

УДК 629.341

DOI: 10.30977/АТ.2219-8342.2018.43.0.36

РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОБУСА

Аргун Щ. В.¹,¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено аналіз електродвигунів з позиції їх застосування в тяговому електроприводі автотранспортних засобів з визначенням найбільш перспективного для виробництва електричної трансмісії в Україні. Проведено комплексну експертну оцінку тягових електродвигунів для електричної трансмісії. Виконано розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електроприводу електробуса міського призначення.

Ключові слова: електрична трансмісія, електродвигун, тяговий електропривод, асинхронний двигун, електробус, електромобіль, автотранспортні засоби.

Вступ

Останнім часом все більше набирають популярності автотранспортні засоби, що побудовані на основі електричної трансмісії. Найвагомими тут є екологічний та економічний чинники. Для великих міст ці два чинники виступають у тісному поєднанні й формують вимоги для сучасного автотранспорту [1].

Ще одним чинником є енергетична ефективність. Тобто як ефективно автотранспортний засіб використовує наявні енергоресурси. Сучасні двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) не забезпечують високої енергетичної ефективності. Це особливо помітно в міських умовах експлуатації, що накладають обмеження на швидкісний режим і вимагають частого чергування фаз розгону і гальмування. Крім того, під час зупинок ДВЗ не вимикаються (якщо відсутня система «Старт-стоп»), що призводить втрати енергії [2, 3]. Водночас під час руху з крейсерською швидкістю автомобіль чи міський автобус використовує лише 25 % потужності ДВЗ [4]. Отже наявна проблема неефективного використання двигуна.

Аналіз публікацій

Ключовим елементом електричної трансмісії є електричний двигун. Його вибір – це важливий крок при проектуванні електричного автотранспортного засобу. До тягового електродвигуна висувається багато вимог. Основними з них є: високий ККД в широкому діапазоні регулювання швидкості та в широкому діапазоні зміни навантаження; легкість і плавність регулювання швидкості й моменту; високі масогабаритні показники; можливість роботи в режимі рекуперативно-

го гальмування; висока перевантажувальна здатність; високий момент у всьому діапазоні частот обертання; надійність; простота; зручність обслуговування і низька вартість [5].

В сучасному тяговому приводі в різних галузях застосовуються колекторні двигуни постійного струму, асинхронні двигуни (АД), синхронні двигуни (СД), вентильні двигуни (ВД) з постійними магнітами, реактивно-вентильні електродвигуни із самозбудженням і з незалежним збудженням [6].

Далі буде розглянуто переваги та недоліки зазначених електродвигунів як основних складових електричної трансмісії автотранспортних засобів. Але слід зазначити, що у багатьох роботах в якості тягового електродвигуна рекомендується саме АД [4, 7-11]. За наявності сучасної системи управління АД не поступаються за регулюючими властивостями двигунам постійного струму і деяким іншим типам електродвигунів. Однак вони мають гірші масогабаритні показники, ніж СД з постійними магнітами, реактивні ВД.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є проведення аналізу електродвигунів у розрізі їх застосування в тяговому електроприводі автотранспортних засобів з визначенням найбільш перспективного для використання в якості електричної трансмісії в Україні; розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії електробуса міського призначення.

Відповідно до поставленої мети слід провести вибір та розрахунок електродвигуна для електричної трансмісії міського електробуса, рис. 1. Основні технічні та енергетичні параметри даного електробуса були розрахо-

вані в авторських публікаціях [12-15]. Це електробус міського призначення, клас місткості – малий (16 – 25 міс для сидіння).

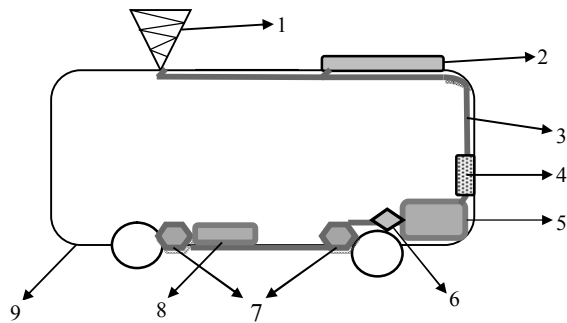


Рис. 1. Конструкція електробуса міського призначення: 1 – пантограф для під'єднання до тролейбусної контактної мережі; 2 – зарядний блок від потужних зарядних пристроїв; 3 – струмопроводи; 4 – блок управління; 5 – блок ультраконденсаторів; 6 – інвертор; 7 – тяговий електричний двигун; 8 – блок акумуляторних батарей; 9 – корпус автобуса

Перед тим, як провести вибір та розрахунок основних технічних параметрів тягового електродвигуна для електричної трансмісії електробуса міського призначення, слід зазначити основні критерії даного вибору [16]:

- вид електричного струму, що живить обладнання;
- потужність електродвигуна;
- режим роботи;
- кліматичні умови й інші зовнішні чинники.

Перелічені критерії вимагають привести загальну класифікацію електродвигунів із зазначенням їх основних переваг та недоліків.

Класифікація електродвигунів

Електричний двигун – це електрична машина, за допомогою якої електрична енергія перетворюється в механічну, для приведення в рух різних механізмів. Електродвигун є основним елементом електроприводу [17].

У деяких режимах роботи електропривода електродвигун здійснює зворотне перетворення енергії, тобто працює в режимі електричного генератора.

За видом механічного руху електродвигуни бувають обертові, лінійні та інші. Під електродвигуном найчастіше мається на увазі електрична машина, що створює обертальний рух.

Залежно від використовуваного електричного струму двигуни поділяються на дві групи:

- постійного струму;
- змінного струму.

Електродвигуни постійного струму на цей час застосовуються не так масово, як, наприклад, у ХХ столітті. Їх практично витіснили двигуни змінного струму.

Головний недолік електродвигунів постійного струму – можливість експлуатації виключно за наявності джерела постійного струму або перетворювача змінної напруги в постійний струм. У сучасному промисловому виробництві забезпечення цієї умови вимагає додаткових фінансових витрат. Проте при істотних недоліках цей тип двигунів відрізняється високим пусковим моментом і стабільною роботою в умовах великих перевантажень. Приводи вказаного типу найчастіше застосовуються в металургії і верстатобудуванні, встановлюються на електротранспорт (особливо на першому етапі електромобілебудування [18, 19]).

Електродвигуни змінного струму поділяються на синхронні й асинхронні. У кожній підгрупі є свої конструктивні та експлуатаційні особливості.

Синхронні двигуни (СД) – це оптимальне рішення для обладнання з постійною швидкістю роботи: генераторів постійного струму, компресорів, насосів тощо.

Технічні характеристики СД різних моделей відрізняються. Швидкість обертання коливається в діапазоні від 125 до 1000 об/хв, потужність може досягати 10 тис. кВт.

У конструкції приводів передбачена короткозамкнена обмотка на роторі. Її наявність дозволяє здійснювати асинхронний пуск двигуна. До переваг обладнання даного типу відносяться високий ККД і невеликі габарити. Експлуатація СД дозволяє скоротити втрати електрики в мережі до мінімуму.

Також до СД можна віднести крокові двигуни. Кроковий двигун не є окремим класом двигуна. За своєю конструкцією він є СД із постійними магнітами (СДПМ) або синхронним реактивним двигуном (СРД) чи гібридним СРД (СРД-ПМ).

Асинхронні електродвигуни (АД) змінного струму набули найбільшого поширення у промисловому виробництві. Особливістю даних приводів є більш висока частота обертання магнітного поля в порівнянні зі швидкістю обертання ротора.

У сучасних двигунах для виготовлення ротора використовується алюміній. Легка

вага цього матеріалу дозволяє зменшити масу електродвигуна, скоротити собівартість його виробництва. ККД асинхронного двигуна падає майже удвічі при експлуатації в режимі низьких навантажень (до 30–50 % від номінального показника). Ще один недолік таких електроприводів полягає в тому, що параметри пускового струму майже утричі перевищують робочі показники. Для зменшення пускового струму АД використовуються частотні перетворювачі або пристрої плавного пуску.

Отже до переваг АД змінного струму можна віднести:

- масо-габаритні показники;
- низьку вартість виробництва;
- надійну і практичну конструкцію;
- непримхливий в експлуатації;
- просту схему управління;
- високий ККД;
- високий коефіцієнт потужності.

Недоліки АД змінного струму:

- неможливий контроль швидкості без втрат потужності;
- якщо збільшується навантаження – зменшується момент;
- відносно невеликий пусковий момент;
- великий пусковий струм.

Окремо від приведеної класифікації слід зазначити вентильні електродвигуни. Група вентильних електродвигунів включає в себе приводи, в яких регулювання режиму експлуатації здійснюється за допомогою вентильних перетворювачів. Вентильний двигун може бути визначений як електричний двигун, який має датчик положення ротора, що керує напівпровідниковим перетворювачем.

Вентильний електродвигун постійного струму – це електродвигун постійного струму, в якому вентильним комутуючим пристроєм є інвертор. Останній керується або за положенням ротора, або за фазою напруги на

обмотці якоря, або за положенням магнітного поля [20].

До переваг цього обладнання відносяться:

- високий експлуатаційний ресурс;
- простота обслуговування за рахунок безконтактного управління;
- висока перевантажувальна здатність (у п'ять разів перевищує пусковий момент);
- широкий діапазон регулювання частоти обертання, який майже удвічі вище діапазону АД;
- високий ККД за будь-якого навантаження (більше 90 %);
- невеликі габарити.

Приведену класифікацію електродвигунів можна звести до табл. 1, де наочно відображено їх основні особливості [20].

В табл. 1 наведено такі скорочення:

КДПТ – колекторний двигун постійного струму; БДПС – безколекторний двигун постійного струму; ВРД – вентильний реактивний двигун; АДКР – асинхронний двигун із короткозамкненим ротором; АДФР – асинхронний двигун з фазним ротором; СДОЗ – синхронний двигун з обмоткою збудження; СДПМ – синхронний двигун з постійними магнітами; СДПМП – синхронний двигун з поверхневою установкою постійних магнітів; СДВПМ – синхронний двигун із вбудованими постійними магнітами; СРД – синхронний реактивний двигун; ПМ – постійні магніти.

Проведемо порівняння характеристик зовні комутованих електричних двигунів при їх застосуванні як тягових електродвигунів в електричних трансмісіях автотранспортних засобів.

Аналізуючи характеристики, рис. 2 та наведену класифікацію електродвигунів (табл. 1), можна провести експертну оцінку тягових електродвигунів для електричної трансмісії автотранспортних засобів (табл. 2).

Таблиця 1 – Класифікація електродвигунів

Внутрішня комутація			Зовнішня комутація	
з механічною комутацією (колекторний)		з електронною комутацією (вентильний)	АД	СД
змінного струму	постійного струму	змінного струму	постійного струму	
Універсальний; Репульсивний	КДПТ із різними обмотками збудження; КДПТ з ПМ	БДПС; ВРД; СРД із ротором з явними полюсами	ДКР; ДФР	СДОЗ; СДПМ; СДВПМ; СДПМП; Гібридний СРД; СРД-ПМ; СРД-ПМ реактивно-гістерезисний; Кроковий
Проста електроніка	Випрямлячі	Більш складна електроніка	Складна електроніка	

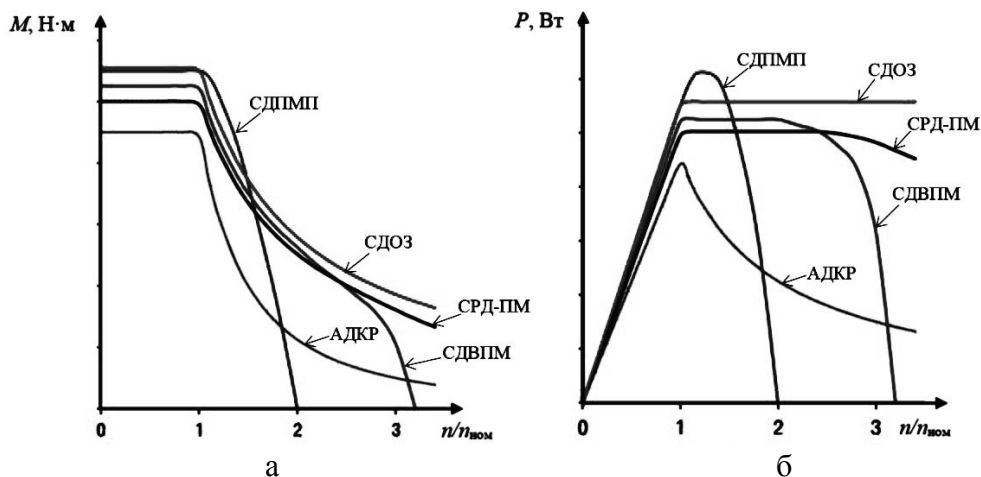


Рис. 2. Характеристики зовні комутованих електродвигунів: а – порівняння механічних характеристик електродвигунів різних типів за обмеженого струму статора; б – залежність потужності від швидкості обертання вала для двигунів різних типів за обмеженого струму статора

Таблиця 2 – Сукупність експертних оцінок

Параметр	АДКР	СДПМП	СДВПМ	СРД-ПМ (гібридний)	СДОЗ
Постійність потужності у всьому діапазоні швидкостей	2	3	2	1	1
Момент до струму статора	2	1	1	1	1
Ефективність (ККД) в усьому робочому діапазоні	2	2	2	1	1
Питома потужність, кВт/год	3	2	1	2	2
Надійність	1	2	3	3	2
Виробництво	1	3	3	3	3
Ціна	1	3	3	3	2
Разом	12	16	15	14	12

При проведенні експертної оцінки вважається: 1 – найкращий показник, 3 – найгірший показник.

Згідно з вище наведеними показниками, якщо враховувати тільки електромеханічні властивості двигунів, гібридний СД, а саме синхронний реактивний електродвигун із вбудованими постійними магнітами є найбільш придатним для застосування в якості тягового електродвигуна в автомобілебудуванні (вибір проводився для концепту автомобілів BMW i3 & BMW i8). Використання реактивного моменту забезпечує високу потужність у верхньому діапазоні швидкостей. Більше того, такий двигун забезпечує дуже високу ефективність (ККД) в широкому робочому діапазоні [21].

При проведенні комплексної оцінки з урахуванням не тільки електромеханічних показників, а й економічних, найбільш привабливим є АД з короткозамкненим ротором. В першу чергу та найбільш вагомими показниками тут є надійність та місцеве виробни-

цтво. Отже, маємо надійний силовий агрегат, який вже серійно виробляється на території України, має найменшу ціну (в декілька разів у порівнянні із закордонними аналогами [22, 23]) і може бути використаний як тяговий електродвигун для електричної трансмісії електробуса.

Далі проведемо розрахунок основних характеристик тягового АД для електричної трансмісії міського електробуса.

Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна

Розрахунок основних характеристик тягового АД для електричної трансмісії міського електробуса складається з побудови його природної механічної характеристики в режимі двигуна і генераторних режимах роботи. Отже вибираємо АД типу: АИР 225М2 (ІМ 1081) 55 кВт, 3000 об/хв. Для обраного за класом та призначенням автобуса (клас – малий; призначення – міський) відповідно до досвіду побудови вже існуючих конструкцій

електробусів, достатньо застосувати два вибраних електродвигуни (по одному на кожну колісну вісь) [24]. Технічні характеристики даного двигуна приведені у табл. 3. Крім то-

го, використовуються такі заводські розрахункові дані двигуна: $R_1 = 0,0549$ Ом; $R_2 = 0,0332$ Ом; $X_1 = 0,16$ Ом; $X_2 = 0,0704$ Ом.

Таблиця 3 – Основні технічні характеристики АИР 225М2 (ІМ 1081)

Параметр	Показник
Потужність, P	55 кВт
Частота обертання ротора, n	3000 об/хв
Напруга мережі, U	380В
Номінальний струм, I	103 А
Частота мережі, f	50 Гц
Число полюсів, p	2
Ступінь захисту	IP55
Ізоляція класу нагрівостійкості	F(155°C)
Кліматичне виконання	У2
Режим роботи	S1 (тривалий)
Спосіб монтажу	ІМ 1081(лапа)
Вага	325 кг

Для проведення розрахунків використаємо П-подібну схему заміщення АД рис. 3 [17].

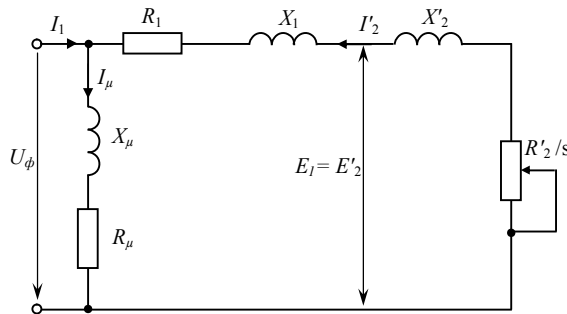


Рис. 3. Схема заміщення АД

На рис. 3 прийняті такі позначення. U_1 , U_ϕ – діючі значення лінійної й фазної напруги мережі; I_1 , I_m , I_2 – фазні струми статора, намагнічування і приведений струм ротора; X_1 , X_2 – індуктивні опори від потоків розсіювання фази обмотки статора і приведеної фази ротора; X_m – індуктивний опір контуру намагнічування; R_m – активний опір контуру намагнічування; R_c , $R_{1д}$, $R_1 = R_c + R_{1д}$ – активні фазні опори обмотки статора, додаткового резистора і сумарний опір статора; R'_p , $R'_{2д}$, $R'_2 = R'_p + R'_{2д}$ – активні приведені до обмотки статора фазні опори обмотки ротора, додаткового резистора і сумарний опір ротора; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – ковзання АД; $\omega_0 = 2\pi f / p$ – кутова швидкість магнітного поля АД (швидкість ідеального холостого ходу); f_1 – частота живильної напруги; p – число пар полюсів АД.

Відповідно до приведеної схеми заміщення можна отримати вираз для вторинного струму

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

Момент асинхронного двигуна може бути визначений з рівняння втрат, звідки

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}. \quad (2)$$

Підставляючи значення струму I'_2 в (2)

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] s}. \quad (3)$$

Крива моменту $M = f(s)$ має два максимуми: один – в генераторному режимі, інший – в режимі двигуна.

Прирівнюючи, визначаємо значення критичного ковзання $s_{кр}$, за якого двигун розвиває максимальний (критичний) момент

$$s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (4)$$

Підставляючи значення $s_{кр}$ в (3), знаходимо вираз для максимального моменту

$$M_{кр} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]} \quad (5)$$

Знак «+» в рівняннях (4) і (5) відноситься до режиму двигуна (або гальмування проти-вмикання), знак «-» – до генераторного ре-жиму роботи паралельно з мережею (при $\omega > \omega_0$).

Якщо рівняння (3) розділити на (5) і про-вести відповідні перетворення, то можна отримати наступне рівняння:

$$M = \frac{2M_{кр}(1 + as_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2as_{кр}} \quad (6)$$

де $M_{кр}$ – максимальний момент двигуна; $s_{кр}$ – критичне ковзання, відповідне максимальному моменту; $a = R_1 / R'_2$.

Отже, коефіцієнт трансформації від ста-тора до ротора визначається [17]

$$k = \frac{E_1}{E_{2к}} = \frac{0,95 \cdot U}{E_{2к}} \quad (7)$$

$$k = \frac{0,95 \cdot U}{E_{2к}} = \frac{0,95 \cdot 380}{253} = 1,427.$$

Приведені опори визначаються

$$\begin{cases} R'_2 = R_2 \cdot k^2; \\ X'_2 = X_2 \cdot k^2; \\ X_{\kappa} = X_1 + X'_2, \end{cases} \quad (8)$$

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2 = 0,0332 \cdot 1,427^2 = 0,0676 \text{ Ом};$$

$$X'_2 = X_2 \cdot k^2 = 0,0704 \cdot 1,427^2 = 0,1433 \text{ Ом};$$

$$X_{\kappa} = X_1 + X'_2 = 0,704 + 0,1433 = 0,3033 \text{ Ом}.$$

Значення критичного ковзання за форму-лою (4)

$$s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} =$$

$$= \pm \frac{0,676}{\sqrt{0,0549^2 + (0,704 + 0,1433)^2}} = \pm 0,2193.$$

Кутова швидкість визначається, рад/с

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (9)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314.$$

Максимальний момент у режимі двигуна визначаємо за виразом (5), кН·м

$$M_{кр} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \left[0,0549 + \sqrt{0,0549^2 + (0,704 + 0,1433)^2} \right]} =$$

$$= 3,1833.$$

Максимальний момент у генераторному режимі визначаємо, кН·м

$$M_{кр(Г)} = M_{кр} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}} \quad (10)$$

$$M_{кр(Г)} = 3,1833 \frac{0,0549 + \sqrt{0,0549^2 + 0,3033^2}}{0,0549 - \sqrt{0,0549^2 + 0,3033^2}} =$$

$$= -4,5628.$$

За виразом (6) розраховуємо механічну характеристику АД (залежність моменту від ковзання).

Результати розрахунків зведені в табл. 4.

За даними табл. 4 побудовано природну характеристику АД (рис. 4).

Залежність моменту навантаження для електричної трансмісії міського електробуса є досить складною та залежить від багатьох чинників, основні з яких описані в [25]. Загалом характер такої залежності під час руху електробуса на його крейсерській швидкості визначає сила опору повітря.

Отже, для приблизного визначення харак-теру механічної характеристики електричної трансмісії задаємося залежністю для момен-ту навантаження, як для механізмів, що пра-цюють з вентиляторним навантаженням

$$M = M_0 + \Delta M \quad (11)$$

де M_0 – момент холостого ходу; $\Delta M = c\omega^2$ – момент, який створює робочий орган механізму при виконанні корисної роботи (c – постійний коефіцієнт, ω – кутова швидкість вала механізму).

Метою дійсних розрахунків є визначення характеру механічної характеристики АД у складі електричної трансмісії електробуса. Отже, прийmemo постійний коефіцієнт $c = 0,02$. Моменту холостого ходу відповідає розрахована природна механічна характеристика АД (рис. 4).

Визначаємо кутову швидкість АД залежно від ковзання s

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (12)$$

Розрахунок кутової швидкості АД за виразом (12) наведено у табл. 5.

За отриманими даними (табл. 4, табл. 5 і рис. 4) проведемо побудову механічної характеристики для електричної трансмісії міського електробуса в режимі двигуна і в генераторному режимі (рис. 5).

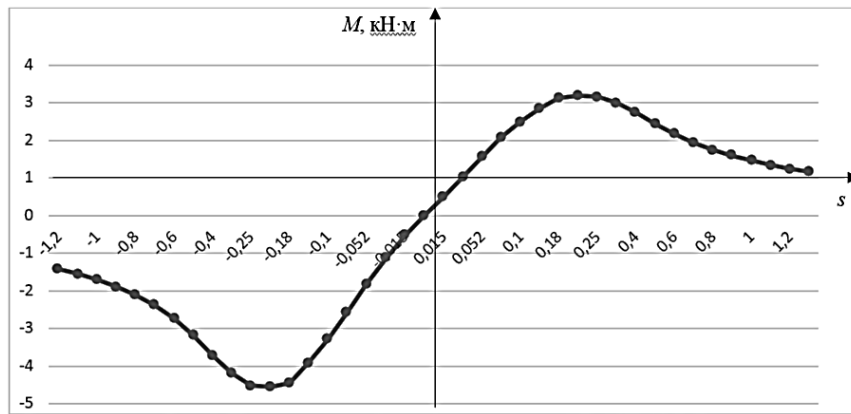


Рис. 4. Природна механічна характеристика АД, АИР 225М2

Таблиця 4 – Результати розрахунків механічної характеристики АД

M , кН·м	s	M , кН·м	s
0,49851776	0,015	-1,41549329	-1,2
1,01968	0,032	-1,54348824	-1,1
1,55905	0,052	-1,69565731	-1
2,07057	0,075	-1,87902401	-0,9
2,49568	0,1	-2,10325831	-0,8
2,84531	0,13	-2,38166296	-0,7
3,1311	0,18	-2,73196	-0,6
3,18056	0,21	-3,1748	-0,5
3,16004	0,25	-3,72017	-0,4
2,99916	0,32	-4,1939	-0,32
2,74883	0,4	-4,5154	-0,25
2,4392	0,5	-4,557392	-0,21
2,16909	0,6	-4,4565	-0,18
1,94227	0,7	-3,8991	-0,13
1,75303	0,8	-3,2711	-0,1
1,59444	0,9	-2,5775	-0,075
1,46043	1	-1,8301	-0,052
1,34613	1,1	-1,129	-0,032
1,24773	1,2	-0,5233	-0,015
1,16228	1,3	0	0

Таблиця 5 – Залежність кутової швидкості АД від ковзання

ω , рад/с	s	ω , рад/с	s
309,29	0,015	-62,8	-1,2
303,952	0,032	-31,4	-1,1
297,672	0,052	0	-1
290,45	0,075	31,4	-0,9
282,6	0,1	62,8	-0,8
273,18	0,13	94,2	-0,7
257,48	0,18	125,6	-0,6
248,06	0,21	157	-0,5
235,5	0,25	188,4	-0,4
213,52	0,32	213,52	-0,32
188,4	0,4	235,5	-0,25
157	0,5	248,06	-0,21
125,6	0,6	257,48	-0,18
94,2	0,7	273,18	-0,13
62,8	0,8	282,6	-0,1
31,4	0,9	290,45	-0,075
0	1	297,672	-0,052
-31,4	1,1	303,952	-0,032
-62,8	1,2	309,29	-0,015
-94,2	1,3	314	0

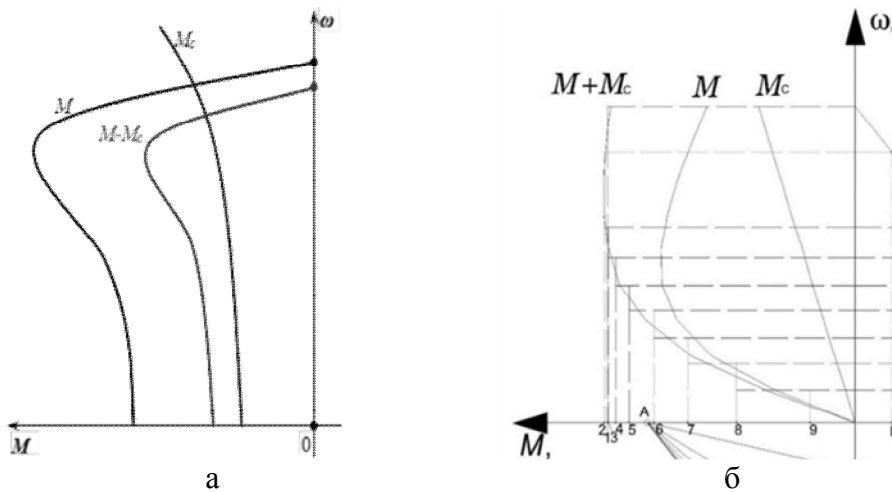


Рис. 5. Механічна характеристика АД, АИР 225М2 при роботі в електричній трансмісії міського електробуса: а – в режимі двигуна; б – в генераторному режимі

Висновки

Проведено аналіз електродвигунів з позиції їх застосування в тяговому електроприводі автотранспортних засобів з визначенням найбільш перспективного для виробництва електричної трансмісії в Україні.

Подано класифікацію електродвигунів з визначенням їх основних переваг та недоліків при використанні в електричній трансмісії автотранспортних засобів. Проведено комплексну експертну оцінку тягових електродвигунів для електричної трансмісії. В ході такої оцінки враховувалися не тільки електромеханічні показники електродвигунів, а ще й економічні фактори. Найбільш привабливим для зазначених цілей є АД з короткозамкненим ротором. Найбільш вагомими показниками тут є надійність та місцеве виробництво.

На підставі проведеної експертної оцінки вибрано в якості тягового двигуна – двигун АИР 225М2. Проведено розрахунок основних характеристик вибраного АД для електричної трансмісії електробуса міського призначення. Визначено його основні електромеханічні показники та побудовано його природну характеристику.

Проведено побудову механічної характеристики при роботі в електричній трансмісії з асинхронним двигуном АИР 225М2 в режимі двигуна і в генераторному режимі з вентиляторним моментом навантаження.

Література

1. Гнатюк А. В., Аргун І. В., Ульянець О. А. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*: електронне наукове спеціалі-

зованне видання. Харків: ХНАДУ. 2017. № 11. С. 24–28. http://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_SIS/AE17_1/1.4.pdf

2. Vehicle Emission Standards. 2016. URL: <https://infrastructure.gov.au/vehicles/environment/emission/index.aspx> (дата звернення 3.09.2018).

3. Wang G. Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts. *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196. № 1. С. 530–540.

4. Чернышев А. Д. Сравнительный анализ различных типов электрических двигателей в составе тягового привода электрической трансмиссии. *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2016. Том 3. №3. С. 47–54.

5. Радионов А. А., Чернышев А. Д. Формирование технических требований к автомобильной трансмиссии. *Наука и производство Урала*. 2015. №11. С. 85–89.

6. Слепцов М. А., Долаберидзе Г. П., Прокопович А. В., Савинова Т. И., Тулупов В. Д. Основы электрического транспорта. Издательский центр «Академия». 2006. 464 с.

7. Dost P., Schael M. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. *Constantinos Sourkounis. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. (Portugal 27-30 Oct. 2014). 2014. P. 1–6.

8. Chuanwei Z., Wang N. Research on asynchronous motor control of electric vehicle. *International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*. (May 2017) 2017. P. 165–169.

9. 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. *10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. (March 2017). 2017. P. 597–600.

10. 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. (May 2013) 2013. P. 1247–1252.
11. 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. № 9 (4). P. 350–360.
12. 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>.
13. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Бикова О.В., Підгора О.В. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень. *Вісник ХНАДУ*. 2016. № 72. С. 29–34.
14. Аргун Щ. В., Гнатов А. В., Ульянец О. А. Екологічний та енергоефективний автомобільний транспорт і його інфраструктура. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2016. № 2 (77). С. 18–27.
15. Hnatov A, Arhun Shch., Ponikarovska S., Ulyanets O. Ultracapacitors electrobus for urban transport. IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018) (Kyiv 24 –26 April 2018). 2018. p. 539–543.
16. Выбор электродвигателя по типу, мощности и другим параметрам. (2003). URL: <https://tehprivod.ru/poleznaya-informatsiya/vybor-elektrodvigatelya/> (дата звернення: 19.08.2018).
17. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник, ред. В. І. Мілих. Харків: ФОП Панов А.М. 2017. 452 с.
18. Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Ретроспектива основних етапів розвитку електромобілів. Частина 2. Харків: *Вісник ХНАДУ*. 2017. № 78. С. 116–124.
19. Гнатов, А. В., Аргун Щ. В. Ретроспектива основних етапів розвитку електромобілів. Частина 1. Харків: *Вісник ХНАДУ*. 2017. № 77. С. 68–74.
20. Электрический двигатель. 2012. URL: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor> (дата звернення: 20.08.2018).
21. Merwerth J. The hybrid-synchronous machine of the new BMW i3 & i8 challenges with electric traction drives for vehicles. BMW Group. Workshop University Lund: Lund. 2014.
22. Waide P., Conrad U. Brunner Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. *International Energy Agency Working Paper, Energy Efficiency Series*. Paris. 2011.
23. ABB Electric Motors. 2018. URL: <https://ventilator.ua/en/category/elektrodvigateli-abb/> (дата звернення: 20.08.2018).
24. Lajunen A. Powertrain design alternatives for electric city bus. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. (October 2012) P. 1112–1117. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422622, 2012.
25. Суб'єктивний взгляд на доступний сучасний електромобіль. 2018. URL: <http://dig.by/book/export/html/129> (дата звернення: 20.08.2018).

References

1. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Ulianets O. A. (2017). Elektromobili – maibutnie, yake vzhe nastalo [Electric cars - the future that has already come]. *Avtomobil y elektronika. Sovremennye tekhnolohyy: elektronnoe nauchnoe spetsyalyzovannoe yzdanye. Kharkiv: KhNADU*, 11, 24–28 [in Ukrainian].
2. Vehicle Emission Standards. Retrived from: <https://infrastructure.gov.au/vehicles/environment/emission/index.aspx> (accessed 03.09.2018).
3. Wang G. (2011). Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts. *Journal of Power Sources*. 196(1), 530–540.
4. Chernyshev A. D. (2016). Srvnitel'nyy analiz razlichnyh tipov elektricheskikh dvigateley v sostave tyagovogo privoda elektricheskoy transmissii [Comparative analysis of various types of electric motors in the composition of the traction drive electric transmission]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 3(3), 47–54 [in Russian].
5. Radionov A. A., Chernyshev A. D. (2015). Formirovanie tehniceskikh trebovaniy k avtomobil'noy transmissii [Formation of technical requirements for automotive transmission]. *Nauka i proizvodstvo Urala*. 11, 85–89 [in Russian].
6. Slepcev M. A., Dolaberidze G. P., Prokopovich A. V., Savinova T. I., Tulupov V. D. (2006). Osnovy elektricheskogo transporta [Basics of electric transport]. Izdatel'skiy centr «Akademiya» [in Russian].
7. Dost P., Schael M. (2014). Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. Constantinos Sourkounis. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). (Portugal 27-30 Oct. 2014), 1–6.
8. Chuanwei Z., Wang N. (2017). Research on asynchronous motor control of electric vehicle. International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC). (May 2017), 165–169.
9. 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. 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). (March 2017), 597–600.

10. 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. (May 2013), 1247–1252.
11. 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.
12. 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>.
13. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Bykova O.V., Pidhora O.V. (2016). Elektrobuss na superkondensatorakh dlia miskyykh perevezhen. [Electric bus on supercapacitors for city traffic]. *Visnyk KhNADU*, 72, 29–34 [in Ukrainian].
14. Arhun Shch. V., Hnatov A. V., Ulianets O. A. (2016). Ekologichnyi ta enerhoefektyvnyi avtomobilnyi transporti yoho infrastruktura [An environmentally friendly and energy efficient automobile transport is its infrastructure] *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, 2 (77), 18–27 [in Ukrainian].
15. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S., Ulianets O. (2018). Ultracapacitors electrobus for urban transport. IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018) (Kyiv 24 –26 April 2018), 539–543.
16. Vyor elektrodvigatelya po tipu, moschnosti i drugim parametram [Choosing an electric motor by type, power and other parameters]. Retrieved from: <https://tehprivod.ru/poleznaya-informatsiya/vybor-elektrodvigatelya/> (accessed: 19.08.2018) [in Russian].
17. Ostashevskiy M. O., Yurieva O. Yu. (2017). Elektrichni mashyny i transformatory [Electric machines and transformers]. Navch. posibnyk, red. V. I. Milykh. Kharkiv: FOP Panov A.M. [in Ukrainian].
18. Hnatov A. V., Arhun Shch. V. (2017). Retrospektyva osnovnykh etapiv rozvytku elektromobiliv. Chastyna 2 [Retrospective of the main stages of the development of electric vehicles. Part 2] *Kharkiv: Visnyk KhNADU*, 78, 116–124 [in Ukrainian].
19. Hnatov A. V., Arhun Shch. V. (2017). Retrospektyva osnovnykh etapiv rozvytku elektromobiliv. Chastyna 1 [Retrospective of the main stages of the development of electric vehicles. Part 1] *Kharkiv: Visnyk KhNADU*, 77, 68–74 [in Ukrainian].
20. Elektricheskiy dvigatel'. [Electrical engine]. Retrieved from: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor> (accessed: 20.08.2018) [in Russian].
21. Merwerth J. (2014). The hybrid-synchronous machine of the new BMW i3 & i8 challenges with electric traction drives for vehicles. *BMW Group. Workshop University Lund: Lund*.
22. Waide P., Conrad U. (2011). Brunner Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. *International Energy Agency Working Paper, Energy Efficiency Series. Paris*.
23. ABB Electric Motors. Retrieved from: <https://ventilator.ua/en/category/elektrodvigateli-abb/> (accessed: 20.08.2018).
24. Lajunen A. (2012). Powertrain design alternatives for electric city bus. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. (October 2012), 1112–1117. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422622, 2012.
25. Sub'ektivnyy vzglyad na dostupnyy sovremennyy elektromobil'. [Subjective view of the affordable modern electric car]. Retrieved from: <http://dig.by/book/export/html/129> (accessed: 20.08.2018) [in Russian].

Аргун Щасяна Валіковна¹, к.т.н., доц. кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 099-378-04-51, e-mail: shasyana@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Calculating the main characteristics of the traction induction motor for electric transmission of urban electric bus

Abstract. Problem. Motor vehicles built on the basis of an electric transmission have been gaining popularity recently. The most important factors here are environmental and economic ones. For large cities these two factors are closely connected and form the requirements for modern vehicles. **Goal.** The goal is conducting analysis of electric motors in the context of their application in a traction electric drive of vehicles with the determination of the most promising one for manufacturing electric transmissions in Ukraine; calculation of the main characteristics of the traction induction motor for electric transmission of urban electric bus. **Methodology.** The methods of theoretical foundations of electrical engineering were used in calculating electric circuits of alternating current. Also the classical methods of calculating electric cars and the theory of electric drive were used in calculating the basic parameters of a traction motor for an electric transmission. **Results.** Based on the expert assessment, the AIR 225M2 traction motor has been selected. The calculation of the main parameters of the selected induction motor for the electric transmission of the urban electric bus has been carried out. Its main electrical and mechanical parameters have been determined and its natural characteristic has been constructed. Mechanical characteristic was built when operating in an electric transmission with an induction motor AIR 225M2 in

the mode of the engine and in the generator mode with the fan load torque. **Originality.** The complex expert estimation of traction electric motors for electric transmission has been carried out. During this assessment, not only the electromechanical indices of electric motors, but also economic factors were taken into account. **Practical value.** The results of the conducted studies allow conducting a comprehensive expert evaluation of electric motors for an electric transmission in practice. By setting the load parameters for the traction drive it is possible to determine its mechanical characteristics, both in the motor mode and in the generator mode.

Key words: electric transmission, electric motor, traction electric drive, asynchronous motor, electric bus, electric vehicle, motor vehicles.

Shchasiana Arhun¹, Ph.D., Assoc. Prof.,
tel. +38 099-378-04-51,
e-mail: shasyana@gmail.com

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

Расчет основных характеристик тягового асинхронного двигателя для электрической трансмиссии городского электробуса

Аннотация. Проведен анализ электродвигателей с позиции их применения в тяговом электроприводе автотранспортных средств с определением наиболее перспективного для производства электрической трансмиссии в Украине. Проведена комплексная экспертная оценка тяговых электродвигателей для электрической трансмиссии. Выполнен расчет основных характеристик тягового асинхронного двигателя для электропривода электробуса городского назначения.

Ключевые слова: электрическая трансмиссия, электродвигатель, тяговый электропривод, асинхронный двигатель, электробус, электромото-
биль, автотранспортные средства.

Аргун Щасяна Валиковна¹, к.т.н., доц. каф. автомобильной электроники,
тел. +38 099-378-04-51,
e-mail: shasyana@gmail.com

¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина, Харьков, 61002, ул. Ярослава Мудрого, 25.
