

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ НАЯВНОСТІ В НІЙ МІНІМАЛЬНОГО МОМЕНТУ

Бакуменко В. Б.¹, Тарасова В. В.¹, Ручка О. О.¹,
Гнатів А. В.², Аргун Щ. В.², Тарасов К. С.²

¹Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба,
Інститут цивільної авіації

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Асинхронний двигун (АД) має переваги над іншими типами електродвигунів, тому є найпоширенішим. Розглянуто метод розрахунку механічної характеристики АД при наявності в ній ділянки з явно вираженим мінімальним моментом. Проведено аналіз роботи АД базуючись на його Г-подібній схемі заміщення. Докладно розглянуті та проаналізовані механічні характеристики АД в різних режимах роботи. Розраховано механічну характеристику АД при наявності в ній мінімального моменту.*

***Ключові слова:** асинхронний двигун, механічна характеристика, мінімальний момент, формула Клосса, тяговий електропривод, електромобіль, система керування електроприводом.*

Вступ

Асинхронні електродвигуни (АД) є найпоширенішими серед існуючих. Це обумовлено простотою їх конструкції, високою надійністю, порівняно низькою вартістю, кращими масогабаритними показниками.

АД, як і двигуни постійного струму, мають властивість оборотності (робота і у режимі двигуна, і у генераторному режимі), можуть реалізовувати усі три відомі способи електричного гальмування: рекуперативне, противовмиканням і динамічне. Тому часто в якості основного двигуна у тяговому електроприводі електромобілів використовуються саме двигуни змінного струму (як асинхронні, такі синхронні) [1, 2].

Прикладом найвідоміших електромобілів, що використовують у якості тягових двигунів двигуни змінного струму є Tesla Model S та Tesla Model X (АД з короткозамкненим ротором); Nissan Leaf та Mitsubishi i-MiEV (синхронний двигуном (СД) з постійними магнітами) [3].

Зараз особливо широкого розповсюдження набуває асинхронний електропривод, що має векторне керування на базі сучасних статичних перетворювачів з мікропроцесорними контролерами [1, 2]. Однією з найважливіших характеристик двигуна є його механічна характеристика. Отже, базуючись на знаннях залежності моменту на валу електродвигуна від його швидкості обертання в різних режимах роботи, можна виконати якісне і ефекти-

вне (з точки зору витрат енергії та технічних можливостей двигуна) керування.

Аналіз публікацій

Через те, що електропривод використовується в різних галузях, застосовуються різні типи електродвигунів, наприклад, двигуни постійного струму, різноманітні асинхронні і синхронні двигуни, вентильні двигуни з постійними магнітами, реактивно-вентильні електродвигуни з самозбудженням і з незалежним збудженням, крокові двигуни тощо [4]. Але, як зазначалося вище, завдяки своїм перевагам, АД є найпоширенішими. Вони складають майже 90 % серед існуючих [5], хоча і мають гірші масогабаритні показники, ніж СД з постійними магнітами чи реактивні ВД [7].

У багатьох розробках в якості тягового електродвигуна для електромобілів, рекомендується використовувати АД [6-12]. Тим паче, що при наявності сучасних систем управління, вже навіть за регулюючими властивостями АД не поступаються двигунам постійного струму. В роботі [1] представлено імітаційне дослідження нової стратегії векторного управління АД, що живиться імпульсами постійного струму. Це дослідження підтверджує дієвість такої стратегії при суттєвому спрощенні схеми управління.

У статті [2] авторами представлена реалізація управління так званим просторово-векторним гістерезисом. Така реалізація век-

торного управління оцінюються для використання в електромобілях з асинхронною машиною або СД з постійним магнітом. Автори зазначають, що регулятор обертового просторового вектору гістерезису дозволяє знизити втрати потужності за рахунок зменшення процесів перемикання.

Отже, детальний аналіз роботи АД, а також розрахунок його механічної характеристики є досить актуальним завданням. Основним методом аналізу усталених статичних режимів роботи АД є використання еквівалентних схем [4, 13, 14].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є проведення аналізу режимів роботи асинхронного двигуна з розрахунком його механічної характеристики при наявності в ній мінімального моменту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз роботи АД, базуючись на його Г-подібній схемі заміщення;
- провести аналіз роботи АД за його механічною характеристикою;
- розрахувати механічну характеристику АД при наявності в ній мінімального моменту.

Аналіз електромеханічних процесів АД

Для одержання аналітичного виразу механічної характеристики АД з певним наближенням слід скористатися спрощеною Г-подібною схемою заміщення однієї фази АД (рис. 1).

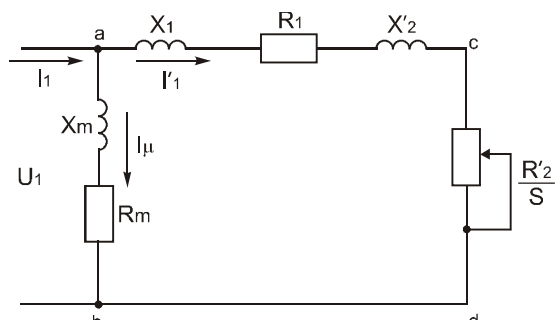


Рис. 1. Розрахункова Г-подібна схема АД

На схемі позначено:

U_1 – первинна фазна напруга (живлення фази статора), В;

I_1 – фазний струм статора, А;

I'_2 – зведений фазний струм ротора, А;

X_1 – первинний реактивний опір розсіювання, Ом;

X'_2 – зведений вторинний реактивний опір розсіювання, Ом;

R_1 – первинний активний опір, Ом;

R'_2 – зведений вторинний активний опір, Ом;

I_μ – струм намагнічування, А;

X_m – реактивний опір контуру намагнічування, Ом;

R_m – активний опір контуру намагнічування, Ом;

$S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – ковзання АД, в.о.,

$\omega_0 = \frac{2 \cdot p}{60} \cdot n_0$ – синхронна кутова швидкість двигуна (у системі СИ), 1/с;

n_0 – синхронна частота обертання двигуна, об/хв.

R_m, X_m, I_μ – магнітна система – контур намагнічування схеми;

R'_2/S – механічна енергія двигуна і характер її зміни еквівалентні електричним втратам енергії на нелінійному опорі схеми.

У цьому випадку нема необхідності виконувати складні розрахунки (електричних, магнітних і механічних процесів), а досить виконати розрахунки на його моделі (схемі заміщення), тобто тільки розрахувати електричне коло, користуючись тільки законами електричних кіл (Кірхгофа) [15].

Розглянемо отримання аналітичного виразу механічної статичної характеристики АД. У відповідності до схеми (рис.1), значення вторинного струму буде дорівнювати:

$$I'_2 = \frac{U_1}{Z},$$

де Z – загальний опір обмоток статора й ротора (коло acdb, рис. 1);

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (1)$$

Потужність двигуна (для значення ковзання S) дорівнює:

$$P = M \cdot \omega_0 \cdot S. \quad (2)$$

З другого боку ця потужність є електричними втратами енергії кола схеми acdb:

$$P = (I_2')^2 \cdot R_2' \quad (3)$$

Це на одну фазу, а на весь двигун ($m=3$) втрати енергії будуть дорівнювати:

$$P = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2' \quad (4)$$

Після прирівнювання виразів (2) і (4), отримуємо рівняння:

$$M \cdot \omega_0 \cdot S = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2',$$

Звідки можна визначити величину моменту АД:

$$M = \frac{3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S} \quad (5)$$

У рівнянні (5) замість вторинного струму I_2' підставимо його значення з виразу (1), отримаємо вираз електромагнітного моменту для АД:

$$M = \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right] \cdot S} \quad (6)$$

У рівнянні (6), у правій його частині усі параметри для даного двигуна і даного статичного режиму є сталими, а незалежною змінною (аргументом) є ковзання S , тому рівняння (6) можна подати в узагальненому вигляді (функції):

$$M = f(S) \quad (7)$$

Рівняння (6) і (7) є механічна характеристика АД, виражена через ковзання S . Електромагнітний момент є складною функцією ковзання, крива має два екстремуми – один у режимі двигуна, другий – у генераторному. Для знаходження цих максимумів достатньо дослідити криву (6) на екстремум звичайним способом, тобто взяти першу похідну від M за ковзанням S й зрівняти її з нулем:

$$\frac{dM}{dS} = 0 \quad (8)$$

Вирішуючи рівняння (6) за умов (8), одержимо ковзання ($S_{кр}$), при якому двигун роз-

виває максимальний момент:

$$S_{кр} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (9)$$

Підставляючи значення $S_{кр}$ із виразу (9) у рівняння (6), одержимо вираз максимального моменту:

$$M_{\max} = \pm \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} \quad (10)$$

Знак „+” у рівняннях (9) та (10) відноситься до режиму двигуна (або гальмівного режиму протитовмикування), а знак „-” – до генераторного режиму рекуперативного гальмування.

Якщо рівняння (6) поділити на рівняння (10) та провести відповідні перетворення, то отримаємо:

$$M = \frac{2M_{\max} \cdot (1 + a \cdot S_{кр})}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2a \cdot S_{кр}} \quad (11)$$

де $a = R_1 / R_2'$.

Із рівнянь (6) й (10) видно, що при заданому ковзанні момент, який розвиває АД, пропорційний квадрату підведеної напруги. Більше того, решта параметрів, що входять до складу рівнянь (6) й (10) для конкретного двигуна є величинами сталими, отже момент АД визначається тільки напругою живлення, хоча такий параметр, як вторинний опір, для конкретного двигуна легко змінювати, вводячи у коло ротора додатковий опір (якщо АД є двигуном з фазним ротором).

З вищевикладеного випливає дуже важливий наслідок: квадратична залежність моменту АД від напруги живлення спричиняє значну чутливість АД до коливань напруги мережі (зменшення напруги, наприклад, в два рази, призводить до зниження моменту, що розвиває двигун, у чотири рази). Така квадратична залежність притаманна усім двигунам і іншим електромеханічним системам індукційного типу, а оскільки у реальних умовах використовується тільки один двигун індукційного типу – АД, то на практиці з усіх двигунів, що використовуються, єдиний двигун, що дуже чутливий до коливань напруги – це АД.

З цих причин величина напруги мережі змінного струму суворо регламентується. Так стандартом забороняється експлуатація асинхронних електродвигунів, якщо падіння напруги в мережі перевищує 10%.

Механічна статична характеристика АД у координатах S й M ($M = f(S)$) добре відома [4, 14]. Нагадаємо деякі її особливості (рис. 2).

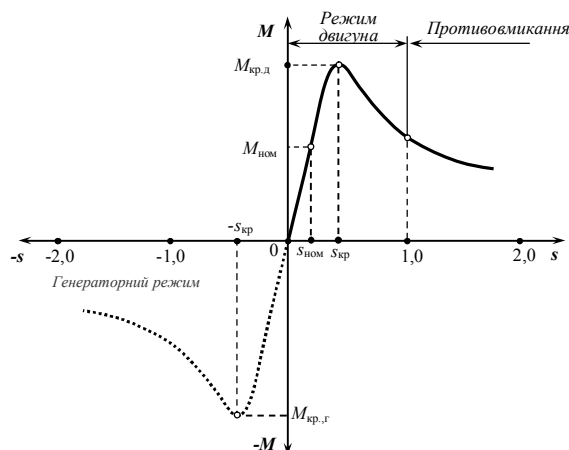


Рис. 2. Механічна характеристика АД

Крива має чотири характерні точки:

- синхронний режим, при цьому $S=0$, $M=0$;

- номінальний режим, при цьому $S=S_{ном}$, $M=M_{ном}$;

- критичний режим, при цьому момент, який розвиває двигун у режимі двигуна, максимальний $M = M_{\max \phi}$, а ковзання – критичне $S = S_{кр}$;

- режим початкового пуску, при цьому ковзання $S_n = 1$, а момент – пусковий $M = M_{пуск}$.

На числовій осі (числа змінюються від $-\infty$ до $+\infty$) слід відзначити межі змінювання ковзання: при $1 > S > 0$ – режим двигуна; при $+\infty > S > 1$ – режим гальмування противовмиканням; при $0 > S > -\infty$ – генераторний режим рекуперативного гальмування.

Із рівняння (12) видно, що максимальний момент для режиму двигуна (за абсолютним значенням) менше, ніж максимального моменту генераторного режиму:

$$|M_{\max \phi}| < |M_{\max z}|.$$

На це впливають знаки „ \pm ” у знаменнику рівняння (9), оскільки опір:

$$R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} > R_1 - \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

Величина критичного ковзання для режи-

му двигуна і генераторного режиму (за абсолютним значенням) одна і та ж.

$$|S_{кр.д}| = |S_{кр.г}|$$

Рівняння механічної характеристики (11) відповідає більш-менш точним співвідношенням параметрів характеристики, тому що урахує падіння напруги на активному опорі статора R_1 . У реальних умовах активний опір статора (особливо для АД середньої та великої потужності) незначний і ним (з достатньою для практичних розрахунків точністю) можна знехтувати:

$$R_1 = 0. \quad (12)$$

Тоді рівняння механічної характеристики (11) набере вигляду:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}. \quad (13)$$

Рівняння (13) називається спрощеною механічною характеристикою АД у координатах S та M . Однак для двигунів великої потужності (де R_1 дуже мале) це рівняння досить точно відповідає фізичним процесам АД. Рівняння (11) ще називають рівнянням Клосса, а рівняння (13) – спрощеною формулою Клосса.

Якщо у рівнянні (13) замість поточних значень S та M підставити їх номінальні значення: $S = S_{ном}$; $M = M_{ном}$, а кратність максимального моменту $M_{\max}/M_{ном}$ (перевантажувальну здатність) позначити λ ($\lambda = M_{\max}/M_{ном}$), то після перетворень рівняння (13) буде мати вигляд:

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (14)$$

Значення перевантажувальної здатності АД λ має суттєве практичне значення при експлуатації електроприводів. Величина його установлюється Державним стандартом. Для трифазних АД загального використання у широкому діапазоні потужностей АД λ має такі межі: $\lambda = 1,7 \dots 2,2$, причому більше значення λ відноситься до синхронної частоти обертання АД – 3000 об/хв, а менше – для 750 об/хв.

Для спеціальних серій АД перевантажувальна здатність більш висока. Так для крайових та металургійних АД вона складає $\lambda = 2, 3 \dots 2, 8$.

Крім АД з загальновідомими механічними характеристиками (рис. 2) промисловість випускає і АД, механічна характеристика яких має чітко виражений мінімальний момент M_M . Це значення отримується при ковзанні приблизно рівному 0,8, а відносна величина моменту лежить в межах від $M_{M'}^* = 1,9$ до $M_M^* = 0,9$ в залежності від швидкості та потужності АД. Приблизний вид такої механічної характеристики приведений на рис. 3.

Обґрунтуємо теоретичну можливість отримання мінімуму моменту M_M на ділянці механічної характеристики при ковзанні S_M . У вигляді розрахункової формули моменту використаємо формулу Клосса. З неї отримати значення мінімального моменту можливо лише тоді, коли величина q буде змінюватися по визначеному закону, зв'язуючи між собою величини M_k, M_{II}, M_M, S_M , тобто величина q повинна бути функцією п'яти аргументів: $q(M_k, M_{II}, M_M, S)$.

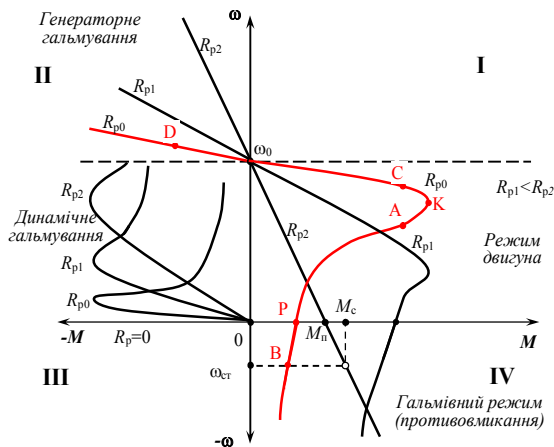


Рис. 3. Механічна характеристика АД в координатах $\omega = f(M)$

Позначимо даний коефіцієнт як q_2' . В теорії електроприводу є формула для розрахунку механічної характеристики АД з мінімумом моменту (формула Д. І. Бистрицького та В. Н. Андріанова), однак вона не дає потрібної точності. Тому при розрахунках механічної характеристики для ковзання від $S = 0$ до $S = S_k$ (ділянка АВ, рис. 3) коефіцієнт q визначається як q_1 .

Для розрахунку механічної характеристики при ковзаннях від $S = S_k$ до $S = 1$ (ділянка ВСД,

рис. 3) замість коефіцієнта q_2 , необхідно використовувати q_2' , який є змінною величиною, залежить від ковзання за деяким законом, який забезпечує необхідне значення моменту M_M при заданому ковзанні $S = S_M$ та значення пускового моменту M_{II} згідно з даними каталогу.

Вираз для коефіцієнту q_2' отриманий методом ітерацій, тобто методом послідовних наближень. Для розрахунку q_2' пропонується такий вираз:

$$q_2' = q_2 \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{1-S}}{1 - K_{S_2} \cdot S}\right), \quad (18)$$

$$M = \frac{M_n^* \left(\frac{1}{S_k} + S_k\right) - 2M_k^*}{M_k^* - M_n^*} \quad (19)$$

Крім того необхідно визначити і коефіцієнт K_{S_2} , який зв'язує між собою величини q_2 і q_{2M} :

$$K_{S_2} = \frac{(1 - q_{2M}) - \sqrt{1 - S_M}}{q_2 \cdot (1 - q_{2M}) \cdot S_M}, \quad (20)$$

$$q_{2M} = \frac{M_M^* \left(\frac{S_M}{S_k} + \frac{S_k}{S_M}\right) - 2M_k^*}{M_k^* - M_M^*} \quad (21)$$

Дані з літератури [4, 14] підтверджують, що коефіцієнт $q_2' = f(M_k, M_{II}, M_M, S)$ може забезпечити отримання механічної характеристики з мінімальним моментом M_M при заданому ковзанні $S = S_M$, а також критичного M_k та пускового моменту M_{II} у відповідності з даними каталогу.

Розрахунок механічної характеристики АД

Розглянемо приклад розрахунку механічної характеристики АД з мінімальним моментом. Нехай відомі каталожні дані:

- $P_H = 1,1$ кВт;
- $M_{II}^* = 2,0$;
- $M_M^* = 1,8$;
- $M_k^* = 2,2$;
- $S_H = 0,053$;
- $M_H = 7,38$ Нм;
- $M_k = 16,23$ Нм;
- $M_{II} = 14,76$ Нм;

– $S_M=0,8$.

Необхідно розрахувати механічну характеристику даного АД.

Проведемо розрахунок для двох ділянок характеристики.

1. Перша ділянка: ковзання від $S=0$ до $S=S_k$ (рис.4).

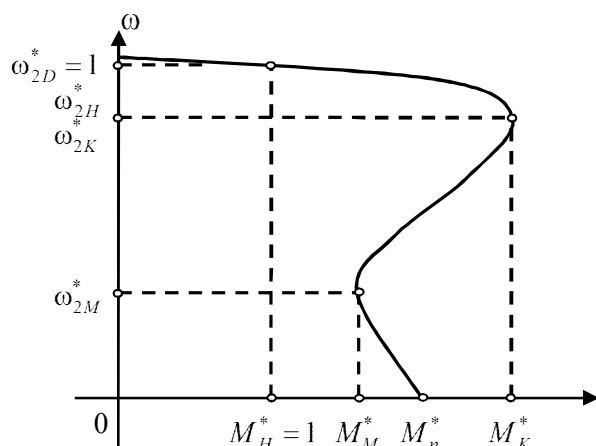


Рис. 4. Аналіз механічної характеристики АД мінімальним моментом

Визначаємо критичне ковзання S_k :

$$S_k = \sqrt{\frac{S_H(M_{II}^* - 1)}{1 - S_H(3M_{II}^* - 2)}} = \sqrt{\frac{0,053(2 - 1)}{1 - 0,053(3 \cdot 2 - 2)}} = 0,259.$$

Розраховуємо величину q_1 :

$$q_1 = \frac{\frac{S_H}{S_k} + \frac{S_k}{S_H} - 2M_k^*}{M_k^* - 1} = \frac{\frac{0,053}{0,259} + \frac{0,259}{0,053} - 2 \cdot 2,2}{2,2 - 1} = 0,572.$$

Записуємо формулу Клосса для першої ділянки:

$$M = \frac{M_k(2 + q_1)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + q_1} = \frac{16,23 \cdot (2 + 0,572)}{\frac{0,259}{0,259} + \frac{0,259}{S} + 0,572} = \frac{41,74}{\frac{0,259}{S} + \frac{0,259}{S} + 0,572}$$

Результати розрахунків за даним виразом

для різних величин ковзання (від $S=0$ до $S=S_k$) зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків для першої ділянки

S	0	$S_H=0,053$	0,125	$S_k=0,259$
ω_2, c^{-1}	157,5	149	138	117
$\eta_2, \text{об/мин}$	1500	1420	1313	1112
$M, \text{Нм}$	0	7,38	13,3	16,23
q_1	0,572	0,572	0,572	0,572
M^*	0	1	1,8	2,2

2. Друга ділянка: ковзання від $S=S_k$ до $S=1$ (рис. 4).

Для цієї ділянки використовуємо формулу Клосса, яку записуємо у вигляді:

$$M = \frac{M_k(2 + q'_2)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + q'_2}$$

Коефіцієнт q'_2 визначається для кожного значення ковзання. Знаходимо коефіцієнт q_2 :

$$M = \frac{M_n^* \left(\frac{1}{S_k} + S_k \right) - 2M_k^*}{M_k^* - M_n^*} = \frac{2 \cdot \left(\frac{1}{0,259} + 0,259 \right) - 22,2}{2,2 - 2} = 19,2.$$

Розраховуємо коефіцієнт q_{2M} за формулою (21):

$$q_{2M} = \frac{M_M^* \left(\frac{S_M}{S_k} + \frac{S_k}{S_M} \right) - 2M_k^*}{M_k^* - M_M^*} = \frac{1,8 \cdot \left(\frac{0,8}{0,259} + \frac{0,259}{0,8} \right) - 2 \cdot 2,2}{M_k^* - M_M^*} = 4,4.$$

Розраховуємо коефіцієнт K_{S_2} за формулою (19):

$$K_{S_2} = \frac{(1 - \frac{q_{2M}}{q_2}) - \sqrt{1 - S_M}}{\frac{(1 - \frac{q_{2M}}{q_2}) \cdot S_M}{q_2}} =$$

$$= \frac{(1 - \frac{4,4}{19,2}) - \sqrt{1 - 0,8}}{(1 - \frac{4,4}{19,2}) \cdot 0,8} = 0,52.$$

Використовуючи значення ковзання $S = 0,4$, $S_M = 0,8$, $S = 1$ та деякі інші, розраховуємо механічну характеристику для другої ділянки. Результати розрахунків зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків для другої ділянки

S	0,4	0,6	$S=S_H=$ $=0,8$	0,9	$S=S_n=$ $=1$
ω_2, c^{-1}	94,5	63	31,5	15,75	0
$n_2, \text{об/мин}$	900	600	300	150	0
q_2'	0,384	1,73	4,4	7,87	19,2
$M, \text{Нм}$	15	13,5	13,28	13,80	14,76
$M^* = M/M_H$	2,03	1,83	1,80	1,87	2,0

Необхідно відмітити, що в деяких випадках необхідно поділяти характеристику не на дві, а на більшу кількість ділянок [16]. Тоді і розрахунки необхідно проводити для усіх цих ділянок за зазначеною методикою.

Висновки

При використанні АД в автоматичних системах керування необхідно вміти достатньо просто та точно визначати критичне ковзання, а також механічну характеристику. Це особливо актуально для різноманітних систем керування електромобілями, в яких тяговий електропривод побудований на базі АД. Для цього існують спеціальні методики. Вони обираються в залежності від виду механічної характеристики, тобто в залежності від того, є в характеристиці ярко виражений мінімальний момент, чи він відсутній. Величина критичного ковзання залежить від величини активного опору кола ротора. Оскільки струм двигуна пропорційний напрузі у першій ступені, а момент – напрузі живлення у квадраті, отже, характеристики при зниженні напруги живлення змінюються як якісно, так і кількісно.

Поточне значення моменту АД залежить

від квадрата напруги живлення, активного та індуктивного опору обмоток ротора і статора при заданих значеннях ковзання та синхронній кутовій швидкості. Для усіх значень напруги критична швидкість $\omega_{кр}$ (критичне ковзання $s_{кр}$) не змінюється, тобто не залежать від величини напруги. Величина моменту змінюється суттєво зі зміною напруги. Так $M_{max1} = 4 \cdot M_{max4}$, оскільки напруга мережі зменшилася вдвічі. У реальних умовах у всіх промислових мережах може падати напруга, тому слід постійно контролювати наскільки істотним є зменшення максимального і пускового моментів приводів при зменшенні напруги і наскільки вони задовольняють умовам технологічного процесу. Якщо розглядається керування тягового електроприводу на базі АД для електромобілів, то також слід зважати на той факт, що напруга живлення від накопичувача енергії (акумуляторна батарея чи блок суперконденсаторів) також буде змінюватися по мірі розряду. Отже, буде спостерігатися зміна як пускового, так і максимального моменту, що здатен розвивати даний привід.

Література

- Chen R., Zhang J., Shao Z., Liu W. Simulation study on a novel vector control strategy for asynchronous motor. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (Busan, 1-4 June 2016)*. Busan, 2016. P. 072-076.
- Dost P., Schael M., Sourkounis C. Electric vehicle application of rotational space vector hysteresis control with different electric motors. *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. (Dallas, 29 Oct.-1 Nov. 2014). Dallas, 2014. C. 549-554.
- Du G., Cao W., Hu S., Lin Z., Yuan T. Design and Assessment of an Electric Vehicle Powertrain Model Based on Real-World Driving and Charging Cycles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68(2). P. 1178-1187.
- Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Трунова І. С. Теорія електроприводу транспортних засобів: підручник. Х.: ХНАДУ, 2016. 292 с.
- Асинхронный двигатель. 2019. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction/> (дата звернення 14.03.2019).
- Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2017. №14(4). P. 4649-

4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
7. Аргун Щ. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. Автомобільний транспорт, 2018. №. 43. С. 36-46.
 8. Dost Ph., Schael M., Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (Coimbra, 27-30 Oct. 2014). Coimbra, 2014. P. 1-6.
 9. Chuanwei Zhang, Nuoting Wang. Research on asynchronous motor control of electric vehicle. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*. (St. Petersburg, 19-21 May 2017). St. Petersburg, 2017. P. 165-1693.
 10. Lucian-Vasile E., Diana-Ramona S. Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. (Bucharest, 23-25 March 2017). Bucharest, 2017. P. 597-600.
 11. Martins R. P. D. F., Sousa D. M., Pires V. F., Roque A. Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. (Istanbul, 13-17 May 2013). Istanbul, 2013. P. 1247-1252.
 12. Huang W., Wang G., & Yu M. Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. *International journal of electric and hybrid vehicles*. 2017. Vol. 9 (4). P. 350-360.
 13. Тарасова В. В., Суховій С. А., Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Використання асинхронного двигуна, як об'єкта автоматичного керування. Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. X.: ХНАДУ, 2017. № 12. С. 166-174. ISSN 2226-9266. http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE17_2/4.7.pdf.
 14. Аргун Щ. В., Гнатов А. В. Электромобиль и его тяговый электропривод с асинхронным двигателем: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 216 с.
 15. Bird J. *Electrical circuit theory and technology*. Routledge, 2017.
 16. Hnatov A., Arhun S., Dziubenko O., Ponikarovska S. Choice of Electric Engines Connection Circuits in Electric Machine Unit of Electric Power Generation Device. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 2018. 12(4), P. 87-95. <http://mjee.iaumajlesi.ac.ir/index/index.php/article/view/2760>

References

1. Chen R., Zhang J., Shao Z., Liu W. (2016) Simulation study on a novel vector control strategy for asynchronous motor. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific* (Busan, 1-4 June 2016), 072-076.
2. Dost P., Schael M., Sourkounis C. (2014) Electric vehicle application of rotational space vector hysteresis control with different electric motors. *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. (Dallas, 29 Oct.-1 Nov. 2014), 549-554.
3. Du G., Cao W., Hu S., Lin Z., Yuan T. (2019) Design and Assessment of an Electric Vehicle Powertrain Model Based on Real-World Driving and Charging Cycles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 68(2), 1178-1187.
4. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Trunova I. S. (2016) Теорія електроприводу транспортних засобів: підручник [The theory of electric vehicles: textbook]. Kh.: KhNADU [in Ukrainian].
5. Асинхронний двигател (2019) {Asynchronous motor}. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction/> (accessed:14.03.2019) [in Russian].
6. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S. (2017) Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14(4), 4649-4664 doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
7. Arhun Shch. V. (2018) Rozrakhunok osnovnykh kharakterystyk tiahovoho asynkronnoho dvyhuna dlia elektrychnoi transmisii miskoho elektrobusa [Calculation of the main characteristics of the traction asynchronous engine for the electric transmission of the city electric bus]. *Avtomobilnyi transport*, 43, 36-46 [in Ukrainian].
8. Dost Ph., Schael M. (2014) Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (Coimbra, 27-30 Oct. 2014), 1-6.
9. Chuanwei Zhang, Nuoting Wang (2017) Research on asynchronous motor control of electric vehicle. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*. (St. Petersburg, 19-21 May 2017), 165-1693.
10. Lucian-Vasile E., Diana-Ramona S. (2017) Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. (Bucharest, 23-25 March 2017), 597-600.

11. Martins R. P. D. F., Sousa D. M., Pires V. F., Roque A. (2013) Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. (Istanbul, 13-17 May 2013), 1247-1252.
12. Huang W., Wang G., & Yu M. (2017) Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. *International journal of electric and hybrid vehicles*. 9(4), 350-360.
13. Tarasova V. V., Sukhovii S. A., Hnatov A. V., Arhun Shch. V. (2017) Vykorystannia asynkhronoho dvyhuna, yak obiekta avtomatychnoho keruvannia. [Use of an asynchronous motor as an object of automatic control]. *Avtomobil y elektronika. Sovremennye tekhnolohyy: elektronnoe nauchnoe spetsyalyzovanne yzdanye*. Kh.: KhNADU.12, 166-174. ISSN 2226-9266. http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/A_E17_2/4.7.pdf. [in Ukrainian].
14. Arhun Shch., Hnatov A. V. (2017) Elektromobil i ego tyagovyy elektroprivod s asinhronnym dvigatelem: monografiya. Saarbr [Electric car and its traction electric drive with asynchronous motor: monograph] Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing [in Russian].
15. Bird J. *Electrical circuit theory and technology*. Routledge, 2017.
16. Hnatov A., Arhun S., Dziubenko O., Poni-karovska S. (2018) Choice of Electric Engines Connection Circuits in Electric Machine Unit of Electric Power Generation Device. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 12(4), 87-95. <http://mjee.iaumajlesi.ac.ir/index/index.php/ee/article/view/2760>

Бакуменко Владислав Бердикулович¹, магістрант, т. +38095-89-07-225, kalifus@yandex.ru

Тарасова Валентина Всеволодівна¹, к.т.н., доц., тел. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com,

Ручка Олександр Омелянович¹, к.т.н., доц., тел. +38 067-774-86-83, val.vs.tarasova@mail.ru,

Гнатів Андрій Вікторович², д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 06674380887, kalifus76@gmail.com,

Аргун Щасяна Валіковна², к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,

Тарасов Кирило Сергійович², аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0933435082, niakros@gmail.com,

¹Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба, Інститут цивільної авіації, 61023, м. Харків, вул. Сумська 77/79.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Calculating the mechanical characteristics of the asynchronous motor having a minimal moment in it

Abstract. Problem Asynchronous electric motors (AEs) are the most common among all electric motors. This is due to the simplicity of design, high reliability, relatively low cost, better weight and overall performance, etc. The asynchronous electric drive, which has a vector control based on modern static converters with microprocessor controllers, is especially widespread now. One of the most important characteristics of the engine is its mechanical characteristics. Based on the knowledge of the dependence of the moment on the electric motor shaft on its speed of rotation in various modes of operation, it is possible to implement high-quality and efficient control. **Goal.** The goal is conducting the analysis of operating modes of the asynchronous motor with the calculation of its mechanical characteristics in the presence of a minimal moment in it. **Methodology.** Analytical methods of research, methods of the theory of electric machines and electric drives are used, as well as methods of calculating electric circuits. The method of calculating the mechanical characteristics of AE in the presence of a site with a clearly expressed minimum torque is considered. **Results.** The analysis of the AE is based on its G-shaped replacement scheme. The mechanical characteristics of AE in different modes of operation were considered and analyzed in details. The mechanical characteristics of the AE were calculated in the presence of a minimal moment in it. It is determined that the value of the critical slip depends on the value of the active resistance of the rotor circle. Since the current of the motor is proportional to the voltage in the first stage, and the moment is the supply voltage squared, therefore, the characteristics of the voltage drop change both qualitatively and quantitatively. **Originality.** The current value of the moment of the AE depends on the square of the supply voltage, the active and inductive resistance of the windings of the rotor and the stator with the given values of slip and synchronous angular velocity. For all values of the voltage, the critical velocity (critical slip) does not change, that is, it does not depend on the voltage value. The magnitude of the moment varies significantly with the change in voltage. **Practical value.** In real conditions, all industrial networks may be subject to voltage, therefore, it is necessary to continuously monitor how significant it is to reduce the maximum and starting moments of the drives when reducing the voltage and how much they meet the demands of the technological process. If the control of a traction electric drive based on an

electric motor is considered, the fact that the voltage from the energy storage will vary with the discharge should also be taken into account. Consequently, there will be a change in both the starting and the maximum moment that this drive can develop.

Keywords: asynchronous motor, mechanical characteristic, minimum torque, Clause formula, traction electric drive, electric car, electric drive system.

Bakumenko Vladyslav¹, graduate student, tel. +38095-89-07-225, kalifus@yandex.ru

Tarasova Valentina¹, Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com,

Ruchka Oleksandr¹, Ph.D., Assoc. Prof., tel. +38 067-774-86-83, val.vs.tarasova@mail.ru,

Hnatov Andrii², professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 066-7438-0887, kalifus76@gmail.com,

Shchasyana Arhun², Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 099-378-04-51, e-mail: shasyana@gmail.com,

Tarasov Kyrylo², postgraduate, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0933435082, niakros@gmail.com,

¹Ivan Kozhedub Kharkiv University of Air Force, Sumy 77/79 street, Kharkiv, 61023, Ukraine.

²Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Расчет механической характеристики асинхронного двигателя при наличии в ней минимального момента

Аннотация. Асинхронный двигатель (АД) имеет преимущества перед другими типами электродвигателей, и является самым распространенным – занимает почти 90% всех существующих электроприводов. Рассмотрен

метод расчета механической характеристики АД при наличии в ней участка с явно выраженным минимальным моментом. Проведен анализ работы АД основываясь на его Г-образной схеме замещения. Подробно рассмотрены и проанализированы механические характеристика АД в различных режимах работы. Рассчитана механическая характеристика АД при наличии в ней минимального момента.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, механическая характеристика, минимальный момент, формула Клосса, тяговый электропривод, электроавтомобиль, система управления электроприводом.

Бакуменко Владислав Бердикулович¹, магистрант, т. +38095-89-07-225, kalifus@yandex.ru

Тарасова Валентина Всеволодовна¹, к.т.н., доц., тел. +38066-828-47-31, val.vs.tarasova@gmail.com,

Ручка Александр Емельянович¹, к.т.н., доц., тел. +38 067-774-86-83, val.vs.tarasova@mail.ru,

Гнатов Андрей Викторович², д.т.н., проф. каф. автомобильной электроники, тел. +38 06674380887, kalifus76@gmail.com,

Аргун Щасяна Валиковна², к.т.н., доц. каф. автомобильной электроники, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,

Тарасов Кирилл Сергеевич², аспирант кафедры автомобильной электроники, тел. +38 0933435082, niakros@gmail.com,

¹Харьковский национальный университет Воздушных сил имени Ивана Кожедуба, Институт гражданской авиации, 61023, г. Харьков, ул. Сумская 77/79.

²Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.