

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

СЬОМІН АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 62-9: 621.313.333

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ НЕРУХОМОМУ РОТОРІ З НИЗЬКОЮ
ЧУТЛИВІСТЮ ДО ПОХИБОК ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ**

Спеціальність 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси і системи»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроприводу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

Науковий керівник:

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор
Бешта Олександр Степанович,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро),
проректор з науково-педагогічної та навчально-виховної роботи.

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович, директор Інституту електромеханіки,
енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного
університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і
науки України.

Кандидат технічних наук, доцент
Титюк Валерій Костянтинович, доцент кафедри електромеханіки
Криворізького національного університету Міністерства освіти і науки
України.

Захист дисертації відбудеться «__» ____ 2019 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» за адресою: 49027, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресою: 49027, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19.

Автореферат розісланий «__» ____ 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07
доктор технічних наук, професор

В.І. Корнієнко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одними з основних споживачів електроенергії є асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором (КЗ). Цьому сприяє низька вартість і висока надійність АД в порівнянні з іншими типами електричних машин. Для ефективного використання АД у складі електропривода необхідне знання параметрів його схеми заміщення (СЗ). Параметри СЗ використовуються для налаштування регуляторів системи керування, спостерігаючих пристроїв, при діагностуванні стану електричних машин електротехнічних комплексів, визначенні параметрів машини після ремонту тощо.

Такі параметри як активний опір ротора, індуктивність ротора, індуктивність ланцюга намагнічування недоступні для безпосереднього виміру. При приймально-здавальних випробуваннях вони не визначаються, а значення, що приводяться в каталогах і довідниках, є розрахунковими й можуть суттєво відрізнятись від реальних значень конкретної машини.

Ідентифікації параметрів схеми заміщення АД присвячена велика кількість наукових публікацій. Цим питанням займалися О.С. Бешта, А.Б. Виноградов, В.А. Волков, Д.В. Ізосімов, В.Г. Каширських, Д.Й. Родькін, О.П. Чорний, В. Vose та ін. На сьогоднішній день не існує універсального методу для розв'язку цього завдання.

При цьому, невідповідність налаштувань системи керування фактичним значенням параметрів електроприводу може призводити до істотного зниження якості перехідних процесів. Так, наприклад, для асинхронного електропривода з векторним керуванням діапазоном припустимих налаштувань величини, оберненої до постійної часу роторного кола у системі керування, складає – 40%...+20% від її фактичного значення.

Крім того, на результат ідентифікації параметрів суттєво впливає наявність похибок у вхідних експериментальних даних. Це призводить до необхідності уточнення отриманих значень після проведення ідентифікації та врахування наявності похибок у вимірюваних експериментальних сигналах.

Таким чином, побудова малочутливого до наявності похибок у вхідних експериментальних даних методу ідентифікації параметрів СЗ АД у складі електропривода є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації пов'язані з виконанням бюджетних науково-дослідних робіт "Дослідження режимів та розробка енергоефективного електрообладнання підприємств гірничо-металургійного комплексу" (тема ГП-415, номер держреєстрації 0108U000557) та "Розробка та дослідження методів адаптивної ідентифікації параметрів електропривода змінного струму" (тема ГП-292, номер держреєстрації 0102U003024), у яких автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення точності ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна у складі електропривода шляхом врахування впливу похибок у

вхідних експериментальних даних, що забезпечує якість перехідних процесів внаслідок відповідності налаштувань системи керування фактичним значенням параметрів електроприводу.

Для досягнення зазначеної мети в дисертації поставлено і вирішено наступні **задачі**:

- аналіз сучасних методів ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного електропривода;
- дослідження впливу похибок у вхідних експериментальних даних на ідентифікацію параметрів схеми заміщення без урахування та з урахуванням втрат в сталі двигуна;
- визначення умови проведення процедури ідентифікації параметрів, що забезпечує низьку чутливість до наявності похибок;
- розробка методу ідентифікації параметрів схеми заміщення з низькою чутливістю до похибок у вхідних експериментальних даних;
- експериментальне дослідження методу ідентифікації.

Об'єкт дослідження – процес ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного електропривода.

Предмет дослідження – методи ідентифікації із врахуванням впливу похибок у вхідних експериментальних даних на результат ідентифікації параметрів схеми заміщення.

Методи досліджень. Результати дисертаційної роботи отримані з використанням наступних основних методів досліджень:

- теорії результуючого вектора для аналізу процесів, що відбуваються в АД;
- методів чисельного знаходження розв'язку систем нелінійних алгебраїчних рівнянь для отримання значень параметрів схеми заміщення;
- методу симетричних складових при розгляді несиметричного живлення АД;
- методів аналітичного розв'язку диференціальних рівнянь;
- рядів Фур'є для знаходження величини основної гармоніки струму й напруги статора;
- комп'ютерного моделювання процесів у АД.

Наукове положення, що виноситься на захист:

Низька чутливість до наявності похибок у вхідних експериментальних даних при частотній ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна у складі електроприводу при нерухомому роторі забезпечується вибором значення частоти напруги живлення статора, що логарифмічно залежить від номінальної потужності двигуна.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше доведено, що ідентифікація параметрів Т-подібної схеми заміщення АД з КЗ має коректний розв'язок при зменшенні на одиницю кількості невідомих параметрів, як при врахуванні, так і при нехтуванні втратами в сталі статора.

2. Визначено, що використання довільної частоти змінної напруги живлення статора не дозволяє отримати низьку чутливість до похибок

експериментальних даних при ідентифікації індуктивності намагнічування при нерухомому роторі. Встановлено, що низька чутливість при ідентифікації цієї індуктивності має місце при використанні даних вхідного опору при холостому ході та даних перехідного процесу струму статора при несиметричному живленні статора постійною напругою.

3. Використання числа обумовленості матриці коефіцієнтів лінеаризованої системи рівнянь, отриманої із вихідної системинелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів схеми заміщення АД, дозволяє визначити мінімально допустимі значення частот живлення обмоток статора при проведенні процедури ідентифікації.

4. Розроблено метод ідентифікації схеми заміщення АД з КЗ у складі електропривода, що містить, на відміну від існуючих методів, використання частоти живлення обмоток статора, при якій чутливість до похибок у вхідних експериментальних даних є низькою. Це забезпечує якість перехідних процесів внаслідок відповідності налаштувань системи керування фактичним значенням параметрів електроприводу.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень та результатів.

Наукове положення і висновки дисертації обґрунтовані адекватністю математичної моделі АД у складі електроприводу, результатами експериментальної перевірки ефективності запропонованого методу ідентифікації при наявності похибки значень параметрів режиму не більше 5%.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані:

- при створенні автоматизованих комплексів діагностування стану АД після ремонту;
- при реалізації спостерігачів в асинхронних електроприводах;
- при створенні асинхронних електроприводів для настроювання регуляторів його системи керування.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі при підготовці студентів зі спеціальності 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” (спеціалізація «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») в дисципліні „Системи керування електроприводами”.

Результати впроваджені на ТОВ «АС ПРИВОД» та ТОВ НВП «Центр електромеханічної діагностики». Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними документами, що наведені у додатках до дисертації.

Апробація результатів дисертації. Апробація результатів та положень, викладених у дисертаційній роботі, була здійснена на наукових конференціях „Електромеханічні і енергозберігаючі системи” (м. Кременчук, ДВНЗ „КДНУ ім. М.Остроградського”, 14-16 травня 2014), „Проблеми автоматизованого електропривода” (м. Харків, ДВНЗ „ХП”, 12-16 вересня 2017), „Форум гірників-2017” (м. Дніпропетровськ, ДВНЗ „НГУ”, 6 жовтня 2017), „Енергоефективність та енергозбереження” (м. Дніпропетровськ, ДВНЗ „НГУ”, 17 листопада 2017).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 7 статей у фахових виданнях України, 2 статті у періодичних зарубіжних виданнях, 3 – тези і матеріали міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій.

Особистий внесок автора. Всі наукові положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Автором запропоновано використання несиметричного живлення обмотки статора при проведенні ідентифікації параметрів схеми заміщення; отримані вирази активної та реактивної складових вхідного опору зі сторони статора на основі Т-подібної схеми заміщення, що залежать тільки від чотирьох величин; виконані дослідження чутливості окремих параметрів схеми заміщення АД до наявності похибок у вхідних експериментальних даних; обґрунтовані значення частоти дискретизації при знятті експериментальних даних у випадку живлення обмоток статора постійною напругою; досліджено вплив похибок на результат ідентифікації за допомогою коефіцієнта обумовленості матриці коефіцієнтів лінеаризованої системи вхідних рівнянь.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 125 сторінках машинописного тексту, ілюстрованого 31 рисунками. Робота містить 18 таблиць, список використаної літератури із 106 найменувань на 12 сторінках і 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** представлено обґрунтування актуальності теми дисертації, сформульовані мета й завдання досліджень, сформульовані наукова новизна й практична цінність результатів роботи.

У **першому розділі** виконаний огляд вітчизняних і закордонних джерел, присвячених ідентифікації параметрів схеми заміщення АД й сформульовані завдання дослідження.

Розрізняють пакетну ("off-line") та адаптивну ("on-line") ідентифікацію параметрів. В даній роботі розглядається пакетна ідентифікація параметрів АД з КЗ у складі електропривода, яка виконується перед початком експлуатації електропривода. Вважається, що АД отримує живлення від перетворювача частоти, у складі якого є інвертор з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Такий тип приводу має широке розповсюдження. Також вважається, що електродвигун може бути з'єднаний з робочим механізмом. Внаслідок цього при ідентифікації необхідно уникати розбирання двигуна, не виконувати додаткових перемикань схеми з'єднання фаз статора, використовувати у якості вхідних даних напруги й струми фаз статора АД.

Виявлено, що необхідно враховувати похибки у вхідних експериментальних даних. Наявність похибок обумовлена похибкою давачів електричних сигналів, а також результатом обробки експериментальних даних напруги з виходу інвертора з ШІМ у складі перетворювача частоти. Це

обумовлює відхилення результату ідентифікації від фактичного і, таким чином, впливає на якість перехідних процесів в електроприводі внаслідок невідповідності налаштувань системи керування фактичним значенням параметрів.

Наприкінці розділу сформульовані основні завдання, що розв'язуються в дисертаційній роботі.

У другому розділі представлений математичний опис АД і наводиться Т-подібна схема заміщення, що відповідає усталеному режиму роботи і параметри якої визначаються при ідентифікації (рис.1).

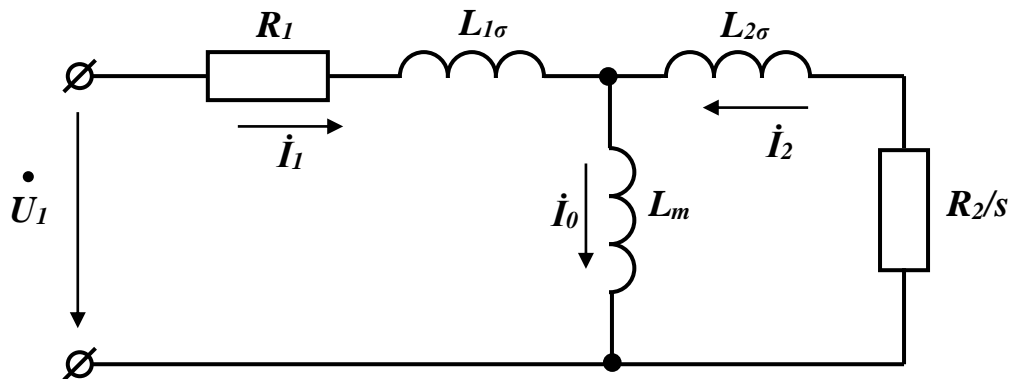


Рис. 1. Т-подібна схема заміщення АД

Тут R_1, R_2 – активні опори обмоток фаз статора й ротора відповідно;

L_m – головна індуктивність контуру (індуктивність намагнічування контуру), $L_m = 1,5L_{m\phi}$, $L_{m\phi}$ – головна індуктивність фази;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання фази статора й фази ротора відповідно;

s – ковзання двигуна.

Усі величини, що відносяться до ротора, приведені до обмотки статора.

У ході аналізу визначено, що вхідні активна й реактивна складові вхідного опору з боку статора можуть бути представлені як вирази, що

залежать від чотирьох величин ($R_1, A = L_{1\sigma} + \frac{L_m \cdot L_{2\sigma}}{L_m + L_{2\sigma}}, B = L_{1\sigma} + L_m,$

$C = \frac{L_m^2 \cdot R_2}{(L_m + L_{2\sigma})^2}$), кожна з яких залежить від параметрів СЗ:

$$R_{BX} = R_1 + \frac{\omega^2 \cdot C \cdot (B - A)^2}{C^2 + \omega^2 \cdot (B - A)^2}, \quad (1)$$

$$X_{BX} = \omega \cdot B - \omega^3 \cdot \frac{(B - A)^3}{C^2 + \omega^2 \cdot (B - A)^2}, \quad (2)$$

де ω – електрична кутова швидкість.

Враховуючи, що параметрів СЗ п'ять (див. рис.1), то ми маємо справу з недовизначеною задачею. Тобто визначити п'ять параметрів Т- подібної схеми заміщення з боку статора принципово неможливо.

Використання Т- подібної схеми заміщення, що враховує втрати в сталі двигуна не має описаної вище властивості. Однак, як показали дослідження, при визначенні п'яти параметрів із цієї схеми з боку статора, спостерігається висока чутливість результату ідентифікації до наявності похибок у вхідних даних. Так для активного опору ротора відхилення результату може перевищувати 50% при наявності всього 2% похибки у вхідних даних. Це призводить до ризику отримання недостовірних результатів, а також необхідності прийняття спрощуючих допущень.

За допомогою математичного моделювання оцінено вплив кожного з параметрів СЗ на перехідні й усталені процеси в АД. Для цього використано середньоквадратичне відхилення (СКВ) значень модуля узагальненого вектору струму статора в процесі пуску двигуна при зміні одного з параметрів СЗ відносно значень модуля струму, обчислених при пуску з набором параметрів, прийнятим за **базовий. Визначено**, що перехідні процеси змінюються несуттєво при зміні значень індуктивностей розсіювання статора і ротора, але при умові постійності суми ($L_{1\sigma} + L_{2\sigma} = const$). Для спрощення, було вирішено

прийняти індуктивності розсіювання статора і ротора рівними $L_{\sigma} = \frac{L_{1\sigma} + L_{2\sigma}}{2}$.

При цьому кількість невідомих параметрів СЗ зменшується з п'яти ($R_1, R_2, L_m, L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$) до чотирьох ($R_1, R_2, L_m, L_{\sigma}$).

Була проведена попередня оцінка впливу похибок у вхідних експериментальних даних на ідентифікацію кожного параметра СЗ безпосередньо з виразів для активної та реактивної складових вхідного опору з боку статора. Саме ці складові визначають зв'язок між одержуваними при дослідженнях струмом і напругою статора. В результаті отримані значення частот живлення статора, при яких зберігається низька чутливість до похибок (табл.1).

Таблиця 1

Значення частоти напруги живлення статора, при яких зберігається низька чутливість до похибок, Гц

Параметр СЗ	Складова вхідного опору	Номінальна потужність АД				
		0,01кВт	0,1кВт	1кВт	10кВт	100кВт
R_2	R_{BX}	≥ 15	≥ 12	≥ 10	≥ 8	≥ 5
	X_{BX}	–	–	–	–	–
L_{σ}	R_{BX}	–	–	–	–	–
	X_{BX}	≥ 15	≥ 12	≥ 10	≥ 8	≥ 5
L_m	R_{BX}	–	–	–	–	–
	X_{BX}	–	–	–	–	–

На рис.2 наведені залежності відхилення результату визначення R_2 з рівняння (1) від частоти живлення статора при наявності похибки в R_{BX} у межах $\pm 5\%$ для двигунів різної потужності.

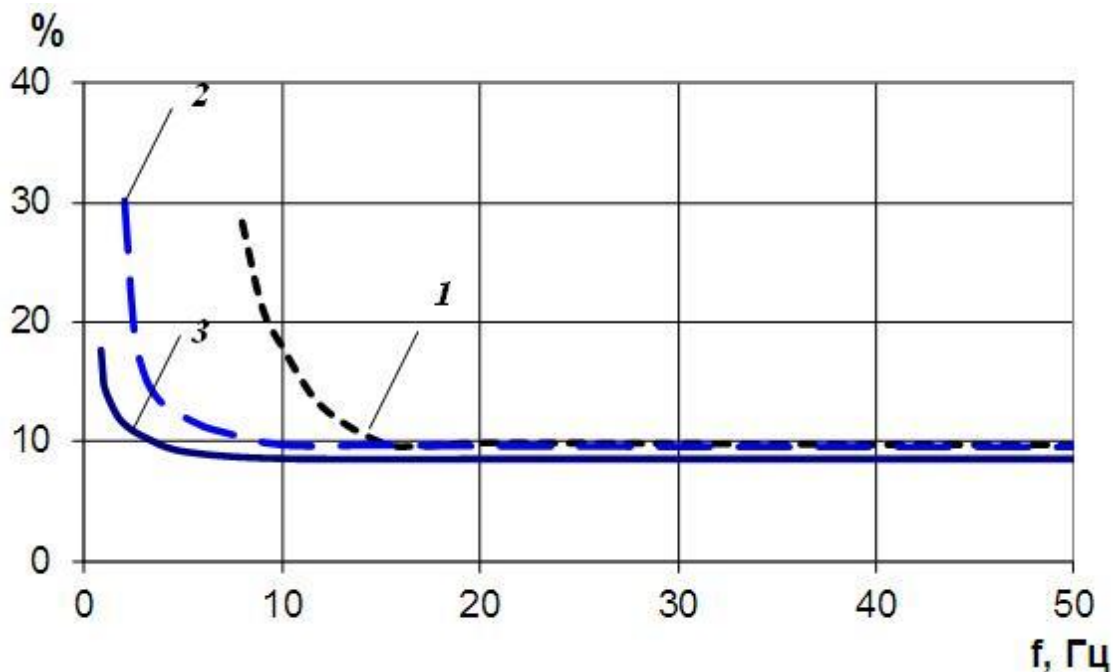


Рис. 2 Відхилення результату визначення R_2 з рівняння (1) при наявності похибки в R_{BX} у межах $\pm 5\%$ (1 – для двигунів потужністю 0,01кВт, 2 – 1кВт, 3 – 100кВт) при нерухомому роторі ($s = 1$)

Визначено, що:

- низька чутливість до похибок при ідентифікації R_2 має місце при використанні виразу для R_{BX} (1);

- низька чутливість до похибок при ідентифікації усередненого значення індуктивності розсіювання L_σ має місце при використанні виразу для X_{BX} (2);

- використання виразів для R_{BX} та X_{BX} не забезпечує низьку чутливість до похибок при ідентифікації L_m . Додаткові розрахунки показали, що низька чутливість при ідентифікації L_m має місце при використанні даних вхідного опору при холостому ході та даних перехідного процесу струму статора при несиметричному живленні статора постійною напругою;

- на чутливість до похибок ідентифікації активного опору ротора R_2 і усередненого значення індуктивності розсіювання L_σ при нерухомому роторі впливає значення частоти напруги живлення статора. При чому цей вплив має відмінності у двигунів різної номінальної потужності. Визначено, що чим менше потужність двигуна, тим вище повинна бути частота живлення статора.

Система нелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів R_2, L_m, L_σ (R_1 визначається на постійному струмі) має вигляд:

$$\begin{cases} R_{BX} - R_1 - \frac{(\omega \cdot L_m)^2 \cdot R_2}{R_2^2 + (\omega \cdot L_m + \omega \cdot L_\sigma)^2} = 0, \\ X_{BX} - \omega \cdot L_\sigma - \frac{\omega \cdot L_m \cdot \omega \cdot L_\sigma \cdot (\omega \cdot L_m + \omega \cdot L_\sigma) + \omega \cdot L_m \cdot R_2^2}{R_2^2 + (\omega \cdot L_m + \omega \cdot L_\sigma)^2} = 0, \\ C_1 - \frac{4L_m}{R_1 + R_2} - \frac{2L_\sigma}{R_1 + R_2} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В системі (3) коефіцієнт C_1 знаходиться як результат обробки даних перехідного процесу струму статора при несиметричному живленні статора постійною напругою.

При використанні даних холостого ходу система рівнянь (3) має наступний вигляд:

$$\begin{cases} R_{BX} - R_1 - \frac{(\omega \cdot L_m)^2 \cdot R_2}{R_2^2 + (\omega \cdot L_m + \omega \cdot L_\sigma)^2} = 0, \\ X_{BX} - \omega \cdot L_\sigma - \frac{\omega \cdot L_m \cdot \omega \cdot L_\sigma \cdot (\omega \cdot L_m + \omega \cdot L_\sigma) + \omega \cdot L_m \cdot R_2^2}{R_2^2 + (\omega \cdot L_m + \omega \cdot L_\sigma)^2} = 0, \\ C_2 - L_m - L_\sigma = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В системі (4) коефіцієнт C_2 знаходиться як результат обробки даних вхідного опору при холостому ході.

Оцінено вплив похибок у вхідних даних на результат рішення даних систем нелінійних рівнянь за допомогою процедури лінеаризації та подальшого використання числа обумовленості матриці $\chi_p(A)$. Тут A – матриця коефіцієнтів лінеаризованої системи рівнянь, що розраховується як:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial R_2} & \frac{\partial f_1(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_\sigma} & \frac{\partial f_1(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_m} \\ \frac{\partial f_2(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial R_2} & \frac{\partial f_2(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_\sigma} & \frac{\partial f_2(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_m} \\ \frac{\partial f_3(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial R_2} & \frac{\partial f_3(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_\sigma} & \frac{\partial f_3(R_2, L_\sigma, L_m)}{\partial L_m} \end{pmatrix}.$$

Число обумовленості матриці обчислюється як $\chi_p(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|$ ($\|A\|$ – норма матриці A). Зміна числа обумовленості в залежності від частоти живлення двигуна наведена на рис.3.

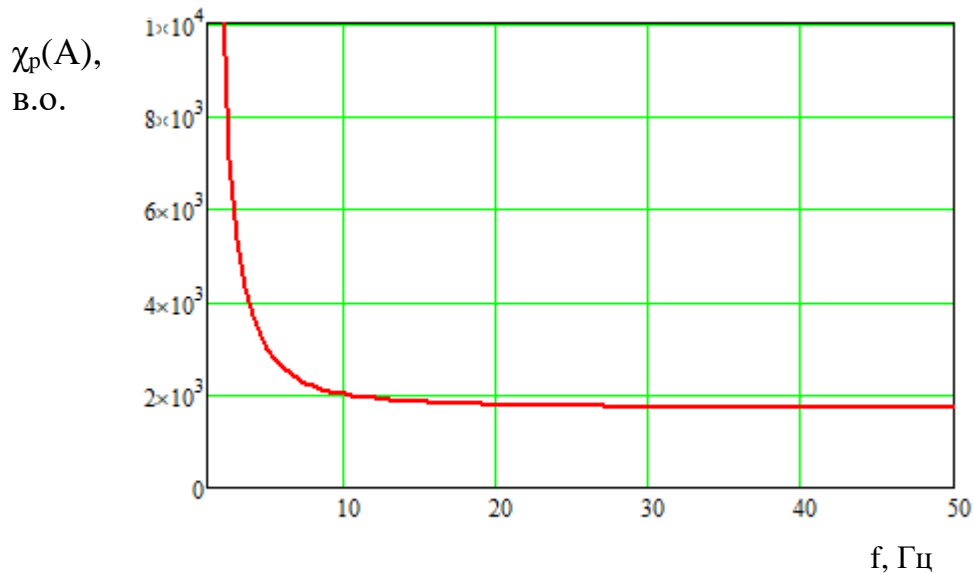


Рис. 3. Зміна числа обумовленості в залежності від частоти живлення для двигуна потужністю 1кВт

На рис.3 видно, що на низьких частотах спостерігаються великі значення числа обумовленості, що відповідає високій чутливості до похибок результату ідентифікації. Значення частоти, при якій ще не виникає стрімке зростання було прийнято як мінімально допустиме значення частоти живлення обмоток статора. Ці значення наведені в табл.2 для машин різної номінальної потужності і числа пар полюсів. В результаті розрахунків визначено, що помилка ідентифікації при даних частотах не перевищує 10% при наявності помилки знаходження вхідного опору з боку статора $\leq 5\%$.

Таблиця 2

Рекомендована частота живлення АД, Гц

№	Потужність, кВт	Число пар полюсов	
		1	2...4
1	0,01	17	15
2	0,1	13	12
3	1	11	10
4	10	9	8
5	100	6	5

Слід зауважити, що при збільшенні частоти живлення починає проявлятися ефект витіснення струму ротора, тому отримані значення частоти живлення і є рекомендованими.

За результатами проведеного кореляційно-регресійного аналізу взаємозв'язку рекомендованої частоти живлення статора і потужності двигуна, виявлено, що більш точно вихідні дані описуються за допомогою логарифмічного рівняння:

а) для машин з числами пар полюсів $p = 2 \dots 4$:

$$f = 10 - 2,4 \log P_{НОМ}; \quad (5)$$

б) для машин з $p = 1$:

$$f = 11,2 - 2,6 \log P_{НОМ}, \quad (6)$$

де $P_{НОМ}$ – номінальна потужність двигуна, кВт.

Залежність (5) представлена на рис.4.

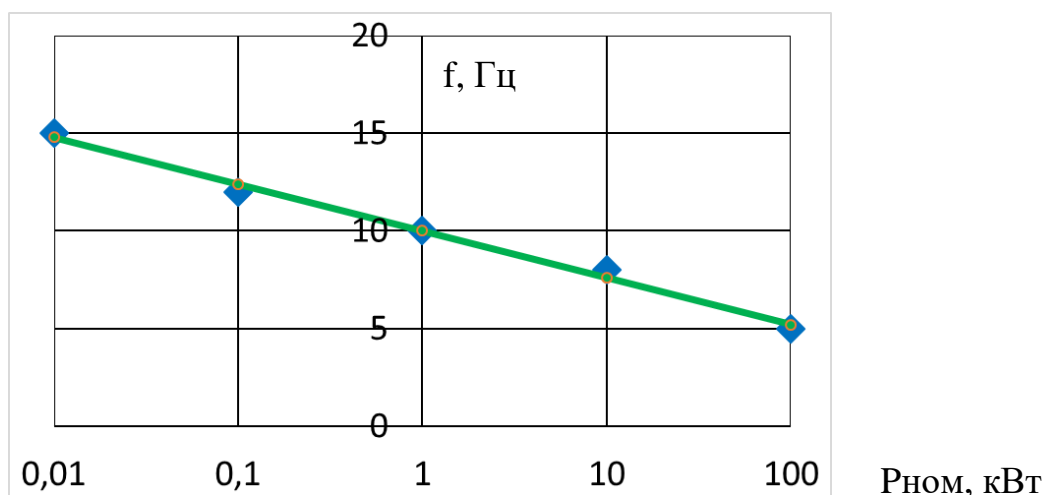


Рис.4. Залежність рекомендованої частоти при $p = 2 \dots 4$

У третьому розділі розглянута розробка методу ідентифікації параметрів схеми заміщення. Запропоновано використання несиметричного живлення статора (наприклад, живлення двох фаз статора), що забезпечує нерухомість ротору машини, а електромагнітний момент – рівним нулю.

Використовуючи нерівність $L_{1\sigma} \cdot L_{2\sigma} \ll L_m \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})$ та $L_{1\sigma} \cdot R_2 + L_{2\sigma} \cdot R_1 \ll 2L_m \cdot (R_2 + R_1)$, що повністю узгоджується з типовими значеннями параметрів, був отриманий вираз, який описує перехідний процес струму статора при живленні від постійної напруги U_S . Значення площі фігури, що утворюється між ustalеним значенням струму статора та кривою струму в перехідному процесі, дорівнює

$$S = \frac{U_S}{2R_1} \left(\frac{2L_m(L_{1\sigma} + L_{2\sigma})}{L_{1\sigma} \cdot R_2 + L_{2\sigma} \cdot R_1} + \frac{L_{1\sigma} + L_{2\sigma}}{R_1 + R_2} \right). \quad (7)$$

Звідси, з урахуванням рівності індуктивностей розсіювання статора і ротора отримуємо вираз:

$$C_1 = \frac{2S \cdot R_1}{U_S} = \frac{4L_m}{R_1 + R_2} + \frac{2L_\sigma}{R_1 + R_2}, \quad (8)$$

який використовується у системі (3).

За допомогою методу симетричних складових, використовуючи несиметричне живлення статора, отримуємо значення напруги й струму статора для симетричного режиму з ковзанням $s = 1$.

Ідентифікація параметрів схеми заміщення зводиться до розв'язку системи нелінійних рівнянь. Розв'язок знаходиться за допомогою ітераційних методів (наприклад: методу простих ітерацій (послідовних наближень), методу Ньютона (включаючи його модифікації) та інших.

Таким чином метод ідентифікації полягає в наступному:

1. Отримання даних перехідного процесу струму статора при несиметричному живленні постійною напругою та визначення значення площі фігури S , що утворюється між усталеним значенням струму статора та кривою струму в перехідному процесі (за системою (3)). Альтернативою цьому є одержання величини вхідного індуктивного опору при холостому ході машини (за системою (4)).

2. Визначення активного опору фази статора на постійному струмі.

3. Одержання експериментальних значень для X_{BX} і R_{BX} (рекомендується використовувати несиметричне живлення статора змінним струмом) при $s = 1$ і рекомендованій частоті напруги живлення статора f (згідно з (5) або (6)).

4. Отримання на підставі експериментальних даних (пп.1-3) нелінійну систему із трьох рівнянь (за виразом (3) або (4)), яка вирішується чисельним методом (наприклад, методом Ньютона або методом послідовних ітерацій).

До переваг запропонованого методу ідентифікації параметрів АД можна віднести наступне:

– низька чутливість до похибок у вхідних експериментальних даних завдяки використанню при ідентифікації різних значень частоти напруги живлення обмотки статора залежно від потужності двигуна;

– використання несиметричного живлення статора змінним струмом при нерухомому роторі замість проведення досліду короткого замикання. Відповідно зникає необхідність у навантажувальних пристроях;

– можливість використання несиметричного живлення статора постійним струмом замість проведення досліду холостого ходу. Ця обставина є суттєвою при наявності механічного зв'язку двигуна з механізмом;

– використання для ідентифікації тільки даних струмів і напруг статора.

Експериментальні значення X_{BX} і R_{BX} одержують з використанням значення амплітуди першої гармоніки напруги статора, який живиться від інвертора з ШІМ. За допомогою математичного моделювання, отримано рекомендоване значення частоти дискретизації, яке повинно бути $f_d \geq 75f_{оп}$ ($f_{оп}$ - частота опорної напруги), що забезпечує похибку визначення амплітуди першої гармоніки напруги не більш 3%.

При отриманні даних перехідного процесу струму статора при несиметричному живленні постійною напругою частота дискретизації не повинна бути нижче значення $f_d = 200 \text{Гц}$, що забезпечить похибку визначення площі S не більшу 2%.

У четвертому розділі розглянута схема експериментальної установки та технічні характеристики окремих її елементів. Приводяться результати експериментальних досліджень запропонованого методу ідентифікації.

Установка містила у собі випробуваний двигун, перетворювач частоти Altivar 71 компанії SchneiderElectric, датчики струму LA-100 і напруги LV-25, модуль E14-440, персональний комп'ютер. Застосування USB-інтерфейсу в модулі E14-440 дозволяє підключитися до комп'ютеру з метою отримання експериментальних даних у реальному масштабі часу. До його складу входять цифровий сигнальний процесор ASDP-2185M, 14-бітний АЦП із максимальною частотою перетворення 400кГц, 12-бітний ЦАП з максимальною частотою перетворення 125кГц.

У табл. 3 наведені результати визначення параметрів схеми заміщення двигуна 4AA71A6B потужністю 0,37 кВт за запропонованим методом. Додатково наведені дані з довідника, та параметри, отримані за допомогою класичних методів холостого ходу та короткого замикання.

Таблиця 3

Результати визначення параметрів двигуна 4AA71A6B3

Двигун	Метод визначення	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$L_{1\sigma}, Гн$	$L_{2\sigma}, Гн$	$L_m, Гн$
4AA71A6B3	1. Дані довідника	27,36	23,39	0,0615	0,089	0,723
	2. Метод х.х. і к.з.	30,9	21,2	0,043	0,046	0,763
	3. Пропонований метод	30,9	26,53	0,052	0,052	0,755

Відхилення довідкових даних, пояснюється відмінністю між параметрами конкретної машини та її проектним аналогом, параметри якої отримані розрахункових шляхом.

На рис. 4 представлені криві перехідних процесів струму статора при подачі на дві фази статора постійної напруги.

Крива 1 отримана експериментально, криві 2 та 3 отримані шляхом математичного моделювання: крива 2 – з використанням набору

параметрів, визначених за допомогою розробленого методу; крива 3 – з використанням набору параметрів, отриманих методами холостого ходу й короткого замикання.

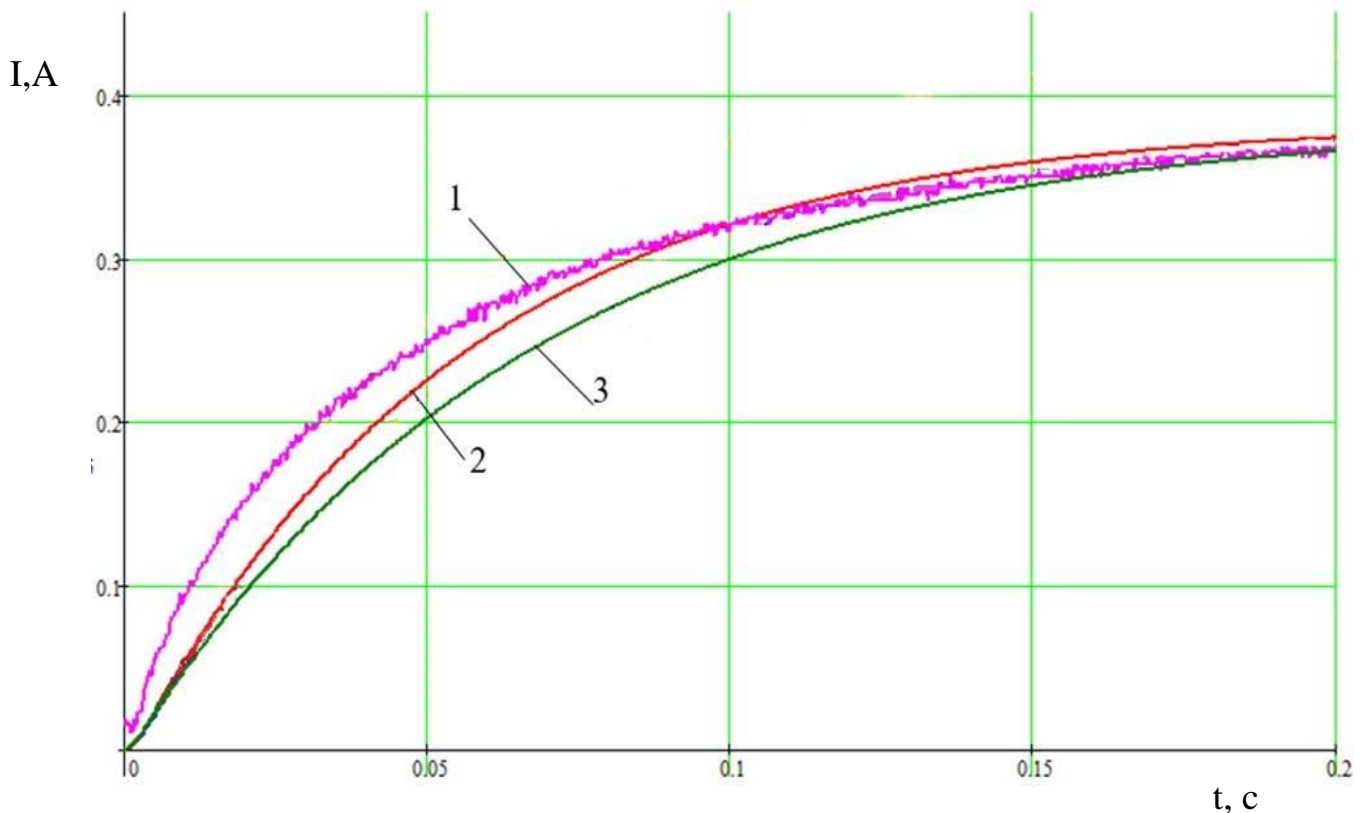


Рис.4. Графіки переходного процесу струму статора при подачі на дві фази постійної напруги

Ступінь збігу кривих 2 і 3 із кривою 1 було оцінено за допомогою величини СКВ. Так величина СКВ, розрахована для запропонованого методу становить 0,308, в той час як для класичних методів к.з. і х.х. вона дорівнює 0,427. Тобто СКВ, що відповідає набору параметрів СЗ, отриманих з використанням запропонованого методу ідентифікації виявилось в 1,39 рази меншим. Статистична перевірка підтвердила значимість отриманих результатів.

Отримані значення є підставою для використання розробленого методу ідентифікації параметрів Т-подібної схеми заміщення АД в асинхронних електроприводах і при створенні стендів для діагностики стану АД. Результати роботи використовуються у навчальному процесі при підготовці студентів зі спеціальності 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” (спеціалізація «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») в дисципліні „Системи керування електроприводами”.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова задача, що полягає в підвищенні точності ідентифікації параметрів схеми заміщення АД у складі електропривода шляхом врахування впливу похибок у вхідних експериментальних даних, що забезпечує якість перехідних процесів внаслідок відповідності налаштувань системи керування фактичним значенням параметрів електроприводу. Дослідження, виконані в дисертаційній роботі, дозволяють зробити наступні висновки:

1. Похибки у вхідних експериментальних даних суттєво впливають на результат ідентифікації параметрів СЗ АД з КЗ. Це призводить до істотного зниження якості перехідних процесів асинхронного електропривода. Тому розробка методу ідентифікації, з низькою чутливістю до похибок є актуальною.

2. Показано, що ідентифікація параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в реальних умовах може відбуватися тільки при використанні допущення, що зменшує кількість невідомих параметрів на одиницю. Математичним моделюванням доведено, що прийнятним є допущення про рівність індуктивностей розсіювання статора і ротора.

3. Встановлено, що при нерухомому роторі не забезпечується низька чутливість до похибок експериментальних даних при ідентифікації індуктивності намагнічування при будь-якій частоті змінної напруги живлення статора. Визначено, що низька чутливість при ідентифікації цієї індуктивності має місце при використанні даних вхідного опору при холостому ході та даних перехідного процесу струму статора при несиметричному живленні статора постійною напругою.

4. Отримано системи нелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів СЗ АД з КЗ. Використання в якості критерію числа обумовленості матриці коефіцієнтів лінеаризованої системи рівнянь, отриманої із системи нелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів схеми заміщення АД, дозволяє визначити мінімально допустимі значення частот живлення обмоток статора при проведенні процедури ідентифікації.

5. Розроблено метод ідентифікації схеми заміщення АД з КЗ у складі електропривода. На відміну від існуючих методів, він використовує значення частоти живлення обмоток статора, при якій чутливість до похибок у вхідних експериментальних даних є низькою. Визначено, що залежність рекомендованого значення частоти живлення статора при проведенні ідентифікації параметрів від номінальної потужності двигуна має логарифмічний характер. При цьому помилка ідентифікації не перевищує 10% при наявності похибки у вхідних даних $\leq 5\%$. Це забезпечує якість перехідних процесів внаслідок відповідності налаштувань системи керування фактичним значенням параметрів електроприводу.

6. Проведено експериментальну перевірку розробленого методу ідентифікації. За допомогою СКВ був оцінений ступінь збігу

експериментальної кривої перехідного процесу струму статора при постійній напрузі з кривою перехідного процесу, отриманої шляхом математичного моделювання. Так, при використанні параметрів, отриманих за допомогою запропонованого методу СКВ виявився 1,39 рази меншим у порівнянні з класичними методами короткого замикання і холостого ходу. Результати перевірки підтвердили теоретичні висновки та є підставою для використання розробленого методу ідентифікації параметрів Т-подібної схеми заміщення АД для практичного застосування в асинхронних електроприводах і при створенні стендів для діагностики стану АД з КЗ.

7. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи прийняті до впровадження ТОВ «АС ПРИВОД» та ТОВ НВП «Центр електромеханічної діагностики». Результати роботи використовуються у навчальному процесі при підготовці студентів зі спеціальності 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”(спеціалізація «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») в дисципліні „Системи керування електроприводами”.

ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Фахові видання:

1. O.Beshta, A.Semin The Use of asymmetric power supply during the procedure of equivalent circuit parameters identification of squirrel-cage induction motor // Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems – Pivnyak, Beshta& Alekseyev (eds), CRC Press Talor&Francis Group, London 2015, P.41-46.

2. O.Beshta, A.Siomin Peculiarities of experimental data reading for DC power supply of the stator in the problem of parameters identification of induction motor equivalent circuit // Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Control – Pivnyak, Beshta& Alekseyev (eds), CRC Press Talor&Francis Group, London 2016, P.23-25.

Публікації у наукових фахових виданнях:

3. Бешта А.С., Сємин А.А. Особенность применения Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя для задач идентификации параметров // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика" науково-виробничого журналу - Кременчук:КрНУ, 2012. - Вип.3/2012 (19). - 660с. С.553-555.

4. Сємин А.А. Оценка эффективности экспериментального определения параметров схемы замещения асинхронных двигателей с учетом потерь в стали // Вісник національного технічного університету „ХПІ“, Проблеми автоматизованого електропривода, Харків: НТУ „ХПІ“ – 2013. – № 36(1009). – с. 149–151.

5. Бешта А.С., Сємин А.А. Определение параметров схемы замещения АД при несимметричном питании статора // Електромеханічні і енергозберігаючі системи “Електромеханічні системи, методи оптимізації та моделювання.”– 2014.–№6/2014(26),Том 2, – С. 10-16.

6. Сёмин А.А. Выбор частоты дискретизации при снятии экспериментальных данных в задаче идентификации параметров схемы замещения АД // Вісник національного технічного університету „ХПІ“: НТУ „ХПІ“, Проблеми автоматизованого електропривода, Харків – 2015. – № 12(1121). с. 299–302.

7. Бешта А.С., Сёмин А.А. Оценка точности идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2017. – Вип. 1/2017 (37). – с. 15–20.

8. Сёмин А.А. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с низкой чувствительностью к наличию ошибок в исходных экспериментальных данных // Вісник Національного технічного університету „ХПІ“: НТУ „ХПІ“, Проблеми автоматизованого електропривода, Харків – 2017. – № 27(1249). с. 188–122.

9. Бешта О.С., Сьомін А.О. Оцінка впливу похибок у вихідних даних на результат ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ ім.М.Остроградського, 2019. – Вип. 1/2019 (45). – с. 40-45.

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві:

У роботах, написаних у співавторстві, дисертантові належать: у [1,5] – застосування методу симетричних складових та вирішення диференціального рівняння другого порядку при розгляді двофазного живлення обмотки статора; у [2] – обґрунтування значення частоти дискретизації при знятті експериментальних даних у випадку живлення обмоток статора постійною напругою; у [3] – отримання виразів активної та реактивної складових вхідного опору зі сторони статора на основі Т-подібної схеми заміщення, що залежать тільки від чотирьох величин; у [7] – дослідження ступеню чутливості окремих параметрів схеми заміщення АД до наявності похибок у вхідних експериментальних даних; у [9] – дослідження впливу похибок на результат ідентифікації за допомогою коефіцієнта обумовленості матриці коефіцієнтів лінеаризованої системи вхідних рівнянь.

АНОТАЦІЯ

Сьомін А.О. Метод ідентифікації параметрів асинхронного електропривода з низькою чутливістю до похибок вимірювання параметрів його режиму при нерухомому роторі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси і системи». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2019.

Дисертаційна робота присвячена рішенням наукової задачі побудови малочутливих до наявності похибок у вхідних експериментальних даних алгоритмів ідентифікації параметрів схеми заміщення.

В роботі показано, що ідентифікація параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в реальних умовах може відбуватися тільки при використанні допущення, що зменшує кількість невідомих параметрів (як при врахуванні, так і при нехтуванні втратами в сталі статора). Допущення про рівність $L_{1\sigma}$ і $L_{2\sigma}$ практично не впливає на перехідні та усталені процеси, що було продемонстровано за допомогою СКВ струму статора та швидкості двигуна.

Проведена оцінка впливу похибок у вхідних експериментальних даних на ідентифікацію кожного параметра схеми заміщення безпосередньо з виразів для вхідної активної та реактивної складових вхідного опору з боку статора. На базі отриманих рекомендацій була складена система нелінійних рівнянь для знаходження невідомих параметрів. Оцінено вплив похибок у вхідних даних на результат рішення даної системи нелінійних рівнянь та визначені рекомендовані значення частот живлення обмоток статора при яких зберігається прийнятна чутливість рішення системи рівнянь до наявності похибок у вхідних експериментальних даних. При цьому забезпечується помилка ідентифікації не більш 10% при наявності помилки знаходження вхідного опору з боку статора не більше 5%. Рекомендовано виконувати ідентифікацію з використанням несиметричного живлення статора.

Проведено аналіз взаємозв'язку рекомендованої частоти живлення статора і потужності двигуна. Виявилось, що найкраще вихідні дані описуються за допомогою логарифмічного рівняння. Експериментальна перевірка розробленого методу підтвердила теоретичні висновки.

Ключові слова: параметрична ідентифікація, схема заміщення, асинхронний двигун, чутливість до похибок, частота живлення.

АННОТАЦИЯ

Сёмин А.А. Метод идентификации параметров асинхронного электропривода с низкой чувствительностью к ошибкам измерения параметров его режима при неподвижном роторе. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы». - Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, 2019.

Диссертация посвящена решению научной задачи построения малочувствительных к наличию ошибок в исходных экспериментальных данных алгоритмов идентификации параметров схемы замещения.

В работе показано, что идентификация параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в реальных условиях может происходить только при использовании допущения, что уменьшает количество неизвестных параметров (как при учете, так и при пренебрежении потерями в стали статора). Допущение о равенстве $L_{1\sigma}$

$L_{2\sigma}$ практически не влияет на переходные и установившиеся процессы, что было продемонстрировано с помощью СКВ тока статора и скорости двигателя.

Проведена оценка влияния погрешностей в исходных экспериментальных данных на идентификацию каждого параметра схемы замещения непосредственно из выражений для входящей активной и реактивной составляющих входного сопротивления со стороны статора. На базе полученных рекомендаций была составлена система нелинейных уравнений для нахождения неизвестных параметров. Оценено влияние погрешностей в исходных данных на результат решения данной системы нелинейных уравнений и определены рекомендуемые значения частот питания обмоток статора при которых сохраняется приемлемая чувствительность решения системы уравнений в наличии погрешностей в исходных экспериментальных данных. При этом обеспечивается ошибка идентификации не больше 10% при наличии ошибки нахождения входного сопротивления со стороны статора не более 5%. Рекомендуется выполнять идентификацию с использованием несимметричного питания статора.

Проведен анализ взаимосвязи рекомендованной частоты питания статора и мощности двигателя. Оказалось, что лучше всего исходные данные описываются с помощью логарифмического уравнения. Экспериментальная проверка разработанного метода подтвердила теоретические выводы.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, схема замещения, асинхронный двигатель, чувствительность к погрешностям, частота питания.

ABSTRACT

Siomin A.O. The method of parameters identification of asynchronous electric drive with low sensitivity to errors of measurement of its mode parameters with stationary rotor. – A manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.09.03 – «Electrotechnical complexes and systems». - National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, 2019.

The thesis is devoted to solving the scientific problem of constructing of the algorithms for identifying parameters of the equivalent circuit with low-sensitivity to the presence of errors in the initial experimental data.

It is shown that identification of parameters of a T-shaped equivalent circuit of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor in real conditions can be made only when an assumption is used, that reduces the number of unknown parameters (both when taking into account and neglecting losses in the stator steel). The assumption of the equality of $L_{1\sigma}$ and $L_{2\sigma}$ has practically no effect on transient and steady-state processes, which was demonstrated using the root-mean-square deviation of the stator current and the motor speed.

The influence of errors in the initial experimental data on the identification of each parameter of the equivalent circuit directly from the expressions for the active and reactive components of the input stator resistance was evaluated. Based on the recommendations received, a system of nonlinear equations was compiled for finding unknown parameters. The influence of the errors in the initial data on the result of solving this system of nonlinear equations is estimated, and recommended values of the supply frequencies of the stator windings for which the acceptable sensitivity of the solution of the system of equations in the presence of errors in the original experimental data is maintained. This provides an identification error of no more than 10% in the presence of an error in finding the input resistance from the stator no more than 5%. It is recommended to perform identification using nonlinear stator supply.

The analysis of the relationship of the recommended stator power frequency and motor power was carried out. It turned out that the initial data are best described using a logarithmic equation. Experimental verification of the developed method confirmed the theoretical conclusions.

Keywords: parametric identification, equivalent circuit, asynchronous motor, error sensitivity, power frequency.

**МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА З НИЗЬКОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДО ПОХИБОК У
ВХІДНИХ ДАНИХ ПРИ НЕРУХОМОМУ РОТОРІ**

(Автореферат)

Підписано до друку Формат 60×90/16.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №137.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
49027, м. Дніпро, просп. Д.Яворницького, 19.