

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

Вступ. Сучасні системи векторного керування (СВК) набувають в промисловості все більш широкого розповсюдження. Вони дозволяють просто та ефективно керувати такими складними об'єктами як асинхронний двигун (АД) з короткозамкненим ротором, що в свою чергу дозволяє суттєво розширити сферу його використання майже повністю витісняючи із автоматизованих промислових керувань приводів двигуни постійного струму [1].

Якість векторного керування АД залежить від адекватної інформації про електромагнітні параметри електродвигунів, які можуть змінюватися під впливом цілого ряду причин. Найбільшою невизначеністю в двигунах характеризуються активні опори обмоток статора та ротора. Вони залежать від температури, яка змінюється в залежності від рівня навантаження та умов охолодження. Окрім того, магнітну систему двигуна не завжди можна розглядати як ненасичену, що характеризується постійними значеннями індуктивних опорів обмоток та взаємної індуктивності між обмотками статора та ротора [2]. Розходження між змінними реальними параметрами двигуна та незмінними параметрами в системах керування призводить до відхилення процесів в приводі від розрахункових, що не дозволяє в повній мірі використовувати переваги векторного керування.

Аналіз попередніх досліджень. Напрямки сучасних досліджень, в області векторних систем керування АД, сконцентровані на розробці нових бездатчикових систем визначення векторних змінних двигунів та оцінці їхньої адекватності. Так в роботі [3] представлено дослідження спостерігачів магнітного потоку АД для виявлення властивостей їхньої грубості по відношенню до варіації активного опору ротора. В роботі [4] проведено дослідження з ідентифікації векторів потокозчеплення ротора та швидкості двигуна для різних режимів роботи електродвигуна при зміні активних опорів обмоток статора та ротора. В даних роботах розглядається лише вплив відхилення активних опорів обмоток, при цьому не розглядається вплив зміни індуктивностей зазначених обмоток та індуктивності контура намагнічення. Таким чином опираючись лише на дослідження спостерігачів векторних змінних не розглядається вплив відхилень всіх електромагнітних параметрів схеми заміщення двигуна на якість векторного керування приводами в цілому.

Не менш важливим питанням при розгляді векторних систем керування є дослідження режимів її роботи з двигунами, що мають вихідну або надбану несиметрію. Аналіз літературних джерел показав, що дослідженню процесів перетворення енергії АД при несиметрії параметрів фаз не приділяється істотної уваги, в той час як наслідки роботи в таких режимах можуть бути доволі значними як для двигуна так і для робочого механізму, оскільки можуть з'явитись незгасаючі коливання швидкості та моменту. Тому актуальною також є задача не тільки дослідження впливу точності ідентифікації електромагнітних параметрів електродвигунів на якість динамічних та статичних показників векторного керування, а і дослідження показників якості перетворення енергії (ПЯПЕ) [5] у несиметричних режимах роботи таких систем.

Мета роботи – оцінка впливу точності настроювання системи електропривода з прямим векторним керуванням на якість перетворення енергії АД при відхиленні електромагнітних параметрів та несиметрії фаз двигунів.

Матеріал і результати дослідження. Для досягнення поставленої мети була розроблена математична модель СВК з прямою орієнтацією за потоком [6, 7]. Дана система побудована з використанням математичного опису асинхронного двигуна в трифазній системі координат [8], що розширює можливості моделювання та дозволяє досліджувати несиметричні режими роботи АД. В розглянутій моделі відсоток несиметрії обмоток статора враховується його добутком на значення активного опору та добутком його квадрату на значення індуктивностей обмоток. Система керування виконана в обертовій системі координат (d, q) , принцип побудови якої ґрунтується на математичному описі асинхронного двигуна в обертовій системі координат при напрямі осі d за просторовим вектором потокозчеплення ротора [9], та виконана згідно з принципами підлеглого керування.

При синтезі нових, та дослідженні відомих алгоритмів векторного керування двигунами зазвичай проводиться оцінка якості перехідних процесів, статичної та динамічної похибки відпрацювання заданих впливів [10, 11], при цьому не розглядаються процеси перетворення енергії в даних системах. Оскільки енергетика систем приводів представляє істотний інтерес, то для оцінки якості керування АД були використані наступні критерії, що характеризують якість перетворення енергії: втрати в міді статора (P_{Cu1}), втрати в міді ротора (P_{Cu2}), втрати в сталі (P_{Fe}), сумарні втрати (P_{Σ}), активна потужність, що споживається (P), коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) коефіцієнт корисної дії (η) та відносна до номінального моменту значення змінної складової електромагнітного моменту двигуна (δM). За останнім параметром опосередковано можна судити про збільшення вібрацій АД [12].

З огляду на те, що на даний час існує велика кількість різновидів векторного керування [13] та відомо значну кількість спостерігачів векторних змінних АД [14, 15], для досліджень впливу відхилень значень електромагнітних параметрів двигунів від їх реальних значень в системах керування та впливу несиметрії обмоток елект-

родвигунів на якість векторного керування, було розроблено наступні математичні моделі структур прямого векторного керування:

- класична СВК [16];
- СВК з непрямыми методами визначення потоку двигуна, в яких значення потокозчеплення визначається:
 - 1) на основі рівнянь статорного кола двигуна [17];
 - 2) на основі рівнянь роторного кола двигуна [17];
 - 3) в «моделі потоку» [6];
- СВК з пристроєм ідентифікації кутової частоти обертання ротора двигуна [14].

Математичні дослідження представлених структур СВК проводилися для широкого діапазону зміни сумарних втрат та потужності, що споживається. Основний вклад в сумарні втрати вносять втрати в міді статора та ротора, причому втрати в сталі суттєво не змінюються. Зазначений діапазон визначався порогом зміни в динамічних характеристиках електропривода. Але слід зазначити, що тривале збільшення втрат в міді в 1,2..1,5 рази, від номінального значення, призводить до інтенсивного зниження ресурсу ізоляції обмоток електродвигуна. Результати досліджень також дозволили виявити, що незважаючи на суттєве погіршення енергетичних характеристик розглянутих систем, прямі показники якості перехідних процесів за швидкістю та змінною складовою електромагнітного моменту двигуна залишаються майже незмінними.

Дослідження СВК з прямою орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора були проведені для двигуна серії 4A100L2Y3 з паспортними даними: $P_n = 55$ кВт; $n_n = 3000$ об/хв; $\cos\varphi = 0,91$; $\eta = 0,875$; $R_s = 0,728$ Ом; $R_r = 0,437$ Ом; $L_s = 0,0021$ Гн; $L_r = 0,0042$ Гн; $L_\mu = 0,0147$ Гн. При розробці математичної моделі АД використовувалися загальноприйняті допущення [8]. Також при моделюванні не враховувалась нелінійність кривої намагнічування, а втрати в сталі розраховувалися через похідну потокозчеплення [18].

Результати моделювання класичної СВК, що базується на встановленні в зазорі між статором та ротором двигуна датчиків магнітного потоку [16], та моделювання асинхронного двигуна без перетворювача частоти, модель якого приймається у якості вихідної, представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння енергетичних параметрів електроприводу за моделлю АД та моделлю класичної СВК

Вид моделі	Умови роботи, (0- неробочий хід, 1- навантаження)	Критерії оцінювання						
		P_{Cu1} , Вт	P_{Cu2} , Вт	P_{Fe} , Вт	P_Σ , Вт	P , Вт	$\cos\varphi$	η
Вихідна	0	21,609	0,003	300,321	431,934	459,133	–	–
	1	144,889	71,862	285,955	612,707	5467,225	0,903	0,888
Векторне керування	0	16,45	0,0017	226,211	352,663	369,195	–	–
	1	171,36	89,507	236,664	607,53	5553,607	0,925	0,891

Результати моделювання підтверджують переваги використання СВК двигунами змінного струму, які проявляються в зменшенні сумарних втрат, а також підвищенні коефіцієнту потужності та коефіцієнту корисної дії двигуна в порівнянні з вихідною моделлю асинхронного двигуна.

Дослідження математичної моделі СВК, щодо впливу точності ідентифікації електромагнітних параметрів АД на якість класичного векторного керування, показали, що відхилення зазначених параметрів від їх реальних значень суттєвого не впливають на ПЯПЕ. Таку реакцію системи можна пояснити тим, що система керування оперує точною інформацією про значення потокозчеплення за рахунок встановлених датчиків потоку.

Дослідження несиметричних режимів роботи АД на 3-х фазній моделі (рис. 1), дозволили виявити, що при несиметрії обмоток статора від 10 до 20 % спостерігається зменшення коефіцієнту потужності на 10..45 %, сумарні втрати несуттєво збільшуються, а змінна складова електромагнітного змінюється в діапазоні 30..100%.

В класичних СВК наявність несиметрії обмоток статора від 10 до 20 % (рис. 2) призводить до зменшення коефіцієнту потужності на 20..40 % та зменшення коефіцієнту корисної дії на 5..15 %, сумарні втрати ж збільшуються в 1,5..2,5 рази, а споживана потужність залишається майже незмінною, також з'являється змінна складова моменту, яка коливається в межах 2..8 %. Зазначені діапазони зміни критеріїв спостерігаються як у режимі неробочого ходу, так і в номінальному режимі роботи двигуна досліджуваної системи.

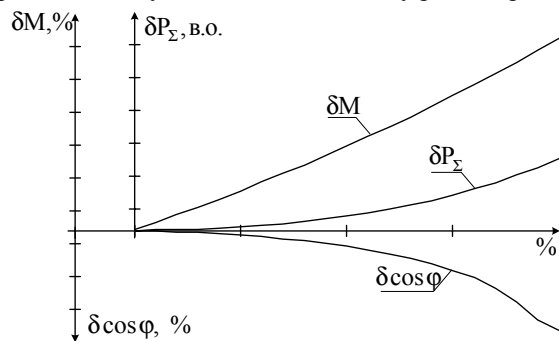


Рисунок 1 – Відхилення критеріїв оцінювання при несиметрії обмоток статора 3-фазної моделі АД

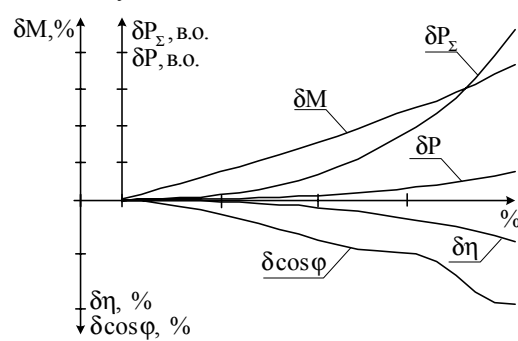


Рисунок 2 – Відхилення критеріїв оцінювання при несиметрії обмоток статора в класичній СВК

Значним недоліком класичних СВК є необхідність використання спеціального двигуна, в повітряному зазорі якого встановлені датчики магнітного потоку. Для усунення зазначеного недоліку інформацію про вектор потокозчеплення ротора можна отримати непрямим шляхом, використовуючи для даних цілей математичні моделі АД у вигляді рівнянь Парка для статичного чи динамічного режимів роботи машини [15].

Для дослідження системи прямого векторного керування з непрямим визначенням потоку ротора було розглянуто декілька структур спостерігачів потокозчеплення ротора. Перший базується на використанні рівнянь статорного кола в нерухомій системі координат [17]. В даному разі потокозчеплення визначається за миттєвими значеннями вимірних сигналів напруги та струму статора.

Використання зазначеного спостерігача потоку, при несиметрії обмоток статора від 0,4 до 1 % (рис. 3), в номінальному режимі роботи, призводить до зменшення $\cos\phi$ на 30..50 % та зменшення коефіцієнту корисної дії майже на 80 %, сумарні втрати збільшуються до 30 раз, споживана потужність зростає до 6 раз, а змінна складова моменту виходить за допустимі межі (10..160 %). При збільшенні значення несиметрії зазначені показники значно зростають та призводять систему до непрацездатного стану. Таким чином можна судити, що представлена структура спостерігача потокозчеплення ротора в СВК при несиметрії фаз АД є непрацездатною.

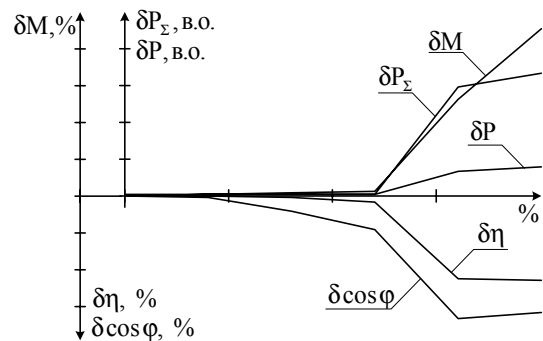


Рисунок 3 – Відхилення критеріїв оцінювання в СВК зі спостерігачем потоку за статорним колом двигуна

Другий тип спостерігача магнітного потоку базується на використанні рівнянь роторного кола АД в обертовій системі координат [17], в якому значення потокозчеплення ротора визначається через складові струму статора. В іншому випадку визначення потокозчеплення базується на, так званій, моделі потоку, що використовує рівняння асинхронного двигуна для випадку орієнтації дійсної вісі обертової системи координат за вектором потокозчеплення ротора [6]. В моделі потоку окрім модуля потокозчеплення ротора також розраховується поточне значення кута повороту обертової системи координат відносно зв'язаної зі статором нерухомої системи координат.

Використання в системах керування двох останніх спостерігачів потоку при несиметрії обмоток в діапазоні 10..20 %, характеризуються появою змінної складової моменту в межах 5..10 %, в номінальному режимі роботи, та 3..8 % в режимі неробочого ходу, а такі показники як, коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії, сумарні втрати та споживана потужність, залишаються сталими на всьому діапазоні зміни.

Слід також зазначити, що механічні та енергетичні характеристики систем векторного керування, які використовують представлені спостерігачі потокозчеплення ротора, з точно ідентифікованими електромагнітними параметрами схеми заміщення двигуна, співпадають з відповідними ПЯПЕ класичної СВК (табл. 1).

Проведені математичні дослідження, щодо впливу варіації електромагнітних параметрів схеми заміщення АД на якість прямого векторного керування, при використанні різних структур спостерігачів магнітного потоку, дозволили виявити наступні залежності:

- збільшення активного опору статора R_s на 1..1,5 % (рис. 4) призводить до зменшення $\cos\phi$ майже на 45 % та η на 20..35 %, збільшення сумарних втрат в 10..30 раз, в номінальному режимі роботи, та 5..20 раз в режимі неробочого ходу, збільшення споживаної потужності в 2..8 раз, в номінальному режимі роботи, та в 2 рази в режимі неробочого ходу, змінна складова моменту перевищує 10 % значення, та значно зростає зі збільшенням відсотку відхилення опору статора, що спостерігається в обох режимах роботи двигуна;

- збільшення активного опору ротора R_r в діапазоні 40..60 % (рис. 5) призводить до зменшення $\cos\phi$ на 25..55 % та η на 5..25 %, збільшення сумарних втрат в 10..40 раз та збільшення споживаної потужності в 2..10 раз, в номінальному режимі роботи, змінна складова моменту, в даному випадку, сягає 20 % та суттєво зростає при збільшенні значення опору ротора;

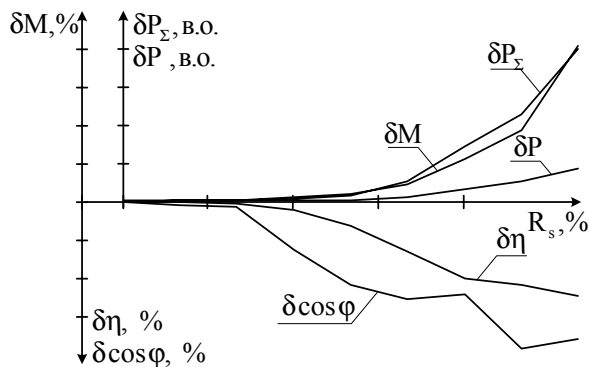


Рисунок 4 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації активного опору статора

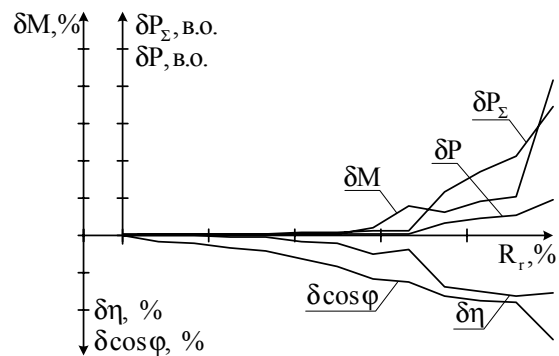


Рисунок 5 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації активного опору ротора

– при збільшенні індуктивності статора L_s на 4..10 % (рис. 6), від номінального значення, спостерігається зменшення $\cos\phi$ майже на 55 % та η майже на 20 %, збільшення сумарних втрат в 4..8 рази, в обох режимах роботи, збільшення споживаної потужності в 1,5..3 рази, в номінальному режимі роботи, та в 2 рази в режимі неробочого ходу, змінна складова моменту не перевищує 0,5 % в обох режимах роботи;

– збільшення індуктивності ротора L_r на 2..8 % (рис. 7) призводить до зменшення $\cos\phi$ майже на 60 % та η майже на 25 %, збільшення сумарних втрат в 3..13 рази, в обох режимах роботи, збільшення споживаної потужності в 2..3,5 рази, в номінальному режимі роботи, та в 2..3 рази в режимі неробочого ходу, змінна складова моменту не перевищує 0,5 % в обох режимах роботи;

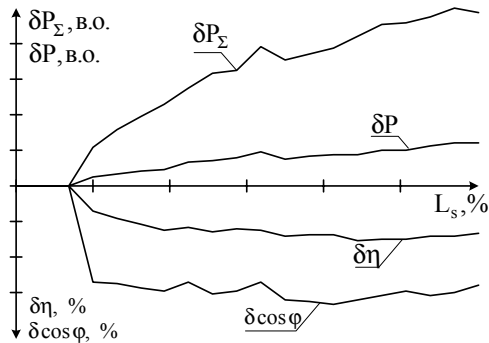


Рисунок 6 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації індуктивності статора

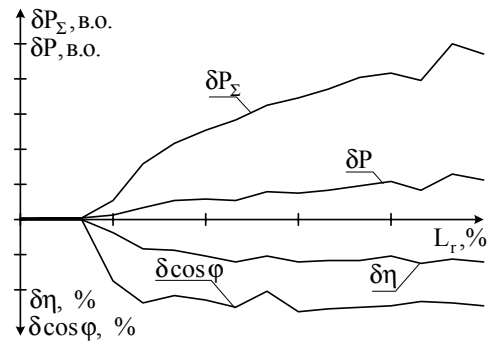


Рисунок 7 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації індуктивності ротора

– при зменшенні індуктивності контура намагнічення L_m від 20 до 35 % (рис. 8), в номінальному режимі роботи, спостерігається зменшення $\cos\phi$ на 10..20 % та η майже на 10 %, збільшення сумарних втрат в 1,5..2,5 рази та незначне збільшення споживаної потужності; при подальшій зміні даного опору від 35 до 60 % також спостерігається зменшення $\cos\phi$ на 20..65 % та η на 10..20 %, а сумарні втрати та споживана потужність зменшуються в 1,5 та 2 рази, така поведінка системи супроводжується значною похибкою відпрацювання заданої швидкості, яка сягає 40 %. Змінна складова моменту не перевищує 0,08 % в обох діапазонах зміни індуктивного опору.

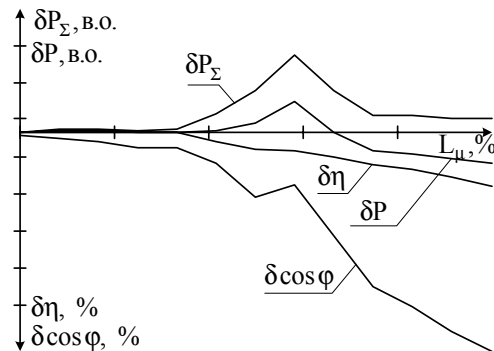


Рисунок 8 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації індуктивності контура намагнічення

Представлені результати характерні для систем, в яких для побудови замкнутих контурів керування, використовується вимірне значення швидкості двигуна, що виконується обертовими датчиками встановленими на валу. Для ряду випадків, коли при встановленні датчиків швидкості виникають труднощі чи їх встановлення взагалі неможливе, алгоритм роботи системи керування може використовувати інформацію про швидкість двигуна визначену непрямым шляхом через легкодоступні вимірюванню електричні змінні [19].

Для дослідження режимів роботи системи електроприводу з пристроєм ідентифікації кутової швидкості двигуна був розглянутий неадаптивний метод, в якому швидкість розраховується через частоту напруги живлення в нерухомій системі координат, та частоту роторної ЕРС в обертовій системі координат при орієнтації осі d за вектором потокозчеплення статора [14].

Математичне моделювання системи прямого векторного керування з орієнтацією за полем проведено для випадку, коли система керування оперує реальним значенням потокозчеплення ротора, тобто зі встановленими датчиками магнітного потоку, та ідентифікованими значенням швидкості двигуна. Розгляд такої структури системи дозволить провести оцінку якості керування при варіації електромагнітних параметрів АД лише в самій структурі спостерігача швидкості без впливу зі сторони спостерігачів потоку.

В даному випадку при 1 % значенні несприятливої обмотки статора (рис. 9) спостерігається незначна зміна коефіцієнта корисної дії, зменшення коефіцієнту потужності майже на 20 %, незначне збільшення сумарних

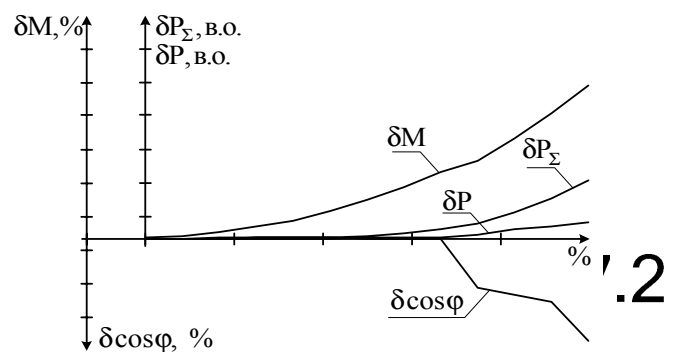


Рисунок 9 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК з непрямым визначенням швидкості двигуна

втрат та споживаної потужності. Змінна складова моменту, в такому разі, значно зростає зі збільшенням відсотка несиметрії та перевищує 50 % значення. Зазначені відхилення ПЯПЕ системи характерні як для неробочого режиму ходу, так і номінального режиму роботи.

Дослідження, щодо впливу відхилень електромагнітних параметрів двигунів на якість векторного керування показали, що збільшення активного опору статора на 1..2 % (рис. 10), від реального значення, в номінальному режимі роботи призводить до значного зменшення коефіцієнту потужності, що складає 15..50 %, та коефіцієнту корисної дії на 2,5..30 %, сумарні втрати збільшуються в 5 раз, споживана потужність збільшується в 2 рази. Також відхилення активного опору статора характеризується наявністю змінної складової моменту, що значно перевищує допустимі межі (150 %).

Збільшення активного опору ротора на 25..50 % (рис. 11), так само як і активного опору статора, в номінальному режимі роботи характеризується наявністю змінної складової моменту, що перевищує 130 %, зменшенням коефіцієнту потужності на 10..50 % та незначним збільшенням сумарних втрат та споживаної потужності.

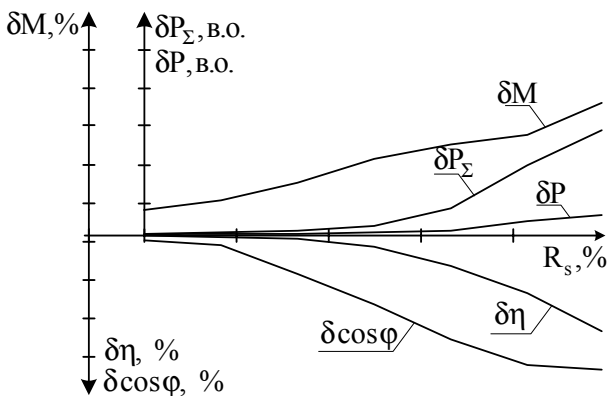


Рисунок 10 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації активного опору статора

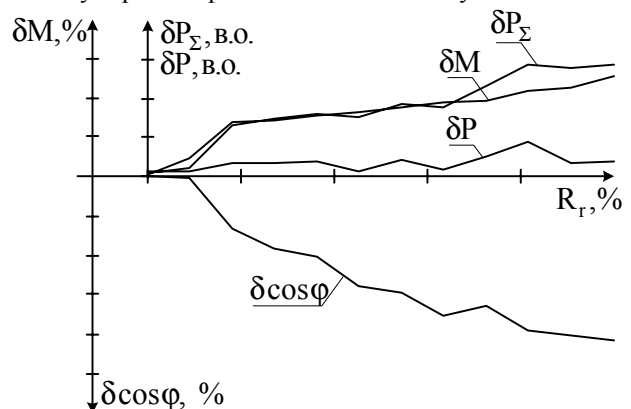


Рисунок 11 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації активного опору ротора

Математичні дослідження, щодо відхилення значень індуктивностей обмоток АД, показали, що збільшення зазначених параметрів до 10 %, від їх реальних значень суттєвого не впливає як на механічні так і енергетичні характеристики двигуна. Подальша зміна індуктивностей (більше 10 %) призводить до втрати працездатності системи. Така ситуація спостерігається як при збільшенні індуктивності статора, так і індуктивності ротора.

Збільшення індуктивності контура намагнічення в діапазоні 30..40 % (рис. 12) супроводжується зменшенням коефіцієнту корисної дії на 2..5 % та коефіцієнту потужності на 30..50 %, споживана потужність залишається майже незмінною, а сумарні втрати збільшуються в 1,5 рази, також спостерігається наявність змінної складової моменту, яка сягає 150..350 %, що спостерігається в номінальному режимі роботи двигуна.

При використанні непрямих методів визначення кутової частоти обертання двигуна з реальними значеннями електромагнітних параметрів двигунів енергетичні та механічні характеристики системи співпадають з відповідними характеристиками класичної системи прямого векторного керування (табл. 1). Оскільки структура ідентифікатора швидкості вимагає наявності значень всіх електромагнітних параметрів схеми заміщення АД, та з огляду на те, що зазначені параметри змінюються в процесі роботи двигунів, то дані положення обумовлюють більш жорсткі вимоги до математичних апаратів методів ідентифікації параметрів електродвигунів.

Висновки. 1. Похибка ідентифікації електромагнітних параметрів АД в класичних системах прямого векторного керування суттєво не впливає як на динамічні так і енергетичні характеристики двигунів, що обумовлюється наявністю датчиків магнітного потоку.

2. Параметрична несиметрія обмоток фаз статора в класичних системах векторного керування проявляється в незначному погіршенні енергетики двигунів та появі змінної складової моменту, що знаходиться в допустимих межах. Використання непрямих методів визначення магнітного потоку, в залежності від обраної структури спостерігачів, призводить або до значного погіршення енергетичних та механічних характеристик двигунів вже при несиметрії в 1 %, при використанні спостерігачів за звичайними статорного кола, що також характерне для системи з непрямим визначенням швидкості двигуна, або лише появою змінної складової моменту, при використанні рівнянь роторного кола АД.

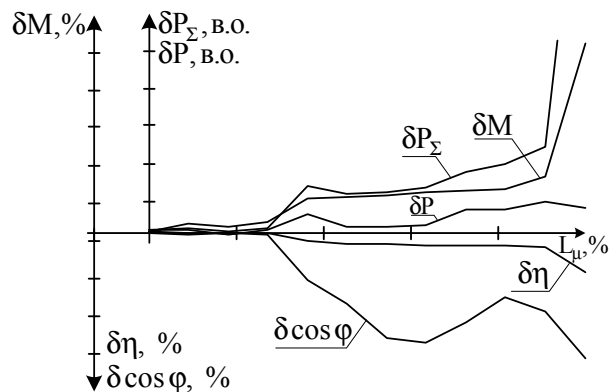


Рисунок 12 – Відхилення критеріїв оцінювання СВК при варіації індуктивності контура намагнічення

3. В системах керування з прямою орієнтацією за полем, які використовують різні типи спостерігачів потокозчеплення ротора, на енергетичні та механічні характеристики АД найбільш суттєво впливає точність визначення активного опору обмоток статора, яке повинно бути ідентифікованим з похибкою, що не перевищує 1 % від реального значення, та індуктивні опори обмоток як статора так і ротора, похибка в обох випадках не повинна перевищувати 3..5 %. Менш значно впливають активний опір ротора та індуктивність контура намагнічення, допустимі межі похибок в даному випадку сягають 35 та 25 % відповідно.

4. Допустимі діапазони відхилень електромагнітних параметрів двигуна в системах прямого векторного керування з пристроями ідентифікації кутової швидкості двигуна співпадають з відповідними діапазонами відхилень зазначених параметрів в системах з непрямими методами визначення потокозчеплення ротора, але, на відміну від останніх, варіація параметрів схеми заміщення АД призводить до появи значної змінної складової моменту.

5. Використання прямого векторного керування непрямыми методами визначення магнітного потоку та швидкості двигуна з неточно ідентифікованими значеннями електромагнітних параметрів схеми заміщення АД, вносять суттєвий вплив на енергетичні та механічні характеристики бездатчикових систем приводів, що обумовлюються погіршенням відповідних показників оцінювання визначених при дослідженнях систем з різними структурами спостерігачів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рудаков В.В, Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
3. Ковбаса С. Н. Исследование грубости наблюдателей магнитного потока асинхронного двигателя // Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета. –2001. – Вып. 1. –С. 87 – 92.
4. Волков А. В., Скалько Ю. С. Идентификация активных сопротивлений частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя при их температурном дрейфе «Электротехника та електроенергетика» № 1, 2009. – С. 58- 67.
5. Чёрный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии // Збірник праць Кіровоградського НТУ, 2004. – Вып. 15, – С. 160–168.
6. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
7. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива. 2006. – 363с.
8. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю. Садовой О.В. Моделирование электромеханических систем. – Кременчук, 2001. – 410 с.
9. Пересада С. М. Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор // Сб. науч. тр. Донецкого государственного технического университета. – 1999. – № 4. – С. 1-23.
10. Потапенко Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 352с.
11. Peresada S., Kovbasa S. and Tonielli A. Theoretical comparison of indirect field-oriented control of induction motors// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – Вып. 1. – С. 43-49.
12. Браташ О.В., Калинов А.П. Оценка взаимосвязи электромагнитных и механических вибраций асинхронных двигателей // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62). Ч. 1. - Кременчук: КДУ ім. Остроградського, 2009. – С. 125-127.
13. Andrzej M. Trzynadlowski. Control of induction motors. – Academic Press, New York, 2001. – 226 p.
14. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. – Oxford: Oxford University Press. – 1998.
15. Попович М. Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. Електромеханічні системи керування та електроприводи: Навч. посібник. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
16. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
17. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб.:С-Петербургская электротехническая компания, 2004.
18. Kalinov Andriy, Mamchur Dmitriy, Chumachova Anna, Research Of The Asynchronous Motor's Observability For Estimation Operating Conditions And Energy Efficiency // X International PhD Workshop OWD'2008, pp. 357-362.
19. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. 2003. № 7. С. 7–17.