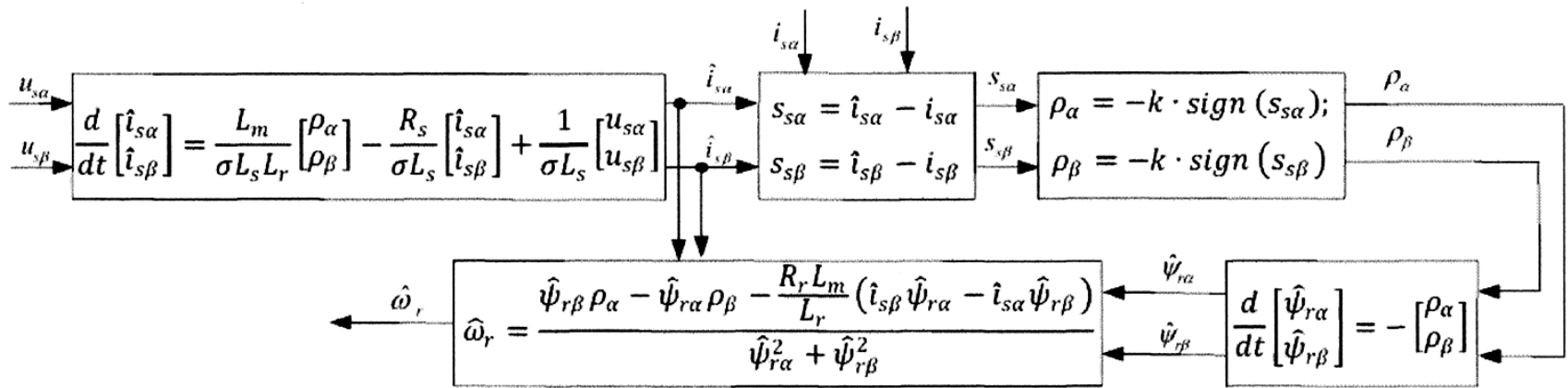
$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > 0, \\ -1, & \text{якщо } x < 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_{s\alpha} = \hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}, \\ s_{s\beta} = \hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}. \end{cases}$$

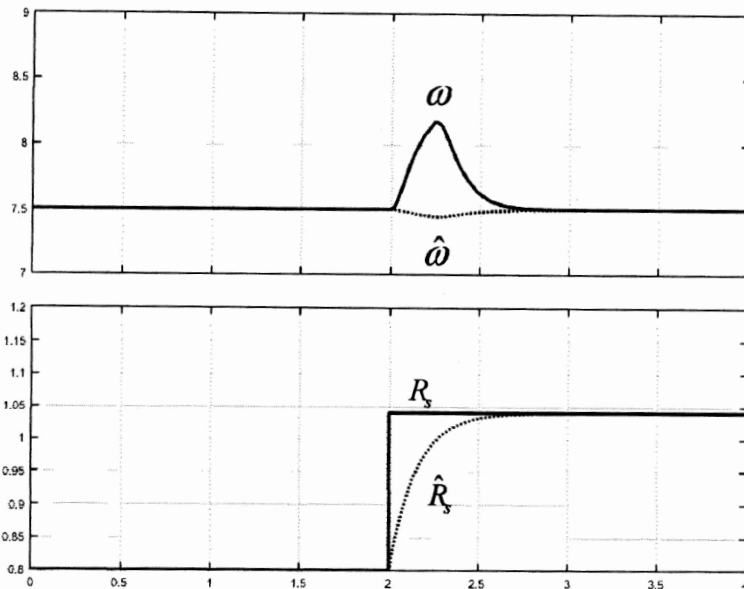
Оцінка величини кутової швидкості здійснюється за допомогою наступного виразу:

$$\hat{\omega}_r = \frac{\hat{\psi}_{r\beta} \rho_{\alpha} - \hat{\psi}_{r\alpha} \rho_{\beta} - \frac{R_r L_m}{L_r} (\hat{i}_{s\beta} \hat{\psi}_{r\alpha} - \hat{i}_{s\alpha} \hat{\psi}_{r\beta})}{\hat{\psi}_{r\alpha}^2 - \hat{\psi}_{r\beta}^2}$$

# Структурна схема спостерігача струму з ковзним режимом



Структура спостерігача струму з ковзним режимом



Моделювання виконувалося для умови роботи з низькою кутовою частотою при стрибкоподібній зміні величини активного опору статора двигуна на 30%. З наведених результатів (рисунок 3.13) видно, що помилка регулювання кутової швидкості зменшується по мірі того, як адаптивна система підлаштовує значення активного опору під його реальну величину

# Висновки

1. Автономний інвертор напруги має низку нелінійних властивостей, вплив яких є особливо помітним при роботі на низьких частотах приводу. До таких нелінійних властивостей відносяться: наявність «мертвого часу», вплив паразитних ємностей, час затримки включення та виключення ключів, падіння напруги на відкритих ключах. Нелінійні властивості призводять до відхилення величини вихідної напруги від її заданого значення, спотворення форми вихідного струму, що суттєво ускладнює реалізацію бездатчикового векторного керування.
2. Існуючі способи компенсації нелінійних властивостей інвертора передбачають введення компенсуючої складової в залежності від знаку вихідного струму інвертора. До недоліків існуючих способів слід віднести складність своєчасного виявлення моменту переходу струму через нуль, що пояснюється наявністю електромагнітних перешкод, дрейфу нуля в аналоговій частині вимірювальної схеми, а також те, що величина коригуючої напруги не змінюється протягом роботи інвертора і повинна бути визначена завчасно.
3. Адаптивна система з задаючою моделлю передбачає одночасну оцінку змінних стану у двох моделях різної структури з подальшим використанням різниці вихідних сигналів моделей для виконання процедур адаптації. Для асинхронного двигуна можливе використання складових векторів потокозчеплення, протиЕРС, миттєвої реактивної потужності та статорного струму в якості вихідних сигналів моделей. Серед усіх варіантів адаптивних систем з задаючою моделлю варіант з адаптивним спостерігачем струму має найбільшу стійкість при роботі в зоні низьких швидкостей та рекуперативному гальмуванні.
4. Використання ковзного режиму у спостерігачах стану для системи векторного керування дозволяє реалізувати оцінювання складових вектору потокозчеплення ротора без використання параметрів роторного кола. Це дозволило розробити структуру адаптивної системи з задаючою моделлю, у якій спостерігач струму є спостерігачем з ковзним режимом другого порядку, а в подальшому складові струму використовуються для оцінки вектору потокозчеплення ротора. Кутова швидкість визначається у адаптивній моделі при паралельному оновленні значення активного опору статорного ланцюга, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування електроприводу при роботі в зоні низьких кутових швидкостей.