

ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ. ЧАСТИНА 1: РОБАСТНИЙ АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ МОДЕЛЮВАННЯМ

Пересада С.М., д.т.н., проф., Желінський М.М., аспірант, Рандюк А.А., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Генерація енергії зі змінною кутовою швидкістю генератора є привабливим рішенням для багатьох енергетичних установок: дизель, гідро і вітрових електростанцій, наземних транспортних засобів, аерокосмічних та морських силових систем [1]. Основна перевага генерації енергії зі змінною швидкістю є більш висока енергоефективність первинного рушія і електричного генератора.

Генератор на основі машини подвійного живлення (МПЖ) з векторним керуванням є привабливим рішенням для генерації енергії зі змінною швидкістю, яка змінюється в діапазоні ковзання, зазвичай 20-30% від синхронної. Перетворювачу в колі ротора необхідно перетворювати лише незначну частку від загальної вихідної потужності, яка залежить від допустимого діапазону ковзання [2]. Синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ) найбільш часто використовуються в сучасних вітроелектростанціях. При цьому в системі генерації необхідне подвійне перетворення електричної енергії за допомогою АС-DC-АС перетворювача значної вартості [3]. Важливо також зазначити, що вартість СГПМ значно вище за асинхронну машину, що обумовлено необхідністю застосування рідкоземельних магнітних матеріалів, які мають дуже обмежене походження, і їх вартість постійно зростає. Тенденція до зниження використання дорогих рідкоземельних магнітів призвела до відновлення інтересу до розробки сучасних концепцій проектування та регулювання асинхронних машин.

Проста та дешева система генерації на основі асинхронної машини з конденсаторним самозбудженням [4] не забезпечує необхідної точності регулювання напруги та частоти.

Альтернативним підходом до генерування є використання асинхронної машини в системах з полеорієнтованим векторним керуванням, результати досліджень яких представлено у великій кількості публікацій починаючи з 1990-х років. Функціональна схема системи з асинхронним генератором (АГ) наведена на рис. 10. Стандартна структура системи генерації є копією системи керування кутовою швидкістю у векторно-керованому електроприводі, в якій ПІ-регулятор швидкості заміненого ПІ-регулятором напруги ланки постійного струму. Схожість двох систем обумовлена тим, що виходи двох регуляторів формують сигнал завдання для моменту електричної машини. Підсистема потокозчеплення в системах генерації і електропривода однакова і базується на прямому чи непрямому полеорієнтуванні.

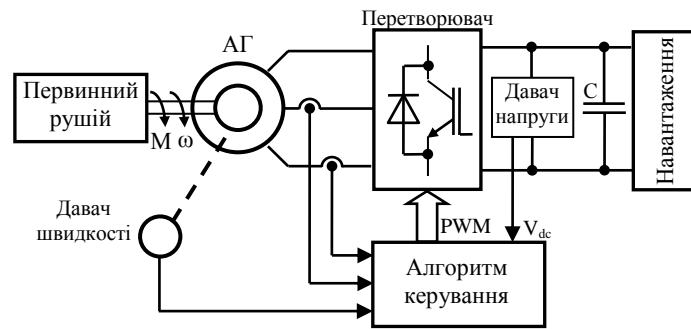


Рисунок 1 – Структурна схема системи генерування з АГ

В алгоритмі [5] зміни кутової швидкості та потоку компенсуються при формуванні моментоутворюючої компоненти вектора струму статора, запропоновано новий спостерігач вектора потокозчеплення, який враховує насичення АГ. В [6] автори пропонують використовувати лінеаризовану модель АГ на основі аналізу в частотній області. Оптимізація активних втрат розглянута в [7]. Властивості стійкості існуючих систем теоретично не доведені, тому їх працездатність в умовах параметричних збурень вимагає додаткових досліджень.

В [8] автори запропонували новий алгоритм векторного керування напругою асинхронного генератора (АГ), заснований на методі лінеаризації зворотним зв'язком. На відміну від існуючих рішень запропонований регулятор забезпечує лінійну динаміку похибки регулювання напруги ланки постійного струму, завдяки компенсації змін потоку та швидкості, а також врахуванню в алгоритмі активних втрат асинхронного генератора.

Відомо, що алгоритми векторного керування асинхронними машинами чутливі до варіацій опору роторного кола. Ця проблема добре вивчена в літературі і запропоновано ряд рішень на основі робастних, адаптивних та інваріантних підходів [9], [10] для систем векторного керування асинхронними двигунами. В той же час в системах генерування ця проблема не досліджувалась.

Вперше в [11] представлено робастний до змін активного опору ротора алгоритм непрямого векторного керування, який потенційно забезпечує робастну стабілізацію динамічних показників системи та покращену енергетичну ефективність процесів електромеханічного перетворення енергії. При цьому властивості алгоритму [11] вивчені недостатньо, що і визначає актуальність даного дослідження, яке складається з двох частин. В першій представлено результати дослідження динамічних показників системи та енергетичної ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії в умовах варіацій активного опору ротора, які отримано шляхом математичного моделювання, в той час як в другій – результати експериментальних досліджень.

Мета роботи. Дослідити шляхом моделювання динамічні показники системи векторного керування АГ [11] та енергетичну ефективність процесів електромеханічного перетворення енергії в умовах варіацій активного опору ротора.

Матеріали і результати досліджень. Стандартна двофазна модель електричної частини симетричного асинхронного генератора в умовах припущення лінійності магнітних кіл в системі координат $(d-q)$, що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_0 , запишеться у вигляді [8]:

$$\begin{aligned} \dot{i}_d &= -\gamma i_d + \omega_0 i_q + \alpha \beta \psi_d + \beta \omega \psi_q + u_d / \sigma, \\ \dot{i}_q &= -\gamma i_q - \omega_0 i_d + \alpha \beta \psi_q - \beta \omega \psi_d + u_q / \sigma, \\ \dot{\psi}_d &= -\alpha \psi_d + (\omega_0 - \omega) \psi_q + \alpha L_m i_d, \\ \dot{\psi}_q &= -\alpha \psi_q - (\omega_0 - \omega) \psi_d + \alpha L_m i_q, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0, \\ P_s &= -(3/2)(u_d i_d + u_q i_q), \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{u} = (u_d, u_q)^T$ - вектор керуючих напруг статора, $\mathbf{i} = (i_d, i_q)^T$, $\boldsymbol{\psi} = (\psi_d, \psi_q)^T$ - вектор складових струму статора та потокозчеплень ротора, ω - кутова швидкість ротора, ω_0 - синхронна швидкість обертової системи координат $(d-q)$, ε_0 - кутове положення синхронної системи координат $(d-q)$, P_s - активна потужність, вироблена асинхронним генератором.

Додатні константи в (1), що зв'язані з електричними параметрами асинхронного генератора, визначаються наступним чином:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \quad (2)$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 - активні опори та індуктивності статора і ротора, L_m - індуктивність намагнічування.

Динаміка напруги ланки постійного струму описується як:

$$\dot{V}_{dc} = (i_{dc} - i_L) / C, \quad (3)$$

$$i_{dc} = P_{dc} / V_{dc} = P_s / V_{dc}, \quad (4)$$

де C - ємність ланки постійного струму, i_{dc} - струм, що віддається в ланку постійного струму, i_L - струм навантаження.

Розглянемо алгоритм робастного непрямого векторного керування системою (1), який складається з [11]:

– регулятору потокозчеплення

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m i_q / \psi^* + \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d / \psi^*, \\ i_d^* &= (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*) / \alpha L_m, \end{aligned} \quad (5)$$

– спостерігача струму статора по осі d

$$\dot{\hat{i}}_d = -\gamma \hat{i}_d + \omega_0 i_q + \alpha \beta \psi^* + \sigma^{-1} u_d + k_1 \tilde{i}_d, \quad (6)$$

– регуляторів струму по осях d та q:

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma (\gamma i_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta \psi^* - k_{id} \tilde{i}_d + z_d), \\ \dot{z}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left(\gamma i_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* - k_{iq} \tilde{i}_q + z_q \right), \\ \dot{z}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$ та $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$ - похибки регулювання струму, i_d^*, i_q^* - задані струми по осі d та q відповідно; z_d, z_q - інтегральні складові регуляторів струму; (k_i, k_{ii}) - пропорційні та інтегральні коефіцієнти регуляторів струму; $\gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d / \psi^*$ - робастифікуючий зворотній зв'язок, $\psi^* > 0$ - задане потокозчеплення, γ_1 - коефіцієнт налаштування робастифікуючого зворотнього зв'язку, k_i - коефіцієнт спостерігача струму статора;

– регулятора напруги

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{-\frac{L_m}{L_2} \omega \psi^* + \sqrt{\left(\frac{L_m}{L_2} \omega \psi^*\right)^2 - 4 \left(\alpha \frac{L_m^2}{L_2} + R_1\right) \rho}}{2 \left(\alpha \frac{L_m^2}{L_2} + R_1\right)}, \\ \rho &= R_1 \psi^{*2} L_m^{-2} + (2/3) V_{dc} \left(i_L + C(-k_v \tilde{V}_{dc} + x_v) \right), \\ \dot{x}_v &= -k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \end{aligned} \quad (9)$$

де $\tilde{V}_{dc} = V_{dc} - V_{dc}^*$ - похибка відпрацювання напруги ланки постійного струму, k_v, k_{vi} - пропорційний та інтегральний коефіцієнт регулятора напруги.

Алгоритм стандартного непрямого векторного керування системою генерування (1) [11] включає:

– регулятор потокозчеплення

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m i_q / \psi^*, \\ i_d^* &= \alpha \psi^* / \alpha L_m, \end{aligned} \quad (10)$$

– регулятори струмів по осях d та q

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma \left(-\omega_0 i_q - k_{id} \tilde{i}_d + z_d \right), \\ \dot{z}_d &= -k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left(\omega_0 i_d - k_{iq} \tilde{i}_q + z_q \right), \\ \dot{z}_q &= -k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (12)$$

– регулятор напруги

$$\begin{aligned} i_q^* &= -\left(-k_{v0} \tilde{V}_{dc} + x_v \right), \\ \dot{x}_v &= -k_{v0i} \tilde{V}_{dc}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для дослідження динамічних показників системи рис. 1 та енергетичної ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії в умовах варіацій активного опору ротора проведено моделювання алгоритмів непрямого

векторного керування АГ: стандартного (СВК) (10) - (13) та робастного (РВК) (5) - (9).

При моделюванні використовувалася наступна послідовність операцій керування, що представлена на рис. 20:

- первинний рушій обертає вал АГ зі сталою кутовою швидкістю 140 рад/с;
- початкова напруга ланки постійного струму складає 320 В;
- в момент часу $t = 0 \div 0.3$ с генератор збуджується по траєкторії з початкового значення 0.02 Вб до 0.4 Вб;
- на інтервалі часу $t = 0.5 \div 1$ с відпрацьовується траєкторія напруги, яка починається з 320 В і досягає 540 В;
- в момент часу $t = 1.25$ с за 0.3 с, завдання потокозчеплення зростає з 0.4 Вб до номінального значення 0.96 Вб;
- в момент часу $t = 2$ с під'єднується навантаження до ланки постійного струму, опір якого 193 Ом (струм 2.8 А), що відповідає номінальній потужності АГ, а в $t = 3.5$ с навантаження від'єднується.

Параметри налаштування системи: $k_{id} = k_{iq} = 500$, $k_{ii} = k_{iq}^2 / 4$ (7), (8), (11) та (12); $k_v = 140$, $k_{vi} = k_v^2 / 2$, $\gamma_1 = 0.02$, $k_1 = 100$ (9); $k_{v0} = 0.2$, $k_{v0i} = 15$ (13). Номінальні дані та параметри досліджуваного генератора наведено в додатку.

Контури регулювання налаштовані з коефіцієнтом демпфування $\xi = \sqrt{2} / 2$. Частота недемпфованих коливань контурів регулювання задається $\omega_{ov}^2 = k_{vi}$ для контура регулювання напруги і $\omega_{oi}^2 = k_{ii}$ для контура регулювання струму. Для розділення процесів керування в часі коефіцієнти регуляторів напруги та струму вибираються з наступної умови $\omega_{oi} > (3 - 4)\omega_{ov}$.

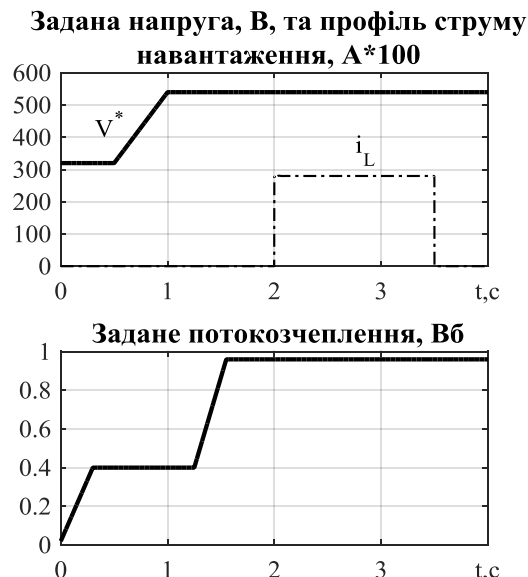


Рисунок 2 – Задані траєкторії напруги, модуля вектора потокозчеплення ротора та профіль струму навантаження

Динамічні процеси в системі з РВК при номінальному активному опорі ротора зображено на рис. 3. З рис. 3 видно, що динамічна похибка напруги при відпрацюванні заданої траєкторії ∓ 1 В, а у моменти під'єднання та від'єднання

навантаження ∓ 18 В. Похибки відпрацювання потокозчеплення по осям d та q $\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q$ нульові, що свідчить про асимптотичне відпрацювання траєкторії потокозчеплення з одночасним асимптотичним полеорієнтуванням. Похибки потокозчеплення по осі d та q визначені як $\tilde{\psi}_d = \psi_d - \psi^*$, $\tilde{\psi}_q = \psi_q$.

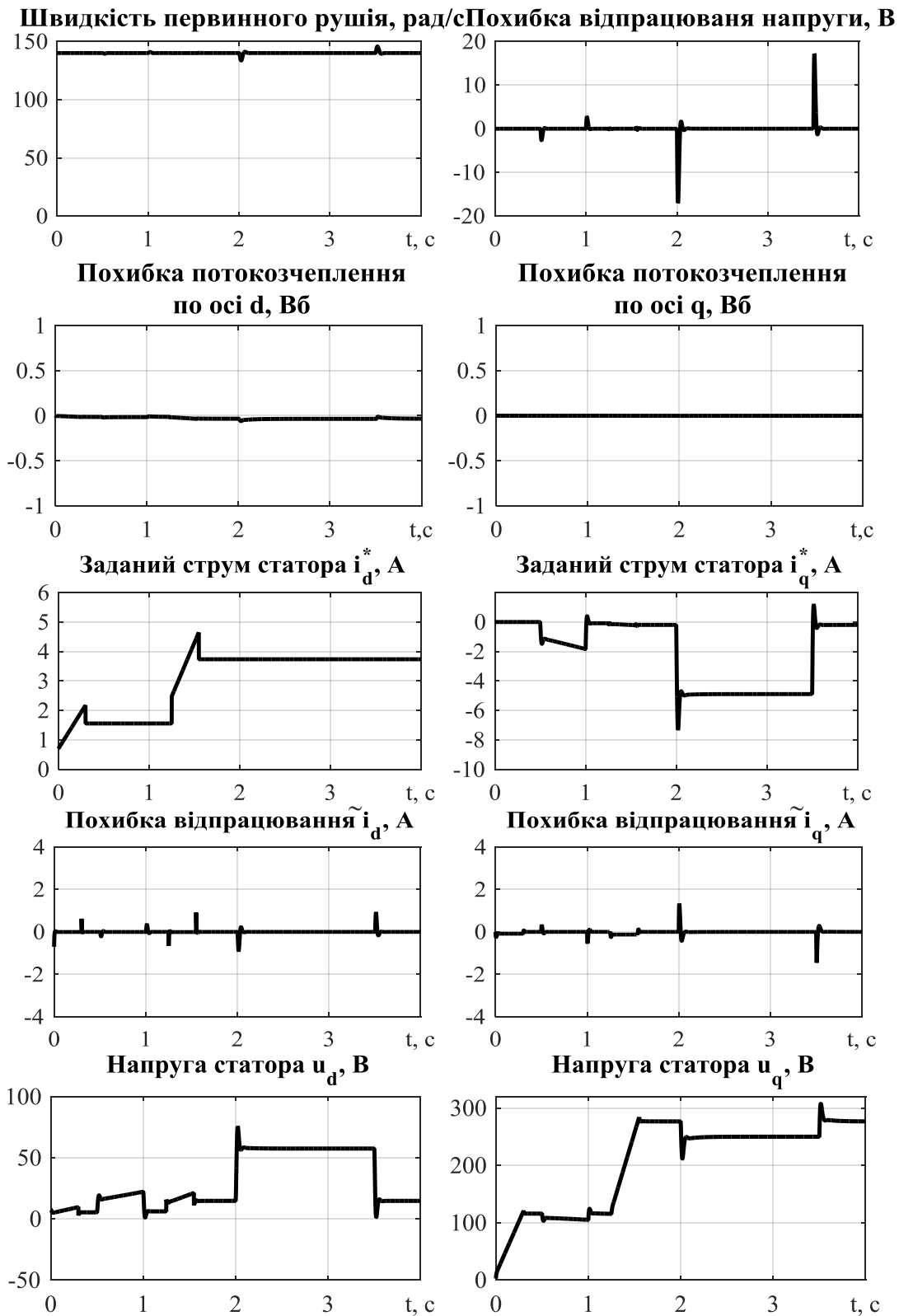


Рисунок 3 – Перехідні процеси в системі РВК без варіації активного опору ротора

Аналізуючи похибки відпрацювання струмів по осях d і q з рис. 30 встановлюємо, що присутні динамічні похибки в моменти часу, коли змінюється похибка вектора потокозчеплення, під'єднується та від'єднується навантаження. Для підтримання номінального потокозчеплення 0.96 Вб необхідний струм по осі d складає 3.87 А. При під'єднанні номінального навантаження величина струм по осі q дорівнює -4.89 А.

Для дослідження робастності визначимо зміну активного опору ротора як $Q = \hat{R}_2 / R_{2n}$, де R_{2n} - номінальне значення активного опору ротора, \hat{R}_2 - активний опір роторного кола, який використано у алгоритмі керування. При дослідженні СВК та РВК зміна активного опору ротора обрана в межах $0.7 < Q < 1.6$, в яких алгоритм СВК є стійким.

На рис. 40а представлено перехідні процеси системи СВК при варіації активного опору ротора $Q = 0.7$, а на рис. 40б для $Q = 1.6$.

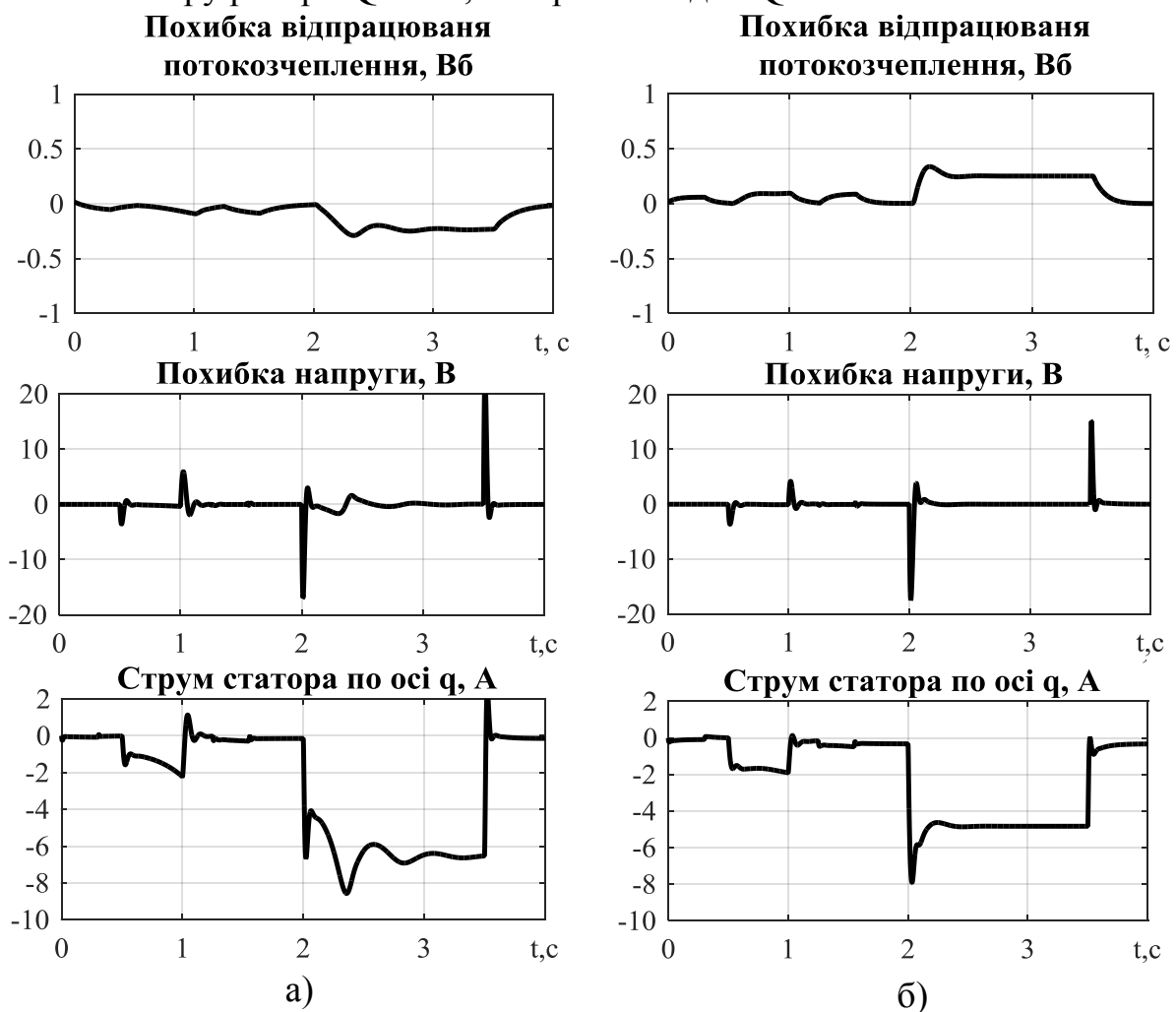


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів при СВК з варіацією активного опору ротора: а) $Q = 0.7$ б) $Q = 1.6$

З рис. 40а ($Q = 0.7$) видно, що при під'єднанні та від'єднанні навантаження порушується асимптотичність відпрацювання модуля вектора потокозчеплення, виникає статична похибка $\tilde{\psi} = 0.23$ Вб, що визначена як $\tilde{\psi} = |\psi| - \psi^*$, де $|\psi|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора, який при цьому

зменшився до 0.76 Вб, що призвело до коливання та збільшення динамічної похибки відпрацювання напруги ∓ 20 В (+1%), а також усталеного значення струму статора по осі q -6.53 А (+36%).

З рис. 40б ($Q=1.6$) видно, що при під'єднанні та від'єднанні навантаження порушується асимптотичність відпрацювання модуля вектора потокозчеплення, виникає статична похибка $\tilde{\psi} = 0.25$ Вб, реальний модуль потокозчеплення при цьому збільшився до 1.21 Вб, що призвело до зменшення динамічної похибки відпрацювання напруги ∓ 17 В (-0.5%), струму статора по осі q -4.73 А (-1%), що має затягнутий аперіодичний характер.

На рис. 5а представлено перехідні процеси в системі РВК при варіації активного опору ротора $Q=0.7$, а на рис. 5б для $Q=1.6$.

З рис. 5а,б видно, що у моменти під'єднання та від'єднання навантаження завдання модуля вектора потокозчеплення відпрацьовується з нульовою статичною похибкою, виникає динамічна похибка відпрацювання напруги ∓ 17 В, яка залишається однаковою при варіації $Q=0.7$ та $Q=1.6$. В тих самих умовах струм статора по осі q при варіації $Q=0.7$ склав - 4.9 А, а при $Q=1.6$ дещо збільшився до -4.96 А (+1.2%).

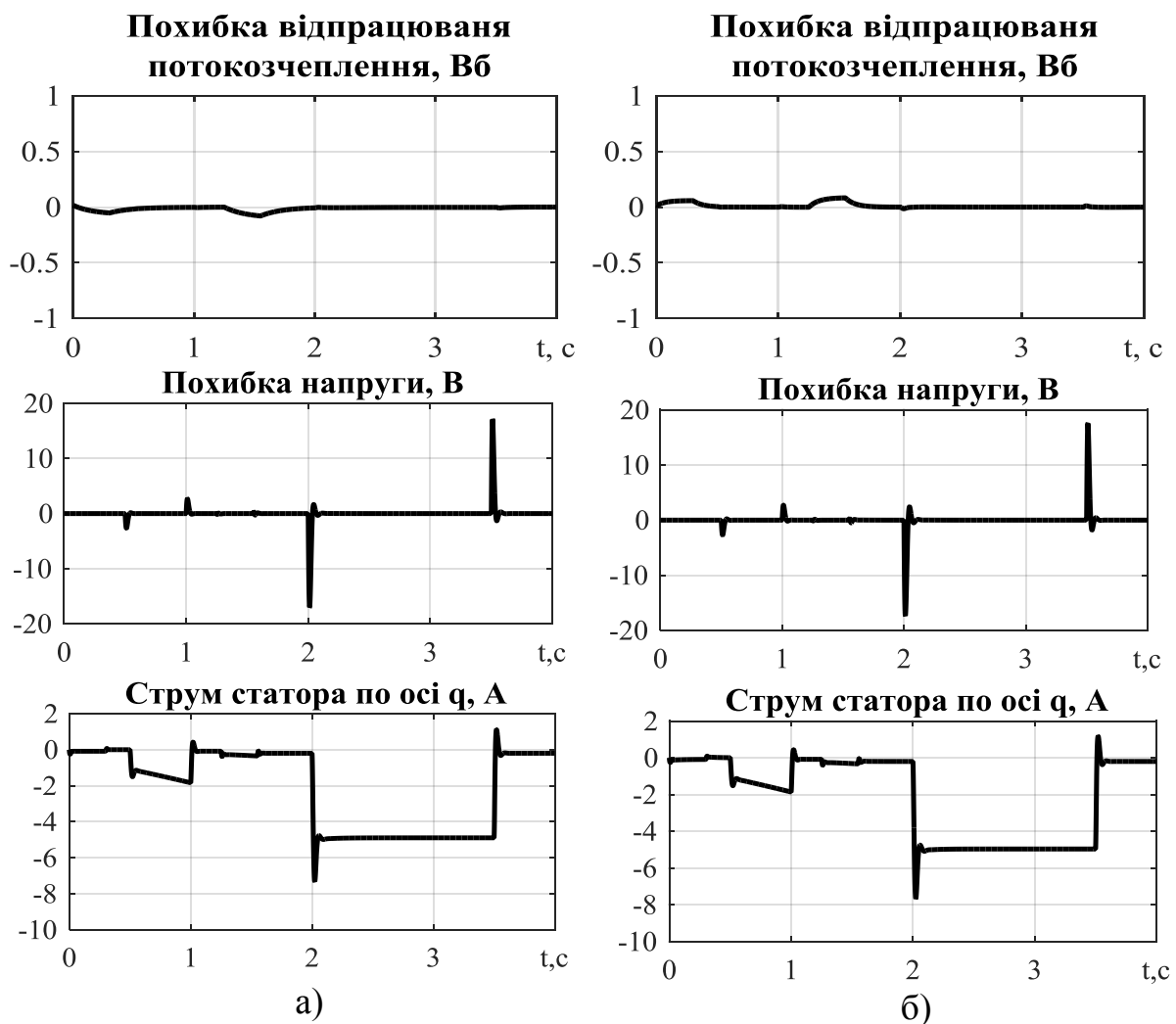


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів РВК з варіацією активного опору ротора: а) $Q=0.7$ б) $Q=1.6$

Для дослідження енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії в умовах варіації активного опору в діапазоні $0.7 < Q < 1.6$ проведено тест, результати якого наведено на рис. 6.

В умовах даного тесту в усталеному режимі роботи під номінальним навантаженням фіксувалися значення моментної компоненти струму статора, механічної потужності первинного рушія, модуля струму статора та модуля похибки відпрацювання потокозчеплення при зміні активного опору ротора. Усталені значення, які були зафіксовані при СВК позначені чорною пунктирною лінією, а при РВК – суцільною червоною.

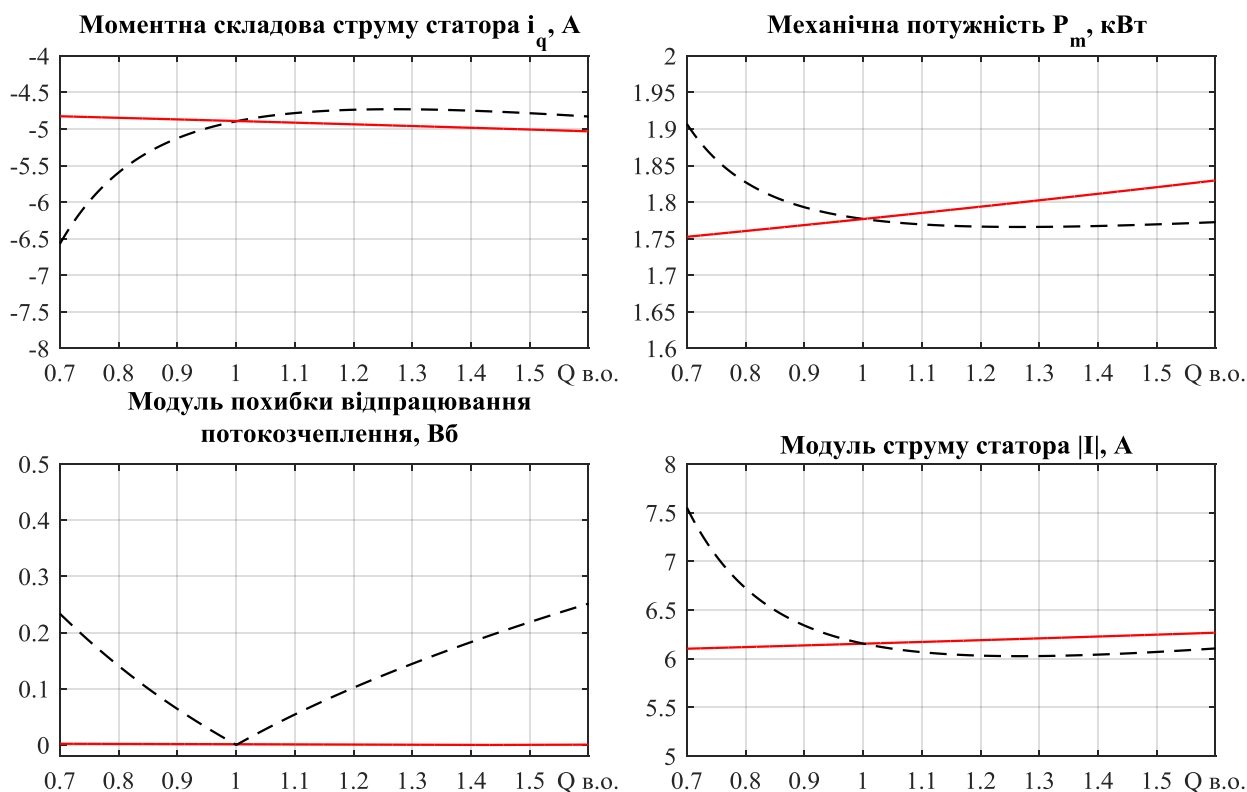


Рисунок 6 – Енергетичні характеристики при варіації активного опору ротора

З рис. 6 видно, що моментна складова струму статора по осі q , вхідна механічна потужність, модуль похибки відпрацювання потокозчеплення та струму статора при варіації $Q < 1$ з алгоритмом СВК збільшуються, а при дії РВК залишаються майже не змінними. Це пояснюється тим, що при варіації $Q < 1$ потокозчеплення зменшується, яке призводить до збільшення моментоутворюючої компоненти струму статора, а при варіації $Q > 1$, навпаки, потокозчеплення збільшується, а моментоутворююча компонента струму статора при цьому зменшується. Тут важливо відмітити, що режим, коли $Q > 1$ не відповідає фізиці роботи в реальній машині, тому що не врахована крива намагнічування АГ. Фактично, при такій варіації машина входить в насичення, а в моделюванні, з лінійною магнітною характеристикою, цей ефект не враховується. Тому, результати отримані при варіації $Q > 1$ мають бути досліджені експериментально.

Висновки. Представлено результати порівняльного тестування двох алгоритмів непрямого векторного керування АГ: стандартного та робастного до

варіацій активного опору ротора. За допомогою моделювання встановлено, що на відміну від стандартного алгоритму, робастний алгоритм векторного керування АГ [11] забезпечує робастність до варіацій активного опору ротора, гарантує збереження динамічних показників якості керування у контурах регулювання струму, модуля вектора потокозчеплення та напруги ланки постійного струму. При моделюванні енергетичних характеристик встановлено, поведінка системи в умовах варіації $Q > 1$ не відповідає реальній фізиці роботи машини. Для підтвердження цього факту будуть проведені експериментальні дослідження динамічних показників системи та енергетичної ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії в умовах варіацій активного опору ротора, що наведено у другій частині статті.

Додаток. Номінальні параметри досліджуваного АГ

Механічна потужність	2.2 кВт	Опір статора	$R_s = 3.5 \text{ Ом}$
Момент	15 Нм	Опір ротора	$R_r = 2.1 \text{ Ом}$
Частота	50 Гц	Індуктивність намагнічуючого контуру	$L_m = 0.248 \text{ Гн}$
Число пар полюсів	2	Індуктивність статора	$L_s = 0.266 \text{ Гн}$
Номінальний струм	5 А	Індуктивність ротора	$L_r = 0.266 \text{ Гн}$

Перелік посилань

1. Lyra R. O. C. Direct and indirect flux control of an isolated induction generator / R. O. C. Lyra, S. R. Silva, P. C. Cortizo // IEE Power Electronics and Drive Systems. – 1995. pp. 140–145.
2. Iwanski G. DFIG-Based Power Generation System With UPS Function for Variable-Speed Applications / G. Iwanski, W. Koczara. // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2008. – №8. – pp. 3047–3054.
3. Seung-Ho Song Implementation and control of grid connected AC-DC-AC power converter for variable speed wind energy conversion system / Seung-Ho Song, Shin-il Kang, Nyeon-kun Hahm // APEC '03. Eighteenth Annual IEEE. – 2003. – №1. – pp. 154–158.
4. Murthy S. Analysis of self-excited induction generators / S. Murthy, O. Malik, A. Tandon // IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib. – 1982. – №6. – pp. 260–265.
5. Levi E. Rotor Flux Oriented Induction Machine as a DC Power Generator / S. Murthy, O. Malik, A. Tandon // European Power Electronics and Drives. – 1999. – pp. 1–8.
6. Hazra S. DC bus voltage build up and control in stand-alone wind energy conversion system using direct vector control of SCIM / S. Hazra, P. Sensarma // Electr. Power Appl. IEE Proc. – 2008. – №2. – pp. 2143–2148.
7. Mesemanolis A. High-Efficiency Control for a Wind Energy Conversion System With Induction Generator / A. Mesemanolis, C. Mademlis, I. Kioskeridis // IEEE Trans. Energy Convers. – 2012. – №4. – pp. 958–967.
8. Peresada S. Indirect Field Oriented Output Feedback Linearized Control of Induction Generator / S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Pechenik, N. Zhelinsky // In Proc. IEEE Int. Conf. on Intel. Energy and Power Systems, IEPS. – 2016. – pp. 187-191.
9. Peresada S. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor / S. Peresada and A. Tonielli // Int. J. Adapt. Control Signal Process. – 2000. – №14. – pp. 177–200.
10. Peresada S. Theoretical and experimental comparison of indirect field-oriented controllers for induction motors / S. Peresada, A. Tilli, A. Tonielli // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2003. – №1. – pp. 151–163.
11. Bozhko S. Robust Indirect Field Oriented Control of Induction Generator / S. Bozhko, S. Peresada, S. Kovbasa, M. Zhelinsky // Int Conf. on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and the International Transportation Electrification Conference, ESARS ITEC 2016, 2 - 4 Nov, France. – 2016. – pp. 1-6.