

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРОЛЕЙБУСА

Виконано порівняльне дослідження динамічних та енергетичних характеристик тягового електроприводу тролейбуса при використанні частотного і векторних алгоритмів керування моментом асинхронного електропривода шляхом математичного моделювання.

Вступ

На сьогоднішній день широке застосування в якості привідних двигунів, що використовуються на міському електротранспорті, знайшли асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Це пов'язано, в першу чергу, з їх високою надійністю, невисокою ціною та простотою обслуговування, а також з розвитком силової електроніки, що дозволяє створювати надійні перетворювачі, здатні реалізувати алгоритми керування практично будь-якої складності. У зв'язку з цим актуальним є питання вибору закону керування привідним двигуном транспортного засобу на електричній тязі, який забезпечив би високі показники якості керування електромеханічними координатами з підвищеною енергоефективністю електромеханічного перетворення енергії.

Метою роботи є проведення порівняльного дослідження алгоритмів керування моментом асинхронного тягового електропривода тролейбуса ElectroLAZ-20 [1].

Алгоритми керування

Особливістю роботи транспортних засобів є те, що більшу частину технологічного циклу складає режим руху з усталеною швидкістю. Момент, який розвиває привідний двигун, в такому режимі складає 15...25 % від номінального значення. Саме тому використання енергоефективних алгоритмів керування, що базуються на регулюванні магнітного потоку, може дати суттєвий економічний ефект.

Як базовий обрано стандартний алгоритм непрямого векторного керування з орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора [2], що базується на стандартній математичній моделі АД [3]. Цей алгоритм забезпечує асимптотичну орієнтацію по вектору потокозчеплення ротора, а також гарантує асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії моменту. Для роботи алгоритму необхідною умовою є вимірювання вихідних змінних АД, а саме струмів статора і кутової швидкості ротора.

Для порівняння обрано алгоритм векторного керування моментом АД на основі концепції динамічної лінеаризації зворотним зв'язком по вимірюваному виходу в умовах прямого (що базується на спостережачі) полеорієнтування [3]. Цей алгоритм забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту АД зі забезпеченням максимізації співвідношення момент—струм статора двигуна, що дозволяє підвищити ефективність електромеханічного перетворення енергії.

Третім алгоритмом є частотне керування моментом асинхронного двигуна [4]. Показники якості керування цього алгоритму дещо гірші ніж у двох попередніх. Перевагою частотного керування є його простота та відсутність потреби вимірювання струмів статора.

Результати дослідження

Для проведення дослідження на основі технічних характеристик тролейбуса, поданих у табл. 1, розраховано статичний момент на валу двигуна і момент інерції завантаженого та незавантаженого транспортного засобу.

Повний опір під час руху тролейбуса визначається як сума всіх складових опору руху, які розділяють на основні і додаткові. В основні входять всі сили, що діють на тролейбус на прямій ділянці руху, а саме: внутрішній опір руху тролейбуса (обумовлений тертям спряжених елементів конструкції); опір викликаний взаємодією коліс тролейбуса і дорожнього покриття; опір повітря.

Додатковий опір тролейбус зазнає на спусках, підйомах і поворотах. Для спрощення аналізу припустимо, що опір викликаний взаємодією коліс тролейбуса і дорожнього покриття, а також внутрішній опір руху є постійним і незмінним у часі. Величиною опору повітря знехтуємо. Загальновідомо, що з урахуванням перелічених вище припущень коефіцієнт питомого опору руху для тролейбуса становить $f = 0,02$.

Таблиця 1

Технічні характеристики тролейбуса ЛАЗ Е301А1

Коефіцієнт редукції ведучого мосту i	9,82	Споряджена маса m_1 , кг	12 000
Діаметр коліс D , м	0,9	Повна маса m_2 , кг	19 000
Максимальна ustalена швидкість у разі повного завантаження v , км/год	60	Час розгону при повному завантаженні до швидкості 50 км/год $t_{розг}$, с	22
Максимальне прискорення/уповільнення у разі повного завантаження a_{max} , м/с ²	1,5	Максимальна автономність ходу на рівній ділянці (не завантажений) x_{max} , м	500

Статичний момент на валу привідного двигуна розраховується за формулою

$$M_c = \frac{gmfD}{2i\eta}, \quad (1)$$

де g — прискорення вільного падіння; m — маса тролейбуса; D — діаметр колеса; i — передаточне число редуктора; η — ККД тягової передачі (0,9...0,96).

Підставивши дані із табл. 1 у вираз (1), отримаємо такі значення статичного моменту на валу привідного двигуна для незавантаженого та завантаженого тролейбуса $M_c = 112$ Н·м та $M_c = 178$ Н·м, відповідно.

Момент інерції транспортного засобу, приведений до валу двигуна, розраховується з використанням виразу $J = m(D/2i)^2$ і становить $J = 25,2$ кг·м² та $J = 39,9$ кг·м² для незавантаженого і завантаженого тролейбуса відповідно.

Дослідження проводилось шляхом математичного моделювання з використанням стандартної математичної моделі АД [3]. Під час тестування привідному двигуно тролейбуса, параметри якого подані в табл. 2, необхідно було відпрацювати задану траєкторію моменту для проходження незавантаженим тролейбусом дистанції 200 м зі швидкістю 5 км/год.

Іншим режимом, що досліджувався, було проходження завантаженим транспортним засобом дистанції 1000 м зі швидкістю 23 км/год, близькою до номінальної швидкості привідного двигуна.

Таблиця 2

Параметри асинхронного двигуна ДТА-2У1

Номінальна потужність P_n , кВт	180	Активний опір обмотки статора R_1 , Ом	0,0196
Номінальна напруга U_n , В	407	Активний опір обмотки ротора R_2 , Ом	0,00859
Номінальний фазний струм I_n , А	305	Індуктивність обмотки статора L_1 , Гн	0,006929
Номінальний момент M_n , Нм	950	Індуктивність обмотки ротора L_2 , Гн	0,006927
Номінальна швидкість обертання n_n , об/хв	1477	Індуктивність намагнічувального контуру L_m , Гн	0,006621
Число пар полюсів p_n	2	Момент інерції J , кг·м ²	1,5

На рис. 1 подані результати математичного моделювання першого тесту для трьох алгоритмів керування моментом АД. Для подолання дистанції витрачено $W_1 = 0,182$ кВт·год, $W_2 = 0,154$ кВт·год, $W_3 = 0,183$ кВт·год, де порядковий номер відповідає номеру досліджуваного алгоритму. Порівнюючи ці показники, можна сказати, що алгоритми № 1 і № 3 за енергетичними показниками практично ідентичні, в той час як використання алгоритму № 2 дозволяє зекономити 15 % електричної енергії.

Результати моделювання другого режиму роботи зображені на рис. 2. Для проходження відстані в 1000 м привідним двигуном транспортного засобу було спожито $W_1 = 1,170$ кВт·год, $W_2 = 1,153$ кВт·год, $W_3 = 1,169$ кВт·год. З використанням другого алгоритму роботи економія спожитої енергії становить 2 % порівняно із базовим алгоритмом.

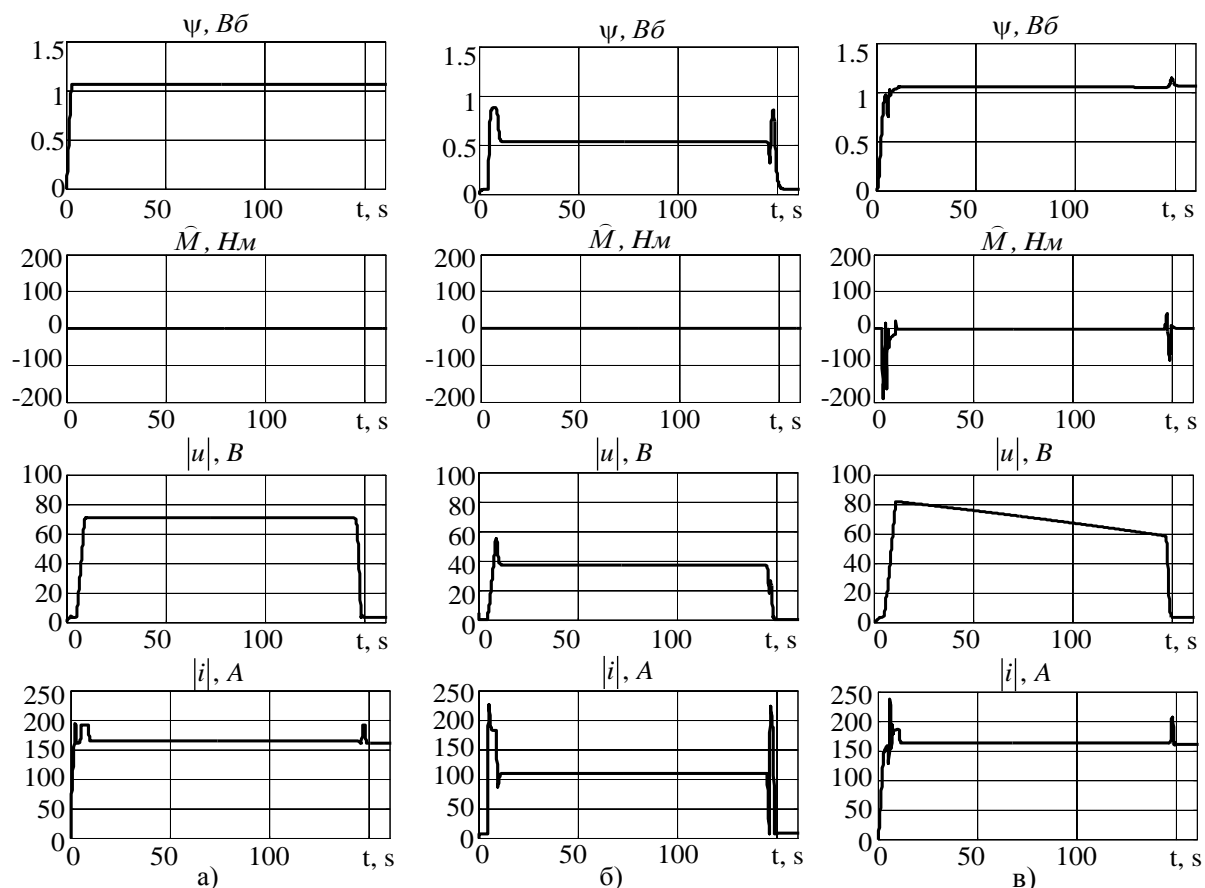


Рис. 1. Результати математичного моделювання першого тесту для алгоритмів керування: а — № 1; б — № 2; в — № 3

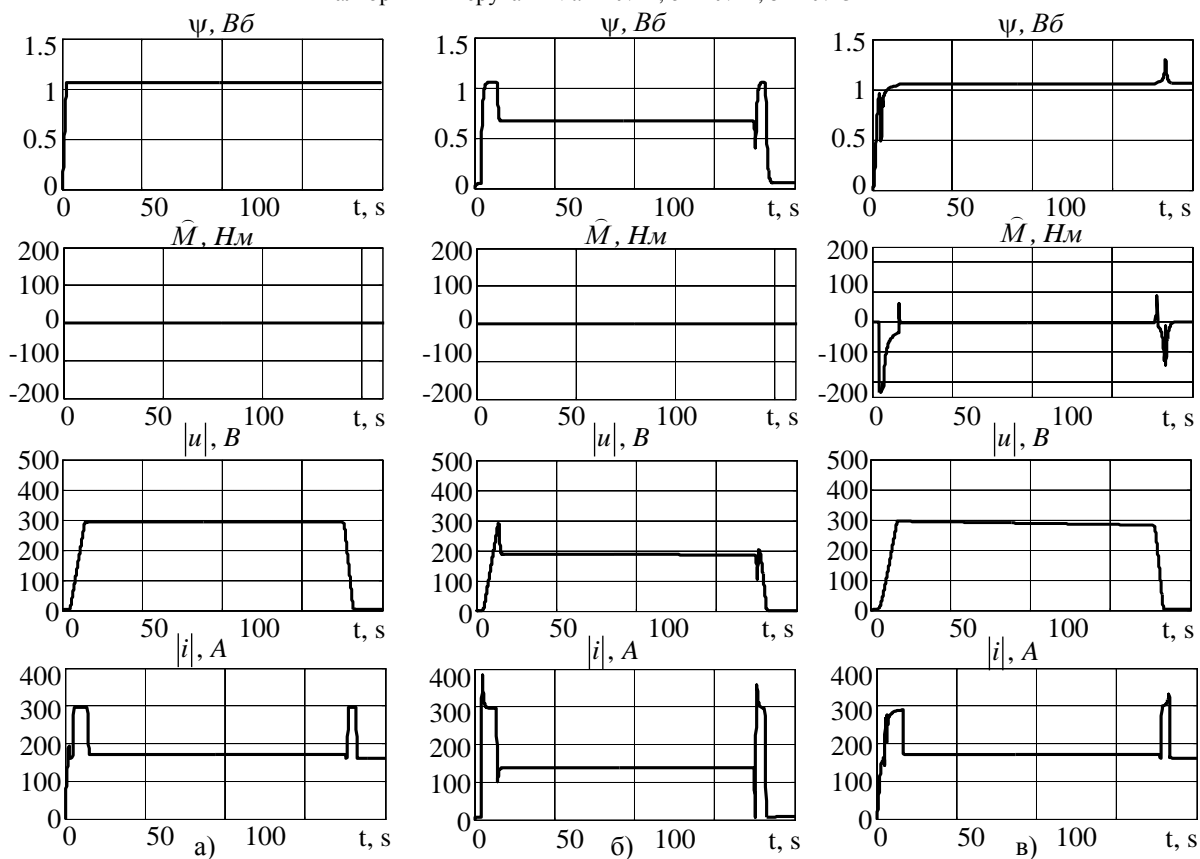


Рис. 2. Результати математичного моделювання другого тесту для алгоритмів керування: а — № 1; б — № 2; в — № 3

Отримані графіки підтверджують, що перших два алгоритми керування забезпечують асимптотичне відпрацювання заданої траєкторії моменту, оскільки помилка відпрацювання \dot{M} прямує до нуля. Під час роботи за алгоритмом № 3 в статичному режимі присутня помилка відпрацювання заданого моменту в розмірі 1 % від завдання, тому для підтримання необхідної швидкості руху транспортного засобу необхідно збільшувати завдання моменту. Значна динамічна похибка вимагає збільшення часу розгону на 50 % для досягнення бажаної швидкості.

Також слід зазначити, що під час роботи за алгоритмом № 2 величина напруги статора $|u| = \sqrt{u_{1a}^2 + u_{1b}^2}$, необхідна для відпрацювання заданого моменту, на 30...40 % менша порівняно із базовим алгоритмом, де u_{1a} , u_{1b} — компоненти вектора напруги статора стандартної двофазної моделі АД [3]. Також під час роботи за цим алгоритмом на 20...30 % зменшується величина струму статора $|i| = \sqrt{i_{1a}^2 + i_{1b}^2}$, де i_{1a} , i_{1b} — компоненти вектора струму статора. Це дозволяє зменшити навантаження на силові ключі інвертора та ефективніше використовувати його можливості. З порівняння графіків потокозчеплення ротора ψ , випливає, що під час роботи за алгоритмами № 1 і № 3 потокозчеплення підтримується на рівні номінального протягом усього інтервалу роботи, в той час як, працюючи за алгоритмом № 2, величина потокозчеплення змінюється відповідно від величини заданого моменту.

Висновки

Як показали результати досліджень, з точки зору енергетичної ефективності найкращим виявився алгоритм векторного керування моментом з максимізацією момент—струм статора. Використання цього алгоритму для керування приводним двигуном тролейбуса в діапазоні швидкостей від нуля до номінальної швидкості двигуна, з величиною навантаження у 12...19 % від номінального значення моменту двигуна, дозволяє отримати економію спожитої електричної енергії в середньому до 2...10 %. Також слід зазначити, що у разі використання другого алгоритму керування для отримання заданої величини моменту треба на 30...40 % менша величина напруги і на 20...30 % менша величина струму статора двигуна, що дозволить ефективніше використовувати можливості силового перетворювача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технические характеристики ElectroLAZ-20 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://laz.ua/ru/prod/5/21/teh_char/. — Название с экрана.
2. Peresada S., Tonielli A. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor / Peresada S. // Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing. — 2000. — Vol. 14. — P. 177—200.
3. Пересада С. М. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток: теория и результаты тестирования / С. М. Пересада, С. С. Дымко // Электротехнические и компьютерные системы. — 2011. — Кременчуг.
4. Пересада С. М. Управление моментом и потоком асинхронного двигателя без использования информации о токах статора / С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, В. С. Бовкунович // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені М. Остроградського. — 2008. — С. 88—92.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Стаття надійшла до редакції 20.10.11

Рекомендована до друку 25.11.11

Пересада Сергій Михайлович — завідувач кафедри, **Димко Сергій Сергійович** — аспірант.

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ