

17. *Про затвердження загальних вимог до системи фізичного захисту ядерних установок та ядерних матеріалів і загальних вимог до систем фізичного захисту ядерних матеріалів при їх перевезенні* : Наказ Державного комітету ядерного регулювання від 28.08.2008 № 156.

18. *Типовая методика оценки технического состояния, показателей надежности и остаточного ресурса для различных групп электротехнического оборудования АЭС* : МТ-Т.0.03.195-09. – К., 2009. – 68 с. – (Нормативный документ ГП НАЭК «Энергоатом». Методика).

19. *Управління виробництвом. Порядок продовження строку експлуатації обладнання за результатами оцінки технічного стану. Порядок заміни обладнання, яке відпрацювало регламентований строк експлуатації на однотипне* : СТП 3.3812.057-2010. – К., 2010. – 49 с.

20. *Security of Radioactive Sources [Implementing Guides]*. – Vienna, 2009. – 66 p. – (IAEA Nuclear Security Series No 11).

УДК 621.3.07

**Р.А. Косенко**, викладач-стажист

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

**Р.А. Косенко**, преподаватель-стажер

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

**Roman Kosenko**, teacher-trainee

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

### MODELING OF INDUCTION MOTOR VECTOR CONTROL

*Розроблено математичну модель електропривода з векторним керуванням. Виконано моделювання процесів, що протікають в електроприводі з системою векторного керування. За результатами моделювання проведений порівняльний аналіз векторного та скалярного електропривода.*

**Ключові слова:** система керування, векторне керування, двигун змінного струму, асинхронний двигун, електропривід.

*Разработана математическая модель электропривода с векторным управлением. Выполнено моделирование процессов, протекающих в электроприводе с системой векторного управления. По результатам моделирования проведен сравнительный анализ векторного и скалярного электропривода.*

**Ключевые слова:** система управления, векторное управление, двигатель переменного тока, асинхронный двигатель, электропривод.

*The mathematical model of the AC induction vector control drive is designed. Modeling of the processes occurring in the vector control drive is executed. Vector control drive compared to frequency control drive based on simulation results.*

**Key words:** control system, vector control, AC motor, induction motor, electric drive.

**Постановка проблеми.** Сучасний електропривід (ЕП) – це сукупність електромашин, апаратів і систем керування ними. Він є основним споживачем електричної енергії (до 65 % електроенергії, що виробляється у світі, споживається асинхронними двигунами (АД)) і головним джерелом механічної енергії у промисловості.

До основних вимог, що висувуються до електропривода, можна віднести:

- підтримка статичних і динамічних показників на високому рівні;
- широкий діапазон регулювання швидкостей;
- надійність;
- економічність.

Ці вимоги значною мірою визначають вибір структури систем керування електроприводами та її параметрів.

Останнім часом на перші місця виходять економічні вимоги, адже, переважно, в більшості технологічних систем енергетики, промисловості, сфери комунального господарства та інших галузей встановлені електродвигуни з розрахунку на максимальну продуктивність обладнання, тоді як час пікового навантаження, тобто час роботи

обладнання з максимальною продуктивністю, становить усього 10–15 % від загального часу роботи обладнання [6].

Найефективнішим способом економії енергії на всіх виробництвах, де необхідне регулювання продуктивності механізмів на базі електродвигунів змінного струму, є застосування керованого електропривода змінного струму. Впровадження такого електропривода на механізмах з навантаженням, що має квадратичний зв'язок між швидкістю та струмом споживання (насоси, вентилятори) дозволяє досягти економії електроенергії в 30–70 % [5].

**Мета статті.** У статті висвітлено роботу щодо дослідження системи векторного керування асинхронним двигуном.

**Виклад основного матеріалу.** Прийнято розрізняти два основних способи керування електроприводами змінного струму, що використовують як перетворювачів енергії напівпровідникові перетворювачі частоти: частотне і векторне [1].

При частотному керуванні в ЕП реалізується один із статичних законів частотного керування (наприклад,  $V/f = \text{const}$  – підтримки постійного співвідношення між напругою статора та частотою обертання,  $\Psi_s = \text{const}$  – підтримки постійної амплітуди потоку статора,  $\Psi_r = \text{const}$  – підтримки постійної амплітуди потоку ротора і т. ін.). Управління реалізується, здебільшого, за середнім значенням змінних.

Частотне керування як керовані параметри використовує величини, що одержуються за межами двигуна, а саме напругу і частоту.

Сформовані за співвідношенням  $V/f$  сигнали напруги і частоти подаються на модулятор, який формує сигнали керування інвертором відповідно до заданих величин напруги і частоти за законами ШІМ.

Важливо зазначити, що цей метод не використовують давачі зворотного зв'язку, які вимірюють швидкість або позицію ротора двигуна. Оскільки немає зворотного зв'язку, цей метод керування має низьку вартість і є простим рішенням для економічної системи керування двигуном змінного струму.

Під час використання цієї техніки, яку також називають скалярним керуванням, орієнтування поля статора не виконується (під час формування фазних напруг положення ротора не береться до уваги), замість цього основними керуючими величинами є частота й амплітуда напруги на фазах двигуна.

Оскільки немає ніякого зворотного зв'язку за швидкістю або положенням, то неможливо керувати крутним моментом з хоч якимось ступенем точності.

При векторному керуванні процес регулювання здійснюється за миттєвим значенням змінних. У цифрових векторних системах може виконуватись управління за еквівалентними (усередненим на інтервалі дискретності керування) змінними. У цьому випадку реалізується принцип орієнтації векторних змінних одна відносно одної. Зокрема, дуже поширена орієнтація струмів і напруг відносно вектора потокозчеплення ротора. Орієнтація забезпечує роздільне (незалежне) керування моментом і потокозчепленням у динамічних і статичних режимах роботи привода. При такому підході у системі керування наявний у явному або в неявному вигляді контур регулювання електромагнітного моменту двигуна. У першому випадку реалізується принцип прямого керування моментом. Відповідні системи векторного керування мають назву системи прямого керування моментом. У «традиційних» системах векторного керування з орієнтацією струму статора за вектором потокозчеплення ротора роль контуру моменту виконує замкнутий контур активної складової струму статора.

Векторне керування є одним з найбільш передових методів керування, що застосовуються в електроприводі змінного струму, оскільки воно має певні суттєві переваги перед іншими, до яких можна віднести:

- можливість отримання максимального крутного моменту при нульовій швидкості (як у двигуна постійного струму);
- можливість застосування системи векторного керування як із синхронними, так і з асинхронними двигунами без внесення змін до самої системи керування;
- під час використання системи з асинхронним двигуном ми отримуємо надійність (відсутність щіток та простота конструкції) асинхронного двигуна з динамічними характеристиками, близькими до двигуна постійного струму;
- можливість побудови без сенсорних систем, що дає можливість перевести більшість використовуваних електроприводів на векторне керування, не втручаючись до механічної частини устаткування [8].

Для досягнення високої швидкості відгуку системи на зміни моменту та високої точності встановлення швидкості обертання необхідна наявність давача швидкості або положення. Це підвищує вартість системи, а також додає складності до традиційно простих АД. Замість давача швидкості/положення можна використовувати непрямі методи визначення положення ротора (на основі вимірних величин фазних напруг і струмів в обмотках статора). Системи векторного керування, в яких немає давача швидкості/положення, називаються “безсенсорними” [8].

### Короткий опис і основні перетворення векторного керування.

Високоєфективне керування двигуном характеризується плавним обертанням по всьому діапазоні швидкостей двигуна, повним контролем крутного моменту при нульовій швидкості, швидким прискоренням і сповільненням. Для досягнення цього для трифазних двигунів змінного струму використовується метод векторного керування. Основна ідея алгоритму векторного керування – це розкладання струму статора на компоненти, що продукують крутний момент і потік. Цими компонентами після розкладання можна керувати окремо. Після цього структура системи керування двигуном стає такою ж простою, як для двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

Для здійснення векторного керування необхідно виконати такі дії (рис. 1):

- виміряти електричні величини, прикладені до двигуна (фазні напруги і струми);
- за допомогою перетворення Кларка перевести їх у 2-фазну систему координат  $\alpha$ - $\beta$ ;
- розрахувати амплітуду та кут просторового вектора потоку ротора;
- за допомогою перетворення Парка перевести струми статора в обертальну систему координат d-q;
- окремо регулювати компоненти струму статора, що продукують крутний момент ( $i_{sq}$ ) і потік ( $i_{sd}$ );
- розрахувати вихідний просторовий вектор напруги статора;
- перевести просторовий вектор напруги статора з обертальної системи координат d-q назад у 2-фазну систему координат  $\alpha$ - $\beta$ , закріплену відносно статора, за допомогою зворотного перетворення Парка;
- згенерувати вихідні 3-фазні напруги, використовуючи просторово-векторну модуляцію.

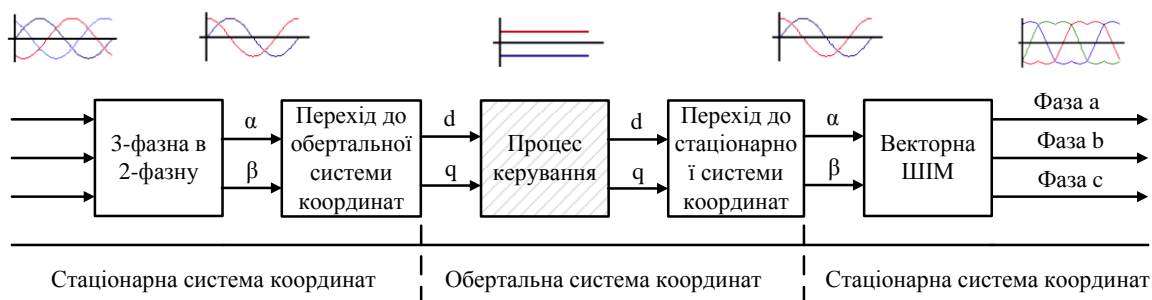


Рис. 1. Перетворення сигналів при векторному керуванні

Для того, щоб розкласти струми на компоненти, що продукують момент і потік ( $I_{sd}, I_{sq}$ ), потрібно знати положення потоку намагнічування двигуна. Це потребує точної інформації про швидкість ротора, яку можна отримати з датчика швидкості або положення, прикріпленого до ротора. Як датчі позиції для приводів векторного керування використовуються інкрементні датчики та енкодери. У критичних за вартістю випадках, наприклад у пральних машинах, широко використовуються тахогенератори. У деяких випадках використання датчиків швидкості/положення не бажане, отже, потрібно не вимірювати швидкість/положення безпосередньо, а використовувати деякі непрямі методи для оцінювання положення ротора. Алгоритми, які не використовують датчиків швидкості, називаються "безсенсорним керуванням" [7].

Одним з основних методів, які використовуються для аналізу поведінки систем електропривода, є математичне моделювання. Для проведення дослідження була розроблена математична модель електропривода.

На рис. 2 показана структурна схема електропривода з векторним керуванням, яка реалізує описані вище дії.

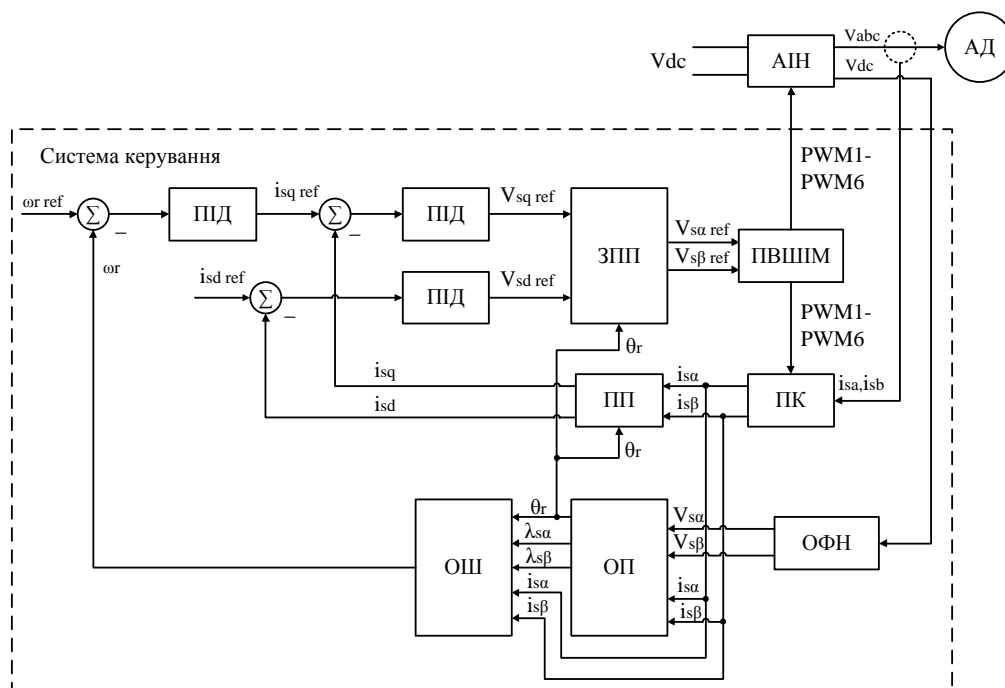


Рис. 2. Структурна схема електропривода з векторним керуванням

Блок-схема містить такі блоки:

- ПІД-регулятор (ПІД);
- перетворення Парка (ПП);
- перетворення Кларк (ПК);
- зворотне перетворення Парка (ЗПП);
- блок генерації векторної ШІМ (ПВШІМ);
- блок обчислення фазних напруг (ОФН);
- оцінювач потоку (ОП);
- оцінювач швидкості (ОШ).

ПІД-регулятор (ПІД) використовується для регулювання керуючих величин у контурах швидкості ( $\omega_r$ ), потокозчеплення ротора ( $I_{sd}$ ) та крутного моменту ротора ( $I_{sq}$ ).

Перетворення Парка (ПП) перетворює входні вектори у 2-координатній ортогональній стаціонарній системі координат у вихідні вектори у 2-координатній ортогональній обертальній системі координат.

Математично блок ПП описується рівняннями:

$$\begin{cases} I_d = I_a \cdot \cos \theta + I_\beta \cdot \sin \theta \\ I_q = -I_a \cdot \sin \theta + I_\beta \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

Перетворення Кларк (ПК) перетворює входні вектори у збалансованій 3-координатній системі координат у вихідні вектори в 2-координатній ортогональній стаціонарній системі координат.

Математично блок ПК описується рівняннями:

$$\begin{cases} I_a = I_a \\ I_\beta = 2I_b + I_a / \sqrt{3}. \end{cases} \quad (2)$$

Зворотне перетворення Парка (ЗПП) перетворює входні вектори у 2-координатній ортогональній обертальній системі координат у вихідні вектори у 2-координатній стаціонарній системі координат.

Математично блок ЗПП описується рівняннями:

$$\begin{cases} I_a = I_D \cdot \cos \theta - I_Q \cdot \sin \theta \\ I_\beta = I_D \cdot \sin \theta + I_Q \cdot \cos \theta. \end{cases} \quad (3)$$

Блок генерації векторної ШИМ (ПВШИМ) обчислює коефіцієнти заповнення, необхідні для генерації опорної напруги статора з використанням техніки просторово-векторної ШИМ.

Блок обчислення фазних напруг (ОФН) обчислює трифазні напруги, що подаються на електродвигун. Трифазні напруги можуть бути відновлені, використовуючи величину постійної напруги на вході інвертора і три функції перемикання верхніх ключів інвертора.

Оцінювач потоку (ОП) розраховує потік ротора для 3-фазного асинхронного двигуна. Для зменшення помилок, пов'язаних із точністю інтегратора і вимірними опорними напругами статора, напруги компенсуються ПІ-регуляторами (рис. 3). Таким чином, цей оцінювач потоку може працювати в широкому діапазоні швидкостей навіть при дуже низьких швидкостях.

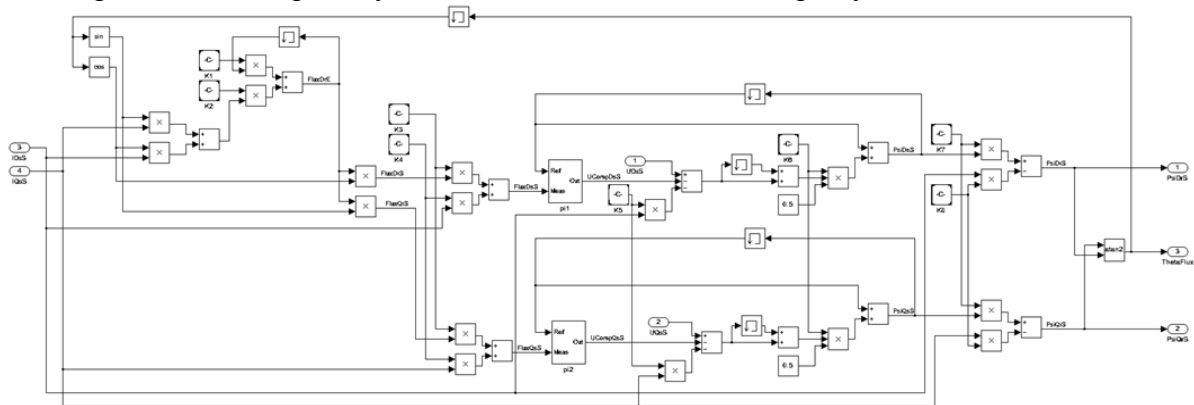


Рис. 3. Структурна схема моделі оцінювача потоку

Оцінювач швидкості (ОШ) розраховує швидкості двигуна на основі оціненого потоку ротора та вимірних струмів статора (рис. 4).

ОП і ОШ фактично представляють собою математичну модель двигуна і тому їх правильна робота значною мірою залежить від точності вимірів параметрів двигуна (опір статора (Rs), опір ротора (Rr), індуктивність розсіювання статора (Lsl), індуктивність розсіювання ротора (Lrl), індуктивність намагнічування (Lm), базовий струм (Ib), базова фазна напруга (Vb), число полюсів (p), номінальний струм (Ib), номінальна електрична кутова швидкість (ωb)).

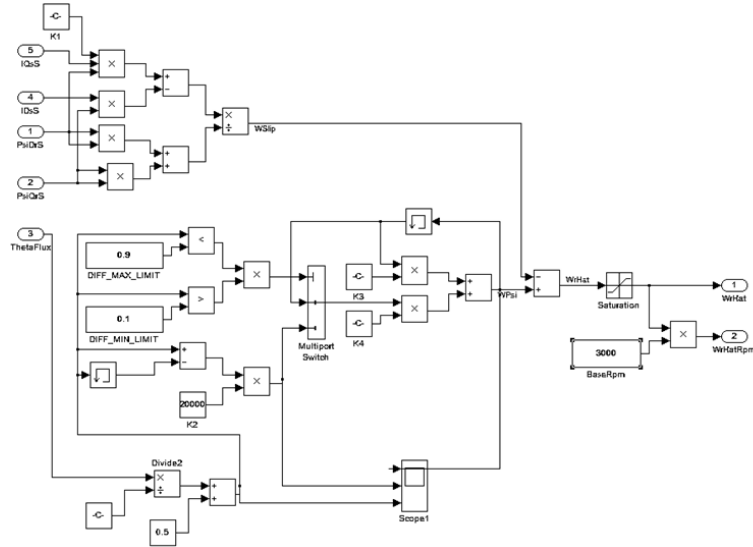


Рис. 4. Структурна схема моделі оцінювача швидкості

Під час моделювання електропривода використовується стандартна модель двигуна з бібліотеки SimPowerSystems пакета Matlab. Для моделювання був обраний двигун АИС80В2, відповідно до параметрів двигуна були розраховані параметри моделі. Зібрана модель установки наведена на рис. 5.

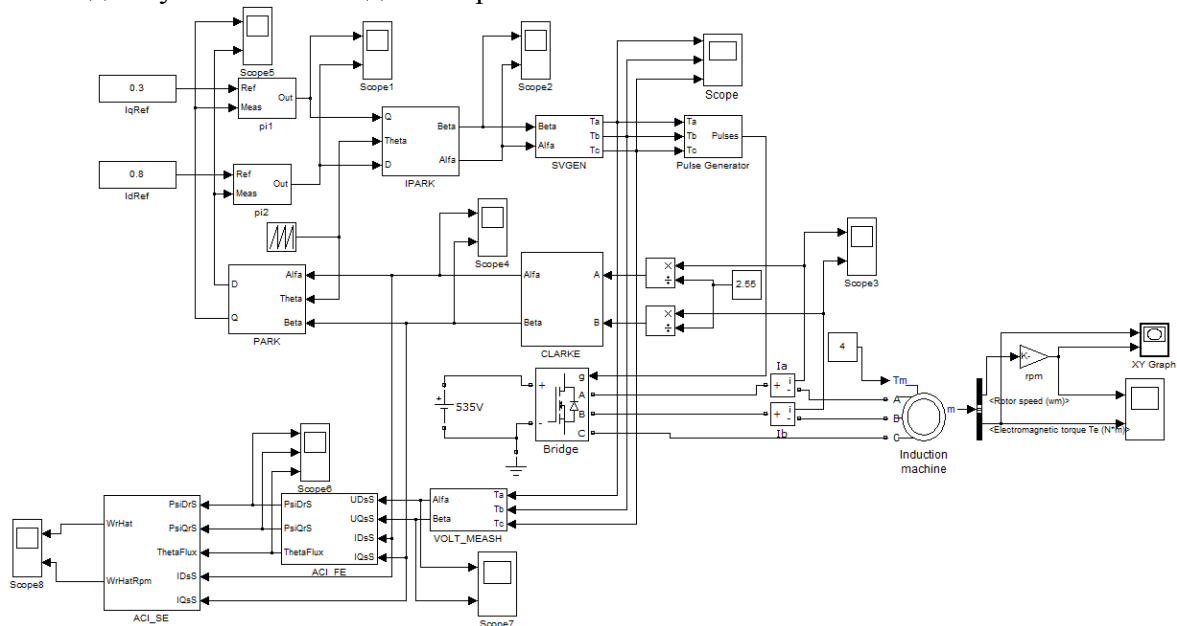


Рис. 5. Модель замкненої за струмом статора системи з оцінювачами потоку та швидкості

Модель складається з таких блоків:

- IPARK – блок зворотного перетворення Парка;
- SVGEN – блок генерації векторної ШІМ;
- Pulse Generator – блок генерації опорного сигналу;
- Bridge – трьохфазний інвертор;
- Induction machine – асинхронний двигун змінного струму;
- PARK – блок перетворення Парка;
- CLARKE – блок перетворення Кларк;
- pi1 – ПІ-регулятор складової Iq струму статора;
- pi2 – ПІ-регулятор складової Id струму статора;
- VOLT\_MEASH – блок обчислення фазних напруг;

- ACI\_FE – блок оцінювача потоку;
- ACI\_SE – блок оцінювача швидкості.

У розімкнутій по положенню системі опорний сигнал кутового положення ротора двигуна отримуємо з генератора пилоподібних імпульсів, частота цих імпульсів визначає частоту обертання двигуна:

$$n = \frac{60}{p \cdot T} = \frac{60}{1 \cdot 0,04} = 1500; \quad (4)$$

де  $p$  – кількість пар полюсів;

$T$  – період «пилки».

На блок перетворення Кларк подаються нормовані за величиною номінального струму статора (2,55 А) струми статора. Під час моделювання на виході блоку перетворення Кларк були отримані два синусоїдальні сигнали, причому  $\alpha$ -складова рівна струму в фазі статора А і випереджає  $\beta$ -складову на  $90^\circ$ , частота вихідних сигналів рівна частоті опорної «пилки».

Далі  $I_\alpha$  та  $I_\beta$  подаються на блок перетворення Парка, на виході якого отримуємо складові струму статора в обертальній системі координат  $i_d$  та  $i_q$ . Оскільки ці складові незалежні від часу, то їх можна подавати напряму на ПІ-регулятори та використовувати для керування струмом статора. На рис. 6 видно, що складові  $i_d$  та  $i_q$  в усталеному режимі прямують до деяких сталих величин, тобто процес регулювання сходиться.

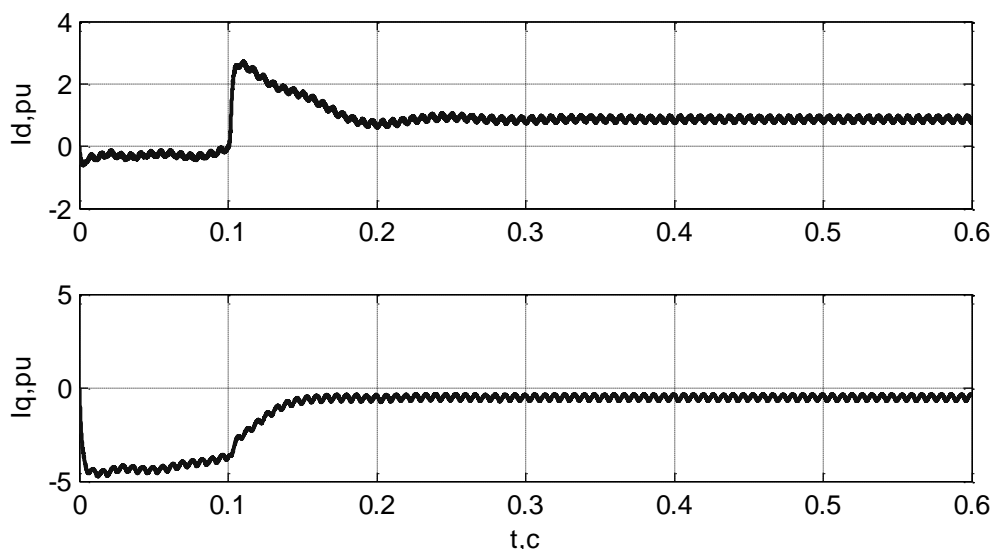


Рис. 6. Складові струму статора  $I_d$   $I_q$  в обертальній системі координат статора

Після регулювання струм статора переводиться назад в стаціонарну систему координат (блоком ЗПП) та формуються необхідні для його забезпечення коефіцієнти заповнення для стійок інвертора. Вимірний під час моделювання коефіцієнт заповнення для фази А інвертора наведений на рис. 7, на якому чітко видно специфічну для просторово-векторної модуляції форму фазних напруг (з підмішуванням 3-ї гармоніки), така форма забезпечує високий коефіцієнт використання постійної напруги на вході інвертора [1].

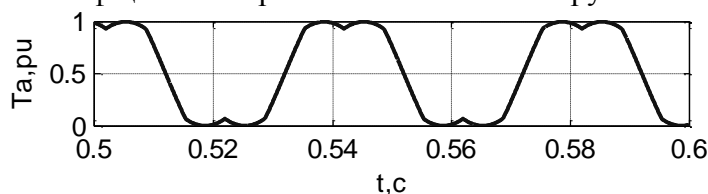


Рис. 7. Коефіцієнти заповнення для фаз А, В і С

На рис. 8 наведені оцінені складові потоку ротора та оцінене кутове положення ротора. За результатами моделювання оцінене положення ротора збіглося з опорним сигналом на виході блока Pulse Generator, що підтвердило правильність налаштування блока ОП. Складові потоку ротора в усталеному режимі представляють собою синусоїди з амплітудою 1 у відносних одиницях, зсунуті одна відносно одної на  $90^\circ$ .

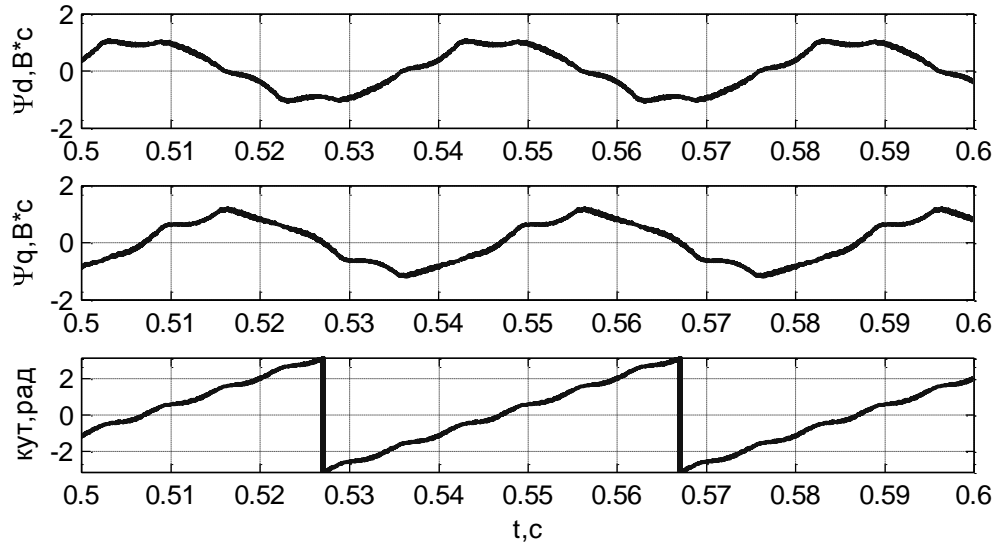


Рис. 8. Оцінені складові потоку в системі координат статора ( $\Psi_d$ ,  $\Psi_q$ ) та оцінене кутове положення ротора в усталеному режимі (збільшено)

На основі оціненого потоку та положення ротора оцінювач швидкості обчислює швидкість обертання ротора у відносних та абсолютних одиницях. Оскільки промодельована система розімкнена по положенню ротора, то частота «пилки» на виході оцінювача потоку визначається частотою опорної «пилки», тому оцінена швидкість не залежить від фактичної частоти обертання ротора і лише збігається з нею в усталених режимах (тобто після встановлення сталої швидкості обертання, визначеної частотою опорної «пилки»).

На рис. 9 наведені діаграми оціненої та вимірної на виході моделі двигуна швидкості ротора, характер оціненої кривої розгону на початковому етапі відрізняється від вимірюваної за зазначеними вище причинами і визначається наявним в оцінювачі потоку фільтром низької частоти (ФНЧ).

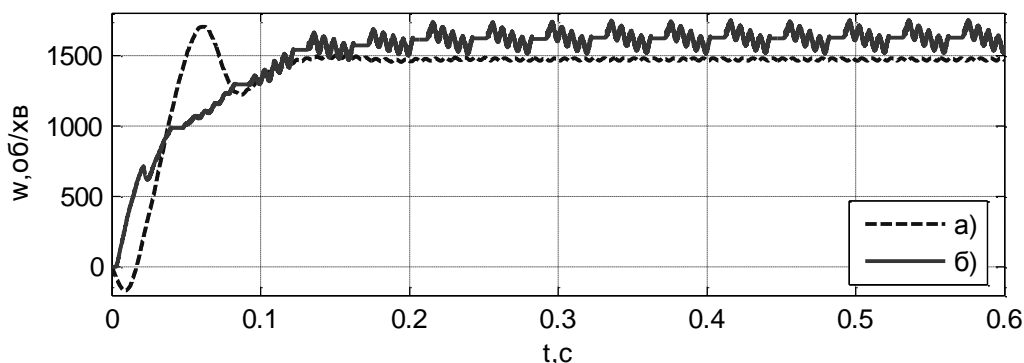


Рис. 9. Швидкість на виході моделі двигуна (а) та на виході оцінювача (б)

Після перевірки всіх блоків моделі системи керування було проведено порівняння якісних характеристик приводів з векторним та скалярним керуванням. З тим же двигуном був промодельований електропривід з частотним керуванням. Моделювання проводилося на частоті обертання, рівній половині від номінальної та з навантаженням 3Н·м для обох типів керування. Порівняльні діаграми розгону зображені на рис. 10.



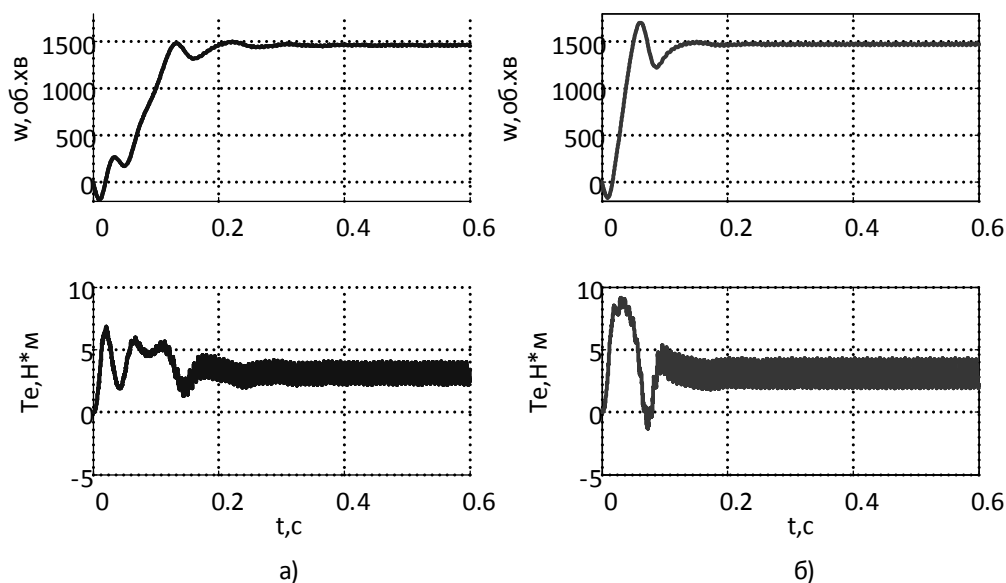


Рис. 10. Швидкість та електромагнітний момент при частотному керуванні (а) та при векторному керуванні (б)

Порівнюємо якісно векторне і скалярне керування:

- максимальний стартовий момент при векторному керуванні вищий, ніж при скалярному;
- час першого встановлення перехідного процесу швидкості обертання при векторному керуванні в цьому випадку майже на 40 % нижчий, ніж при частотному;
- характер перехідного процесу в обох випадках коливальний.

**Висновки і пропозиції.** Розроблена математична модель електропривода з векторним керуванням, що дозволило порівняти його ефективність зі скалярним електроприводом. Порівняльний аналіз показав, що при векторному керуванні асинхронний двигун може продукувати вищий момент на низьких обертах, а, отже, і вищий стартовий момент, ніж при скалярному. Також було підтверджено, що векторний електропривід має вищі динамічні показники, ніж скалярний. Подальше дослідження слід проводити у системі, замкнутій за положенням ротора і швидкістю.

#### Список використаних джерел

1. *Виноградов А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново, 2008. – 298 с.
2. *Муравлев О. П.* Регулируемый электропривод – одно из основных направлений совершенствования жилищно-коммунального хозяйства / О. П. Муравлев. – Томск, 2004.
3. *Пересада С. М.* Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор / С. М. Пересада // Вестник Донецкого национального технического университета. – 1999. – № 4. – С. 1–23.
4. Режим доступу : <http://www.vfd.com.ua/content/view/98/31/>.
5. Режим доступу : [http://www.elprom-rit.com/energy\\_saving/gkh/](http://www.elprom-rit.com/energy_saving/gkh/).
6. *Сахарнов Ю. В.* Регулируемый электропривод эффективное энергосберегающее оборудование / Ю. В. Сахарнов // Вопросы регулирования ТЭК. Регионы и Федерация. – 2001. – № 1.
7. *3-Phase AC Induction Vector Control Drive* – Freescale Semiconductor Inc., 2007.
8. *Direct Torque Control - the world's most advanced AC drive technology.* – Asea Brown Boveri Ltd. –2002.
9. *Motor control with STM32 32-bit ARM-based MCU* [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.st.com/web/en/resource/sales\\_and\\_marketing/promotional\\_material/brochure/brstm32mc](http://www.st.com/web/en/resource/sales_and_marketing/promotional_material/brochure/brstm32mc).

10. *Sensorless* Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://e2e.ti.com/cfs-filestystemfile.ashx/\\_\\_\\_key/CommunityServer-Discussions-Components-Files/38/5611.Sensorless-FOC-of-PMSM.pdf](http://e2e.ti.com/cfs-filestystemfile.ashx/___key/CommunityServer-Discussions-Components-Files/38/5611.Sensorless-FOC-of-PMSM.pdf).