

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОМЕХАНІЗМІВ НА ОСНОВІ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ЗМІННИМ СТРУМОМ

Робота присвячена аналізу електромеханічних властивостей вентильних двигунів (ВД) зі збудженням змінним струмом у застосуванні до електроприводів (ЕП) турбомеханізмів (вентиляторів, насосів, турбокомпресорів). Оскільки такі механізми споживають близько 25% електроенергії у промисловості, оптимізація їхніх ЕП є критично важливим завданням. Запропоновано схему ВД, яка усуває проблему відсутності машинної комутації вентилів інвертора на низьких частотах і під час пуску.

Проведено математичний аналіз характеристик ВД, зокрема досліджено оптимальну частоту збудження, що забезпечує мінімальну потужність перетворювачів у роторі та статорі. Показано, що при частоті збудження 4–6 Гц сумарна потужність перетворювачів знижується на 15–20% у порівнянні з традиційними схемами подвійного живлення. Також показано, що зміна напрямку обертання поля збудження дозволяє розширити діапазон регулювання швидкості, що підвищує адаптивність системи до змінних умов експлуатації.

Отримані результати демонструють переваги запропонованого підходу, зокрема зниження теплових втрат, підвищення перевантажувальної здатності ЕП та виключення необхідності у встановленні датчика положення ротора. Запропоновані рішення можуть бути використані для розробки високоефективних систем керування турбомеханізмами.

Ключові слова: електропривод, турбомеханізми, вентильний двигун, збудження змінним струмом, комутація вентилів, оптимізація частоти збудження.

Вступ.

Ефективність використання електроенергії в промислових системах значною мірою залежить від досконалості електроприводів (ЕП), особливо для турбомеханізмів - вентиляторів, насосів і турбокомпресорів, які є обладнанням масового застосування. Ці машини споживають близько 25% загального обсягу електроенергії, що виробляється в світі, що робить актуальним пошук економічних і технічно прогресивних рішень для їхнього управління [1]. Одним із ключових завдань є забезпечення регулювання продуктивності турбомеханізмів із мінімальними енергетичними втратами, що можливо завдяки оптимізації частоти обертання ЕП.

Вентильні двигуни (ВД) зі збудженням змінним струмом знаходять застосування в сучасних ЕП турбомеханізмів, таких як вентилятори, насоси та турбокомпресори. Це обумовлено їхніми перевагами порівняно з традиційними асинхронними двигунами (АД) з частотно-регульованими приводами (ЧРП), а саме:

1. Висока енергоефективність: ВД мають менші втрати енергії завдяки відсутності комутаційних втрат і мінімізації реактивної потужності. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню загальної ефективності системи.

2. Широкий діапазон регулювання швидкості: ВД забезпечують стабільну роботу при низьких швидкостях обертання, що є критичним для деяких застосувань турбомеханізмів.

3. Висока надійність та довговічність: Відсутність щітково-колекторного вузла зменшує механічне зношування, що підвищує надійність та знижує потребу в обслуговуванні.

4. Компактність та зменшена маса: ВД мають менші габарити та масу порівняно з традиційними АД, що спрощує їх інтеграцію в існуючі системи.

Недоліки ВД:

1. Складність керування: ВД вимагають складних систем керування для забезпечення синхронізації та стабільної роботи, що може підвищувати вартість системи.

2. Значна вартість: Через використання спеціалізованих матеріалів та компонентів, ВД можуть бути дорожчими у виробництві та обслуговуванні ніж ЧРП.

3. Чутливість до умов експлуатації: ВД є більш чутливими до змін напруги та частоти живлення у порівнянні з ЧРП, що вимагає додаткових заходів для забезпечення стабільної роботи.

Порівняно з ВД, ЧРП мають недоліки, такі як нижча енергоефективність при змінних навантаженнях та обмежений діапазон регулювання швидкості. Тож вибір між ВД та ЧРП залежить від конкретних вимог застосування, оскільки ВД пропонують вищу енергоефективність та надійність, але

вимагають складніших систем керування та можуть бути дорогими. Проте для потужних турбомеханізмів з різкозмінним профілем навантаження, ВД, зазвичай, є оптимальним варіантом.

Інші підходи до регулювання, такі як використання асинхронних машин (АМ) із фазним ротором у режимі подвійного живлення або ЕП постійного струму, мають також суттєві недоліки порівняно з ВД: складність конструкції, недостатня ефективність на низьких частотах і високі теплові втрати. У цьому контексті ЕП на основі ВД зі збудженням змінним струмом пропонують перспективну альтернативу.

Метою цього дослідження є аналіз електромеханічних властивостей ВД із трифазним змінним струмом низької частоти, і визначення оптимальних параметрів роботи турбомеханізмів. Новизна роботи полягає в усуненні проблеми відсутності машинної комутації під час пуску та в пропозиції оптимальної частоти збудження для зниження потужності перетворювачів.

Постановка задачі дослідження.

Проблематика управління турбомеханізмами та діагностики їхнього технічного стану є предметом численних досліджень. У працях [1, 2] розглянуто основи технічної діагностики гідравлічних приводів, підкреслено важливість раннього виявлення несправностей для забезпечення стабільної експлуатації. У [3] проаналізовано закономірності зміни робочих режимів шахтних водовідливних установок, що стало основою для розробки адаптивних систем управління. Сучасні дослідження, такі як [4-9], зосереджуються на застосуванні ВД для підвищення енергоефективності машин великої потужності, наголошуючи на їхніх перевагах перед традиційними рішеннями.

Для регулювання частоти обертання турбомеханізмів традиційно застосовують АМ з фазним ротором у режимі подвійного живлення [3]. Проте ці системи мають обмеження, зокрема складність комутації клапанів і значні енергетичні втрати на низьких частотах. Альтернативний підхід - ВД з постійним струмом збудження, описані в [5], - демонструють кращі характеристики, але їхня ефективність знижується через відсутність машинної комутації під час пуску. У цьому дослідженні пропонується схема ВД зі збудженням трифазним змінним струмом, яка усуває ці недоліки, забезпечуючи стабільну роботу в усьому діапазоні частот обертання.

Аналіз літератури [3-9] показав, що для більшості турбомеханізмів досить мати три-чотири робочих швидкості, що досягаються економічними з точки зору споживання електроенергії засобами. Такі режими легко реалізуються ЕП за схемою ВД на основі синхронної машини зі збудженням постійним струмом. Управління тиристорами інвертора здійснюється сигналом датчика положення або датчика ЕРС ротора. Головний недолік подібної схеми - відсутність машинної комутації клапанів інвертора під час пуску і роботи на малих частотах обертання. Цей недолік усувається у ВД зі збудженням трифазним змінним струмом (рис. 1).

Якорем двигуна служить ротор АМ, в коло якого включений перетворювач з ланкою постійного струму. Як індуктор використовується статор АМ, що живиться від перетворювача трифазної напруги низької частоти. У даній схемі магнітне поле збудження обертається, завдяки чому в роторі наводиться ЕРС навіть при нульовій швидкості двигуна. Цим забезпечується машинна комутація залежного інвертора в усьому діапазоні частот обертання, в тому числі й при пуску. Важливою перевагою ВД зі збудженням змінним струмом є також відсутність необхідності у встановленні на валу АМ датчика положення ротора.

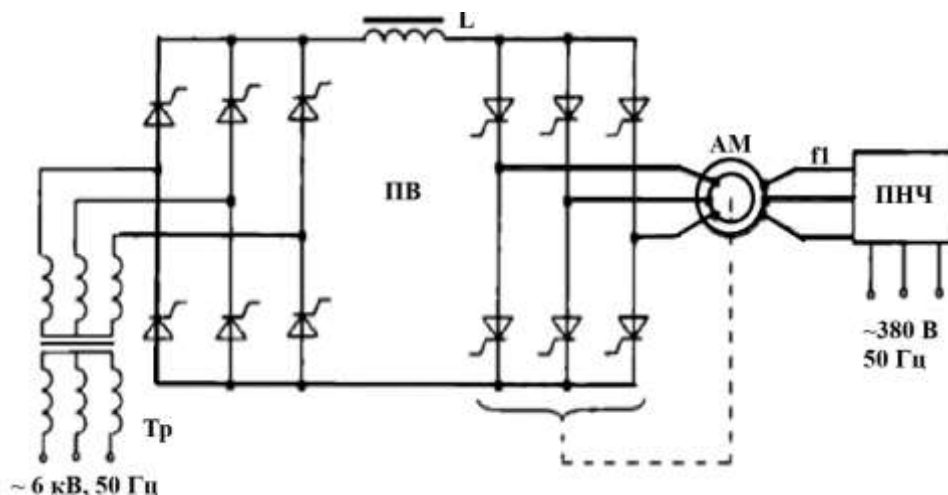


Рисунок 1 - Система живлення: *Tr* – понижуючий трансформатор (~6 кВ, 50 Гц), *ПВ* – силовий випрямляч; *L* (Дросель) – згладжуючий дросель, *АМ* – асинхронний електродвигун *f1* (Частотний сигнал) – зв'язок із ПНЧ; *ПНЧ* (Перетворювач частоти) – частотний перетворювач (~380 В, 50 Гц)

Цей недолік усувається у ВД зі збудженням трифазним змінним струмом (див. рис. 1). У цій схемі ротор АМ виконує функцію якоря, до якого підключено перетворювач із ланкою постійного струму (ПВ). Статор, як індуктор, живиться від перетворювача трифазної напруги низької частоти. Завдяки обертанню магнітного поля збудження в роторі виникає ЕРС навіть за нульової швидкості двигуна, що забезпечує машинну комутацію залежного інвертора в усьому діапазоні частот обертання, включно з пусковим режимом. Важливою перевагою є відсутність потреби в установці датчика положення ротора на валу АМ, що спрощує конструкцію та знижує собівартість системи.

Основні матеріали дослідження.

Аналітичні залежності, що визначають механічні характеристики ВД зі збудженням змінним струмом, отримані на основі моделі машини подвійного живлення [4] або асинхронно-вентильного каскаду з регульованою роторною групою вентилів [3]. Коефіцієнт ковзання S у схемі ВД має той самий зміст, що й у стандартній схемі увімкнення АМ, і визначається як:

$$S = (\omega_1 + \omega) / \omega_1 = \omega_2 / \omega_1 = f_2 / f_1,$$

де ω — частота обертання ротора; $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$, $\omega_2 = 2\pi f_2 / p$ - кутові швидкості обертання магнітного поля відносно статора і ротора; $f_1, f_2 = f_1 + p / (2\pi)$ - частоти напруги статора і ротора; p — число пар полюсів. При обертанні ротора проти напрямку поля статора (що характерно для пускового режиму) $S \geq 1$.

Дослідження характеристик ВД виконувалося з урахуванням загальноприйнятих припущень про заміну реальних несинусоїдальних напруг, ЕРС і струмів їхніми першими гармоніками. Рівняння електричної рівноваги фаз первинної та вторинної обмоток АМ в режимі ВД мають вигляд

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 / S + j \dot{I}_2 X_{21} / S = \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 / S - \dot{E}_1, \tag{1}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 + j \dot{I}_1 X_{12} = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 - \dot{E}_2, \tag{2}$$

де I_1, I_2 — струми статора і ротора; U_1, U_2, E_1, E_2 — фазні напруги та ЕРС статора і ротора; X_1, X_2 — індуктивні опори розсіювання статора і ротора; X_{m1}, X_{m2} — головні індуктивні опори, зумовлені основними гармоніками магнітного поля; X_{12}, X_{21} — індуктивні опори взаємної індукції; r_1, r_2 — активні опори. Усі індуктивні опори зведено до частоти ротора f_2 , тому в першому рівнянні присутній коефіцієнт $1/S$. Якщо позначити $\varepsilon = f_{1н} / f_1$, де $f_{1н} = 50$ Гц, то індуктивні опори в (1) і (2) будуть зв'язані з відповідними номінальними значеннями (на частоті 50 Гц) множником S : $X_1 = X_{1н} S / \varepsilon$, $X_2 = X_{2н} S / \varepsilon$ тощо.

Для спрощення аналізу режим роботи машини зведено до еквівалентного режиму нерухомої машини. Помноживши обидві частини першого рівняння на S , отримуємо:

$$S \dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 S + j \dot{I}_1 X_1 - S \dot{E}_1, \quad \dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 X_2 - \dot{E}_2. \tag{3}$$

Ці рівняння відповідають схемі заміщення, зображеній на рис. 2, де X_0 — індуктивний опір намагнічувального контуру, зведений до ротора. Струм намагнічувального контуру $I_0 = I_1 + I_2$, а напруга на його затискачах: $S \dot{E}_1 = \dot{E}_2$.

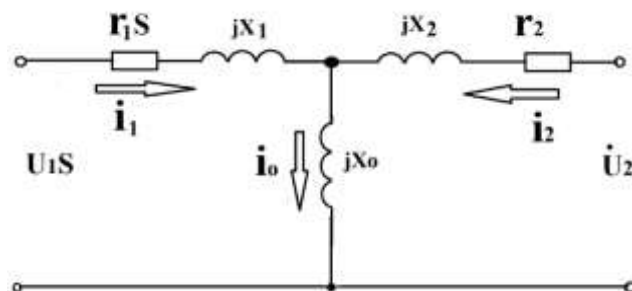


Рисунок 2 – Узагальнена еквівалентна схема СМ, що використовує параметри опору та реактивного опору для аналізу роботи: $U_1 S$, - вхідна напруга первинної обмотки $r_1 S$ – активний опір первинної обмотки, jX_1 – індуктивний опір первинної обмотки, i_1 – струм первинної обмотки, i_0 – струм намагнічення, jX_0 – індуктивний опір намагнічувального кола, jX_2 – індуктивний опір вторинної обмотки, r_2 – активний опір вторинної обмотки, i_2 – струм вторинної обмотки, U_2 – вихідна напруга вторинної обмотки

Для дослідження процесів у колі ротора схему заміщення (рис. 2) перетворено за теоремою про еквівалентний генератор (рис. 3). Коефіцієнт c_1 , відомий із теорії АМ, має вигляд:

$$c_1 = \dot{U}_1 / \dot{E}_1 = 1 + X_1 / X_m - j r_1 \varepsilon / X_{он} \approx 1 + X_{1н} / X_{он}, \tag{4}$$

де $\varepsilon = f_{10} / f_1$, $f_{1н} = 50$ Гц — номінальна частота.

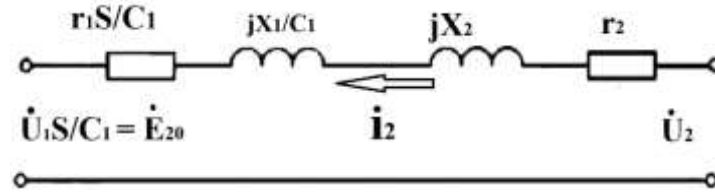


Рисунок 3 - Еквівалентна схема заміщення СМ, що використовується для аналізу роботи ВД зі збудженням змінним струмом у контексті ЕП турбомеханізмів: $\dot{U}_1 S / C_1 = \dot{E}_{20}$ – вхідна напруга первинної обмотки (статора), зведена до коефіцієнта ковзання S та числа пар полюсів C_1 , що дорівнює ЕРС холостого ходу \dot{E}_{20} , $r_1 S / C_1$ – активний опір первинної обмотки (статора), врахований з коефіцієнтом ковзання S та числом пар полюсів C_1 , jX_1 / C_1 – індуктивний опір розсіювання первинної обмотки (статора), зведений до числа пар полюсів C_1 , \dot{I}_1 – струм первинної обмотки (статора), jX_M – індуктивний опір намагнічувального контуру, \dot{I}_M – струм намагнічування, jX_2 – індуктивний опір вторинної обмотки (ротора), r_2 – активний опір вторинної обмотки (ротора), \dot{I}_2 – струм вторинної обмотки (ротора), \dot{U}_2 – вихідна напруга вторинної обмотки (ротора).

Ця схема використовується для аналізу електромеханічних характеристик ВД, зокрема для визначення оптимальної частоти збудження, яка, як зазначено в статті, становить 4–6 Гц, що дозволяє знизити сумарну потужність перетворювачів на 15–20% порівняно з традиційними схемами подвійного живлення.

Для того, щоб у схемі ВД забезпечити номінальний намагнічуваний струм машини I_{0H} , коли нема струму в роторі, напруга збудження U_1 і номінальна напруга статора в нормальній схемі ввімкнення U_{1H} повинні дорівнювати

$$\begin{aligned} U_1 &= C_1 E_1 = C_1 I_{0H} (X_{1H} + X_{mln}) / \varepsilon; \\ U_{1H} &= C_1 E_{1H} = C_{1H} I_{0H} (X_{1H} + X_{mln}), \end{aligned}$$

звідки $U_1 / U_{1H} = E_1 / E_{1H} = 1 / \varepsilon$, що відповідає відомому закону зміни напруги при частотному управлінні АД.

Електромагнітний момент ВД розраховується за формулою

$$M = E_d I_d (S - 1) / (S \omega) = 3(\sqrt{6} E_{20} I_d \cos \beta + X_K I_d^2) / (\pi \omega_2), \quad (5)$$

$$\text{де } E_d = 3(\sqrt{6} E_{20} \cos \omega + X_K I_K) / \pi \quad (6)$$

середнє значення ЕРС на вході інвертора, β — кут випередження відмикання вентилів інвертора відносно комутуючої ЕРС.

У формулу (5) входить частота ω_2 , електромагнітний момент від неї не залежить, оскільки E_{20} і X_K також пропорційні ω_2 : $E_{20} = E_{2H} S / \varepsilon$; $X_K = X_{KH} S / \varepsilon$; $\omega_2 = \omega_{1H} S / \varepsilon$, де E_{2H} – номінальна фаза ЕРС ротора АМ; X_{KH} – значення X_K на частоті 50 Гц. Отже, $M = 3(\sqrt{6} E_{2H} I_d \cos \beta + X_{KH} I_d^2) / (\pi \omega_{1H})$.

Для даної системи ЕП дуже важливим є визначення оптимальної частоти збудження, що забезпечує мінімальну потужність перетворювача в статорі і роторі.

Дослідження характеристик ВД показало, що оптимальна частота збудження f_{10} лежить у межах 4–6 Гц залежно від кута β , що забезпечує мінімальну сумарну встановлену потужність перетворювачів у роторі та статорі. Сумарна потужність двох перетворювачів розраховується як:

$$P = 3(U_1 I_{1n} + E_{2n} I_{2n}),$$

де I_{1n}, I_{2n} — номінальні струми статора і ротора, U_1 — фазна напруга статора, E_{2n} — номінальна ЕРС ротора.

У режимі обертання магнітного поля статора і ротора в одному напрямку частота струму в роторі визначається як:

$$f_2 = \omega_{1H} p / (2\pi) - f_{10}. \quad (7)$$

При протилежному обертанні:

$$f_2 = \omega' p / (2\pi) + f_{10}. \quad (8)$$

Прирівнюючи ці вирази, отримуємо:

$$\omega' = \omega_{1H} - 2\omega_1 = \omega_{1H} (1 - 2/\varepsilon).$$

Із залежності (9) видно, що чим більша частота поля збудження f_{10} , тим більша частину потужності ЕП споживає через старор і тим меншу – через ротор. Тому сумарна встановлена потужність перетворювальних агрегатів у ротора і старої може мати мінімум при деякому значенні f_{10} .

Сумарна потужність двох перетворювачів дорівнює $P = 3(U_1 I_{1H} + E_{2T} I_{2H})$, де I_{1H}, I_{2H} – номінальні струми статора і ротора АМ; U_1 – фазна напруга статора; E_{2T} – напруга вторинної обмотки трансформатора при холостому ході.

Установлена потужність перетворювачів у відносних одиницях

$$P^* = P / (3E_{2H}I_{2H}) = C_1 k_i / \varepsilon + U_2^*, \quad (10)$$

де $C_1 = U_1 / E_1$; $k_i = I_{1H} / I_{2H}$; I_{1H} – номінальний струм статора, наведений до ротора; E_1 – ЕРС статора; U_2^* – коефіцієнт запасу відносно номінальної ЕРС ротора АМ.

Якщо магнітне поле статора і ротор обертаються в одному напрямку, то

$$U_{2*}' = \cos \beta \{A_{max}[(\varepsilon - 1)(1 + r_{1*}) + r_{2*}\varepsilon] + \varepsilon - 1\} / \varepsilon, \quad (11)$$

де

$$A_{max} = 0,5(1 / \cos \beta - 1), \beta < 60^\circ$$

$$A_{max} = (\sqrt{1 + \sin(2\beta - 60^\circ)} / \cos^2 \beta - 1) / 2, \beta \geq 60^\circ; \quad (12)$$

r_{1*}, r_{2*} – еквівалентні опори статора і ротора.

Якщо магнітне поле статора і ротор обертаються в протилежних напрямках, то

$$U_{2*}' = \cos \beta \{A(\varepsilon + 1)[(1 + r_{1*}) + r_{2*}\varepsilon] + \varepsilon + 1\} / \varepsilon \quad (13)$$

Продиференціювавши (10) по ε з урахуванням (11) і (13) і прирівнявши похідні до нуля, дістанемо

$$\varepsilon_0' = \sqrt{(c_1 k_i / \cos \beta - A_{max} - 1) / (r_{1*} A_{max})}; \quad (14)$$

$$\varepsilon_0 = \sqrt{(c_1 k_i / \cos \beta + A_{max} + 1) / (r_{1*} A_{max})} \quad (15)$$

Співвідношення (14) має зміст тільки при

$$c_1 k_i / \cos \beta > A_{max} + 1 \quad (16)$$

Вважаючи, що $\beta < 60^\circ$ і підставляючи A_{max} з (12) в (16), після перетворень дістанемо

$$c_1 k_i > \cos^2(\beta/2) \quad (17)$$

Оскільки $c_1 \geq 1$ і $k_i > 1$, то нерівність (17) завжди виконується і функція (10) має мінімум. Порівняння співвідношень (14) і (15) показує, що ($\varepsilon_0' < \varepsilon_0$), тобто в системі з третього напрямку поля зсуву оптимальна частота поля більша.

За допомогою формули (10) при заданій частоті збудження можна визначити мінімальну суму потужностей перетворювачів.

Формула сигналу заданої частоти f_1 перетворювача-збуджувача відбувається звичайно в функції заданої швидкості обертання двигуна. При пуску поле збудження в напрямку, протилежному напрямку обертання ротора, з частотою $f_1 = f_{13}$. У такому режимі система працездатна до досягнення швидкості $\omega = \omega_n(1 - 1/\varepsilon)(1 - 2/\varepsilon)$.

При подальшому збільшенні швидкості відбувається зменшення частоти f_1 до нуля з наступним збільшенням її до первинного значення f_{10} , але з напрямком обертання поля, що збігається з напрямком обертання ротора.

Висновки.

Дослідження отриманих залежностей показує, що:

- у ВД зі збудженням змінним струмом існує оптимальне значення частоти поля збудження, що забезпечує мінімальну сумарну встановлену потужність перетворювальних агрегатів у роторі і статорі. Ця частота залежно від кута β випередження відмикання вентилів інвертора становить 4-6 Гц;
- керуючи частотою поля збудження і напрямком його обертання, можна змінювати швидкість обертання робочого колеса турбомашини при куті управління трансформаторною групою вентилів $\alpha_T = 0$, що забезпечує найбільш економічний режим;
- при переведенні АМ у режим ВД зі збудженням змінним струмом виключається несиметричне нагрівання обмоток статора, знижуються теплові втрати і, отже, відпадає необхідність у значному запасі потужності двигуна [3].

Додатковою перевагою ВД зі збудженням змінним струмом є зниження теплових втрат завдяки виключенню несиметричного нагрівання обмоток статора. Це зменшує потребу в запасі потужності двигуна, підвищуючи його перевантажувальну здатність на 10–15% порівняно з АМ в режимі подвійного живлення.

ЕП із ВД зі збудженням трифазним змінним струмом є ефективним рішенням для турбомеханізмів завдяки таким перевагам:

- забезпечення машинної комутації вентилів інвертора в усьому діапазоні частот обертання, включно з пусковим режимом.
- відсутність потреби в датчиках положення ротора, що спрощує конструкцію та знижує витрати.
- оптимальна частота збудження (4–6 Гц), яка мінімізує сумарну потужність перетворювачів у роторі та статорі.
- можливість регулювання швидкості обертання шляхом зміни частоти та напрямку поля збудження, що забезпечує економічний режим роботи.
- зниження теплових втрат і підвищення перевантажувальної здатності двигуна.
- результати дослідження підтверджують[3], що запропонована схема ВД перевершує традиційні рішення за енергоефективністю та гнучкістю.

O. Zakladnyi¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

V. Prokopenko¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5518-5802

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC DRIVE OF TURBOMACHINERY BASED ON A BRUSHLESS MOTOR WITH AC EXCITATION

This study is dedicated to analyzing the electromechanical properties of brushless motors (BM) with AC excitation for application in electric drives (ED) of turbomachinery (fans, pumps, turbo compressors). Since such mechanisms consume approximately 25% of industrial electricity, optimizing their ED is a critically important task. A BM topology is proposed to eliminate the issue of missing machine-side commutation of inverter switches at low frequencies and during startup.

A mathematical analysis of BM characteristics has been conducted, specifically investigating the optimal excitation frequency that ensures minimal power conversion in the rotor and stator. It has been shown that at an excitation frequency of 4–6 Hz, the total power of the converters decreases by 15–20% compared to conventional doubly fed schemes. Additionally, it is demonstrated that reversing the direction of the excitation field rotation allows for an extended speed regulation range, enhancing the system's adaptability to variable operating conditions.

The obtained results highlight the advantages of the proposed approach, including reduced thermal losses, increased overload capacity of the ED, and the elimination of the need for a rotor position sensor. The proposed solutions can be utilized in the development of high-efficiency control systems for turbomachinery.

Keywords: *electric drive, turbomachinery, brushless motor, AC excitation, switch commutation, excitation frequency optimization.*

References

1. O. M. Zakladnyi, A. V. Prakhovnyk, and O. I. Solovei, *Energy Saving in Industrial Electric Drives: A Textbook*. Kyiv: Kondor, 2005, 408 p.
2. O. O. Zakladnyi, "Energy efficiency of a brushless motor," *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 4(58), pp. 99–105, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.200507>.
3. O. M. Zakladnyi and O. O. Zakladnyi, *Energy-Efficient Electric Drive with Brushless Motors* (in Ukrainian), 2nd ed., revised and extended. Kyiv: Libra Publishing House, 2013, 212 p. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/70374>.
4. Dai H., Wang Y. Analysis of Induction Motor Efficiency under Variable Frequency Drives // *Journal of Electrical Engineering*, 2021, Vol. 35, No. 4, pp. 203–218.
5. Hansen R., Lee S. Comparative Study of Variable Speed Drives for Turbo Compressors // *Applied Energy*, 2019, Vol. 251, Article 113364.
6. Bose B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. – Prentice Hall, 2002.
7. Mohan N. *Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink*. – Wiley, 2014.
8. Pillay P. *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives*. – Wiley, 2016.
9. Hendershot J. R., Miller T. J. E. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. – Magna Physics Publishing, 2010.

Надійшла: 11.02.2025

Received: 11.02.2025