

Закладний О.М. – кандидат технічних наук, Якимчук А.В. - магістр

Математичні моделі для визначення рівня енергоефективності електроприводу з вентильним двигуном у відповідності зі способами керування

Описано побудову програмного блоку для обчислення електроспоживання вентильним двигуном у відповідності зі способами керування вмиканням вентилів. Приведені результати обчислень з використанням розробленого блоку у відповідності зі способами керування вентильним двигуном.

Ключові слова: вентильний двигун, втрати енергії, постійні втрати, змінні втрати.

Zakladnyi A. – Pr. Doctors, Yakimchuk A. – master.

Mathematical models for calculation level of energy efficiency of electrical drive with brushless direct current motor in accordance with methods of control

Describes a construction of software block for energy consumption calculation of brushless direct current motor in accordance with methods of control switching gates. The calculation results with using developed block in accordance with methods of control switching gates.

Key words: brushless direct current motor, energy losses, constant losses, variable losses.

Вступ. Характерною тенденцією сучасного автоматизованого електроприводу як в Україні, так і за кордоном являється розширення номенклатури використовуваних схем електромеханічних перетворювачів енергії на базі електричних машин синхронного типу з різноманітними способами збудження, в тому числі і індукторних, живлячихся від вентилів перетворювачів частот з інвертором струму чи напруги і керованих в такт з обертанням ротора – вентильних двигунів (ВД).

ВД досить близькі по принципу дії і реалізуємими робочими характеристиками до широко використовуваних в регульованому електроприводі колекторних електродвигунів постійного струму. Так, як і колекторні двигуни, ВД володіють незалежністю частоти обертання валу від частоти мережі живлення, забезпечують роботу приводу у всіх чотирьох квадрантах, мають двохзонне регулювання частоти обертання, володіють порівняно високими пусковим моментом і енергетичними показниками.

В той же час, завдяки виключенню колекторного механізму з ковзаючими контактами, ВД володіють більшою надійністю і довговічністю, потребують менше затрат на обслуговування.

Існують різні способи керування вмиканням вентилів перетворювача вентильного двигуна. Виникає задача кількісної порівняльної оцінки енергозатрат при використанні способів керування для обґрунтування економічної ефективності використання данного виду електроприводу.

Мета роботи. Розробка математичної моделі для визначення рівня енергоефективності електропривода з вентильними двигунами з урахуванням способів керування.

Матеріали та результати дослідження. Запропонована методика в процесі моделювання вентильного електроприводу конкретного механізму дозволяє оцінити енергію, спожиту з мережі, і втрати енергії електричної машини, тобто енергетичну ефективність сучасних систем вентильного електроприводу. Крім техніко – економічного обґрунтування методика обчислення спожитої енергії може також використовуватись для перевірки вибраного двигуна по нагріву методом середніх втрат. Вирішення вказаних задач суттєво спрощує

процес проектування вентильного електроприводу.

Метою даної роботи являється розробка моделі в додатку Simulink пакету MATLAB для розрахунку електроспоживання і втрат при використанні способів керування вентилювальним двигуном і проведенні порівняльної кількісної оцінки енергетичної ефективності вентилювального двигуна для механізмів і установок гірничовидобувних підприємств. В задачі розробленого блоку входить:

1. Визначення споживаної з мережі енергії за цикл роботи.
2. Визначення сумарних втрат енергії в двигуні.
3. Розділення втрат на втрати постійні і змінні.
4. Визначення циклового ККД.

Також блок буде використовуватись для визначення споживаної енергії в регульованому електроприводі, для запису математичної моделі якого використовуються відносні одиниці, при цьому рівняння блоку зазнають деяких змін.

Побудова блоку обчислення споживаної енергії і втрат

1. Блок обчислення споживаної енергії і втрат в абсолютних одиницях

Рівняння для побудови блоку в цьому випадку мають вигляд:

1.1 Для способу $\beta_0 = \text{const}$

$$\theta = \arctg\left(\frac{I_d x_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2})}{I_d x_d \sin(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) + F_2 i_f x_{ad}}\right);$$

$$\gamma = \arccos\left(\cos \delta - \frac{2I_d x_k}{\sqrt{3}i_f x_{ad}}\right) - \delta;$$

$$\delta = \beta_0 - \gamma - \theta;$$

$$\beta = \beta_0 - \theta;$$

$$\omega_p = \frac{K_{\text{СХ.В}} U_c \cos \alpha - I_d [r_{\text{ДП}} + (\frac{S_{II}}{F_2}) r \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2})]}{S_{II} [i_f x_{ad} + \frac{I_d}{F_2} x_d \sin(\beta_0 - \frac{\gamma}{2})]};$$

$$M = i_f x_{ad} \frac{I_d}{F_2} \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) + \frac{I_d^2}{F_2} \left(\frac{x_d}{2} - \frac{x_q}{2}\right) \sin 2(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}).$$

1.2 Для способу $\beta_{\text{min}} = f(\gamma)$ при $\delta_{\text{min}} = \text{const}$

$$\theta = \arctg\left(\frac{I_d x_q \cos(\delta + \theta + \frac{\gamma}{2})}{I_d x_d \sin(\delta + \theta + \frac{\gamma}{2}) + F_2 i_f x_{ad}}\right);$$

$$\beta = \arccos\left(\cos \delta - \frac{2I_d x_k}{\sqrt{3}i_f x_{ad}}\right);$$

$$\gamma = \beta - \delta;$$

$$\beta_0 = \beta + \theta;$$

$$\omega_p = \frac{K_{CX.B} U_c \cos \alpha - I_d [r_{DP} + (S_{II} / F_2) r \cos(\delta + \theta + \frac{\gamma}{2})]}{S_{II} [i_f x_{ad} + \frac{I_d}{F_2} x_d \sin(\delta + \theta + \frac{\gamma}{2})]}$$

$$M = i_f x_{ad} \frac{I_d}{F_2} \cos(\delta + \theta + \frac{\gamma}{2}) + \frac{I_d^2}{F_2} (\frac{x_d}{2} - \frac{x_q}{2}) \sin 2(\delta + \theta + \frac{\gamma}{2}).$$

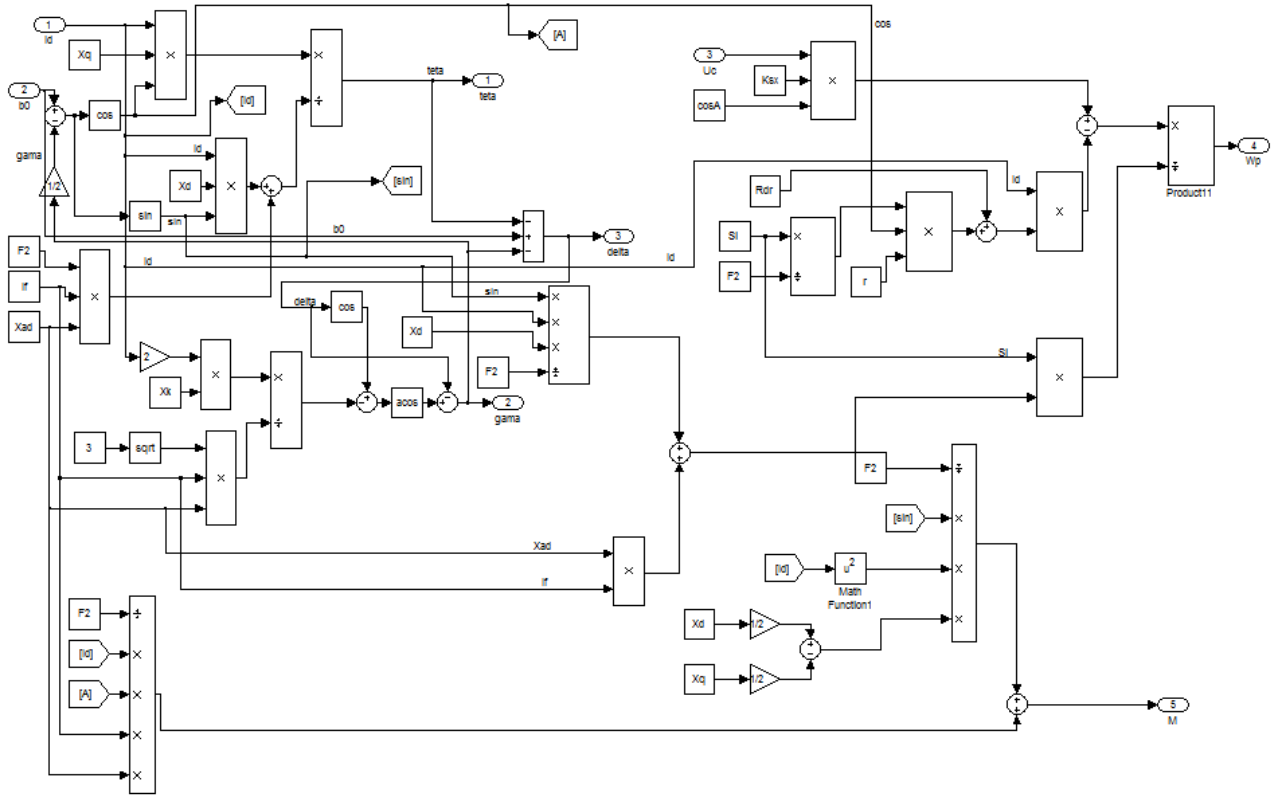


Рис.1 – Структурна схема блоку вичислення моменту і швидкості на валу ВД у відповідності до способу керування $\beta_0 = \text{const}$

Механічна потужність на валу двигуна розраховується за формулою:

$$P_{\text{мех}} = M \cdot \omega,$$

де M і ω - електромагнітний момент і кутова швидкість двигуна;

Сумарні втрати потужності обчислюється за формулою:

$$\Delta P_2 = P_1 - P = K + V + \Delta P_D,$$

де ΔP_D - додаткові втрати.

Постійні втрати потужності містять втрати: у сталі статора і ротора ΔP_{CT} ; механічні відтертя в підшипниках і вентиляційні $\Delta P_{\text{мех}} = 0,01 \cdot P_H$

$$K = \Delta P_{CT} + \Delta P_{\text{мех}}$$

Загальні втрати розраховуються з балансу потужностей:

$$\Delta P = P - P_{\text{мех}}$$

Якщо навантаження відрізняється від номінального, то повні змінні втрати $V = V_H \cdot k_{3l}^2$.

Додаткові втрати в обмотках і сердечниках двигуна $\Delta P_D = \Delta P_{HCM} - \Delta P_{HC}$ обумовлені несиметрією ΔP_{HCM} та несинусоїдальністю ΔP_{HC} напруги живлення-

Додаткові втрати від несиметрії напруги визначаємо як потужність, витрачену на подолання гальмівного моменту двигуна M_2 від струмів зворотної послідовності

$$\Delta P_{HCM} = M_2 \omega$$

Додаткові втрати від несинусоїдальності напруги

$$\Delta P_{HC} = 2 \lambda_{\Pi}^2 V_{1H} \sum_{v=n}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}},$$

де U_v - відношення напруги v -ї гармоніки до номінальної.

Енергія, що споживається з мережі розраховується по формулі:

$$W_1 = \int_0^{T_u} P dt,$$

де T_u - тривалість циклу роботи виробничого механізму.

Енергія загальних втрат розраховується по формулі:

$$\Delta W = \int_0^{T_u} \Delta P_{\Sigma} dt$$

Енергія постійних втрат розраховується по формулі:

$$\Delta W_C = \int_0^{T_u} K dt$$

Енергія змінних втрат розраховується за формулою:

$$\Delta W_M = \int_0^{T_u} V dt$$

Енергія механічної потужності на валу двигуна розраховується за формулою:

$$W_{\text{мех}} = \int_0^{T_u} P_{\text{мех}} dt$$

Цикловий ККД, як відношення механічної енергії до енергії, що споживається з мережі за час роботи, розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{W_{mex}}{W} = \frac{\int_0^{T_u} P_{mex} dt}{\int_0^{T_u} P dt}$$

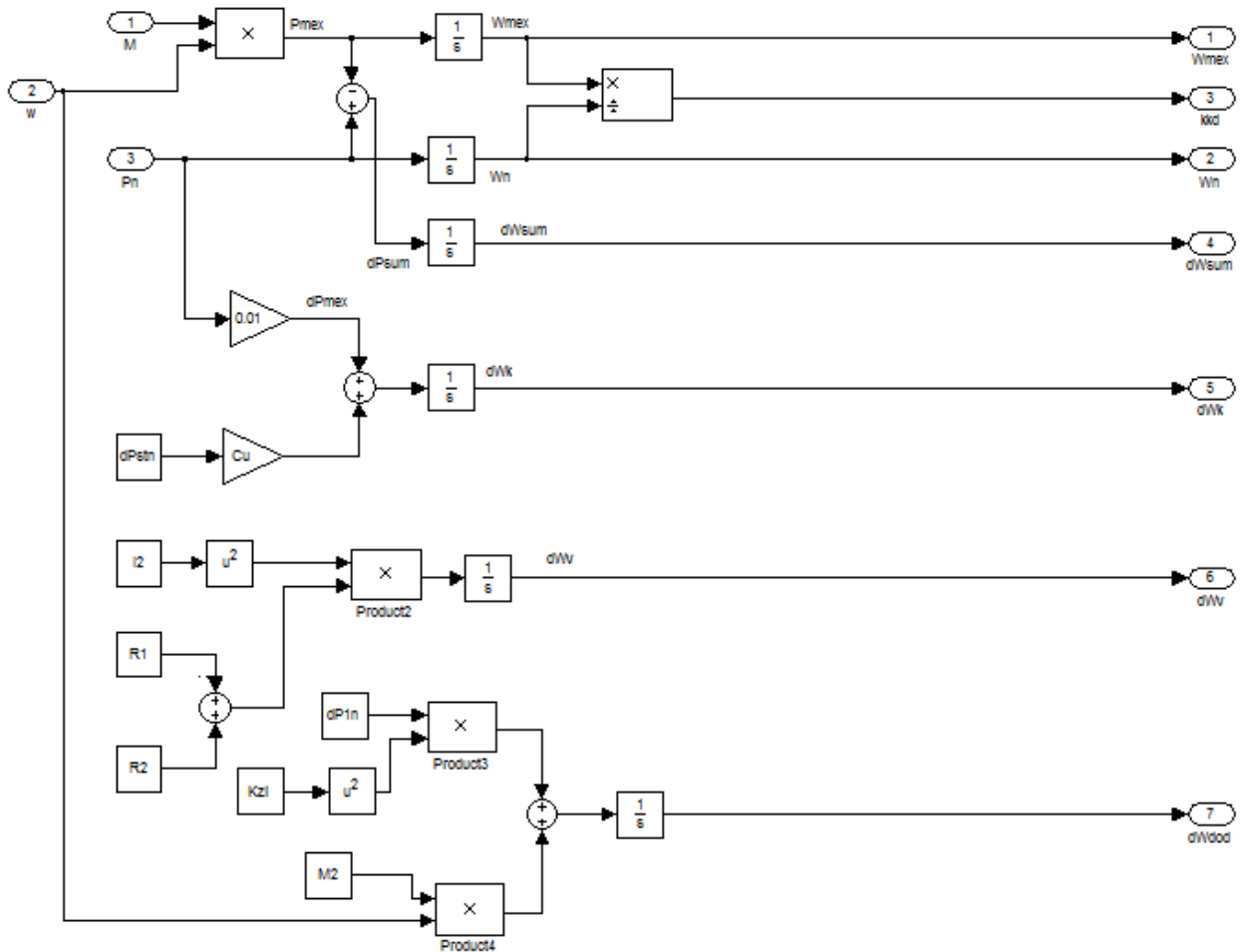


Рис. 2 – Структурна схема блоку обчислення енергії, що споживається з мережі та втрат в додатку Simulink пакету MATLAB.

2. Блок обчислення енергії, що споживається з мережі та втрат у відносних одиницях.

В рамках даної роботи використовується система відносних одиниць, орієнтована на змінні електричних кіл вентиляного двигуна та електромагнітну потужність машини. Це дозволяє отримати номінальні змінні статора і номінальний електромагнітний момент рівними одиниці.

Структурна схема блоку, побудована на основі приведених рівнянь, зображена на Рис. 2. Тут приводиться реалізація цієї схеми в додатку Simulink для блоку з використанням відносних одиниць. Схема блоку з використанням абсолютних одиниць не має принципових відмінностей

Результати моделювання

Розглядалися два закони керування ввімкненням вентилів.

Перший і найбільш простий спосіб керування полягає в підтриманні постійного значення кута випередження $\beta_0 = \text{const}$. При цьому джерелом напруги синхронізації служить датчик положення ротора.

Другий спосіб полягає в підтриманні постійної величини кута запасу δ на мінімальному рівні.

$$\beta_0 = \beta_{0\text{min}} = f(\gamma, \theta) \text{ при } \delta = \delta_{\text{min}} = \text{const}$$

$$\beta = \beta_{\text{min}} = f(\gamma) \text{ при } \delta = \delta_{\text{min}} = \text{const}$$

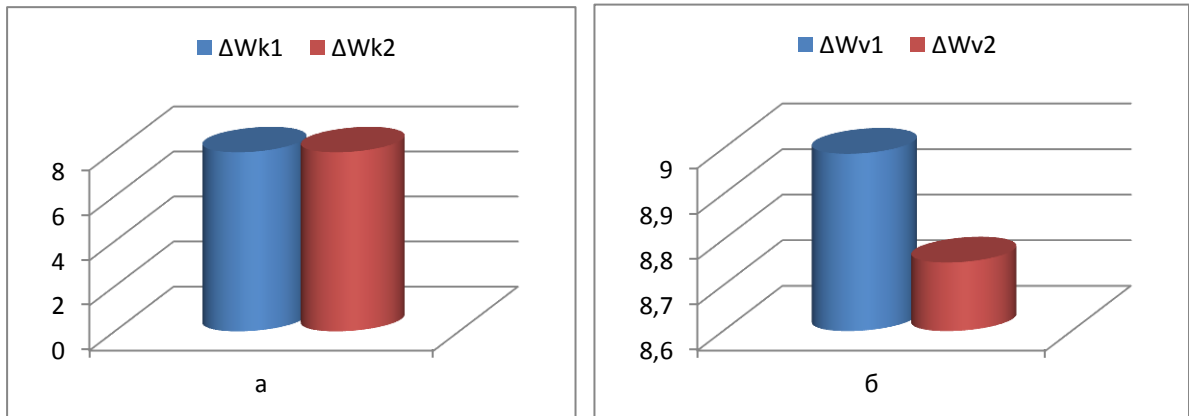
Результати обчислень енергії, що споживається з мережі і втрат за час пуску зведені у таблицю 1.

Таблиця 1- Результати обчислень енергії, що споживається, та втрат енергії.

Закон	Рном	$\Delta W_{P\text{ном}}$	ΔW_K	ΔW_V	$\Delta W_{P\text{дод}}$
1	540	17,8384	7,9505	8,9890	0,8989
2	540	16,9635	7,9505	8,7505	0,2625

Для ілюстрації отриманих результатів приведена діаграма (Рис.3). Слід також відмітити, що, як було вказано вище, даний блок може примінятись і для перевірки вибраного двигуна за нагрівом методом середніх втрат.

Розрахунок електроенергії, що споживається дозволяє вибрати один з розглянутих способів керування з точки зору енергетичної ефективності. Крім того, можна виконати порівняльну кількісну оцінку енергоспоживання для різних способів керування, що дозволяє провести розрахунок техніко – економічного обґрунтування вибраного способу керування для системи електроприводу і визначити строк окупності затрат при введенні сучасних систем електроприводу.



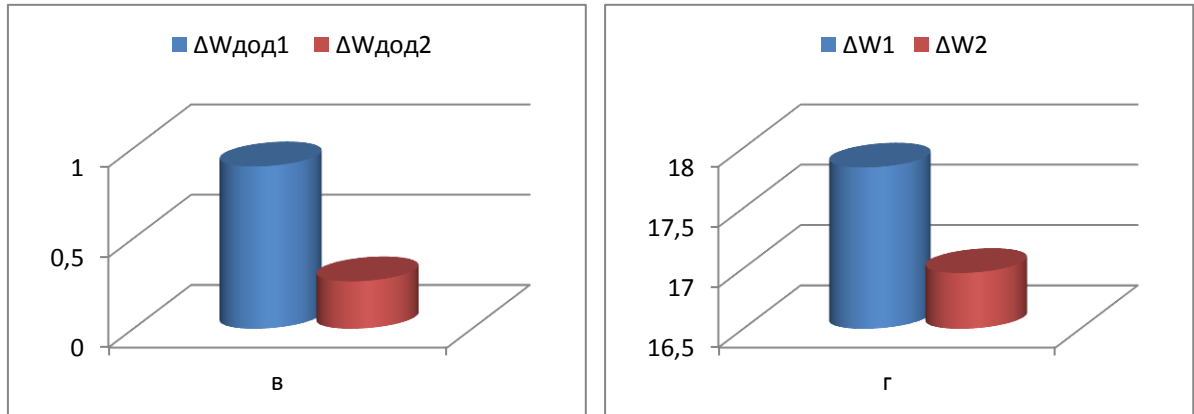


Рис.3 – Діаграма енергії, що споживається і втрат за цикл роботи вентиляного двигуна у відповідності зі способами керування: ΔW_{k1} , ΔW_{k2} – енергія постійних втрат при першому та другому способі керування, ΔW_{v1} , ΔW_{v2} – енергія змінних втрат при першому та другому способі керування, $\Delta W_{\text{дод}1}$, $\Delta W_{\text{дод}2}$ – енергія додаткових втрат при першому і другому способі керування, ΔW_1 , ΔW_2 – енергія повних втрат при першому та другому способі керування.

Висновки: Як видно з Рис.3, використання блоку обчислення енергії, що споживається з мережі дозволяє отримати достатньо повні данні для техніко – економічного обґрунтування введення раціональної системи електроприводу. Використання розробленого блоку спрощує процедуру розрахунку енергії, що споживається, оскільки не потребує від розробника додаткових затрат часу.

Література

1. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник / Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. – К.: Кондор, 2005.
2. Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. – К.: Видавництво «Освіта України», 2009.
3. Енергоефективний електропривод з вентиляним двигуном: Монографія / Закладний О.М., Закладний О.О. – К.: «Либра», 2012.
4. Вентильні електричні машини в системах регульованих електроприводів / Аракелян А.К., Афанасьєв А.А. – М.: «Высшая школа», 2006.
5. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007.