

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 621.333:629.11:519.87:629.021
DOI: 10.15587/2313-8416.2016.79196

РОЗРОБКА ЕНЕРГОМЕХАНІЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЯГИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

© Д. Ю. Зубенко, А. В. Коваленко, О. М. Петренко, В. М. Шавкун, М. Ю. Олехно

В даній статті розглянуто питання розробки енергомеханічної установки для електричної тяги автомобілів. Метою впровадження даної розробки є заміна двигунів внутрішнього згорання на універсальну енергомеханічну установку. Для розглядаємого варіанта енергомеханічної установки побудована модель, що описує процеси, які відбуваються в електричному приводі установки, зняті характеристики під час основних режимів руху. Впровадження даної установки на автомобілях дозволить зменшити кількість шкідливих викидів в атмосферу та суттєво знизити рівень шуму в містах

Ключові слова: автотранспорт, електромобіль, екологічність, електрична тяга, векторне керування, потокозчеплення, асинхронний двигун, електропривод

The problems of creation of electromechanical device for electric vehicle traction are considered in the article. The aim of creation this design are the replacement of the internal combustion engine on electromechanical device. For this electromechanical device are constructed model, which describe processes that occur in the electric drive of electromechanical device. Characteristics of the main modes of motion were recorded. The introduction of electromechanical device will reduce the level of emissions and reduce noise in the cities

Keywords: vehicles, electric car, environmental friendliness, electric traction, vector control, flux linkage, induction motor, electric drive

1. Вступ

Автомобіль ставши масовим засобом транспорту, є одночасно головним джерелом екологічного забруднення навколишнього середовища, що призводить до необхідності прийняття заходів по зниженню токсичності та об'єму викидів в атмосферу відпрацьованих газів.

Збільшення пасажиропотоку, розширення масштабу відкритих розробок корисних копалин, будівництва магістральних трубопроводів і відповідне збільшення вантажопідйомності автомобілів супроводжується труднощами передачі потужності від теплогового двигуна до ведучих коліс.

Вирішення даних завдань потребує використання нового підходу до виконання сучасних автомобільних передач з розглядом питань технічного та екологічного характеру, одним з напрямлень якого є розробка та впровадження систем тягового електричного приводу [1].

Світовий парк автомобілів щорічно збільшується на 5–8 %. В цих умовах все більш актуально стає задача по зменшенню забруднення атмосфери відпрацьованими газами [2].

По документам, що опубліковані у США [3], забруднення повітря від викидів автомобілів становить 60 %, від загальної кількості викидів. Це обумо-

влює пред'явлення до автомобільної промисловості вимог по зниженню рівня виділення токсичних речовин при роботі автомобіля. Вирішення цієї проблеми йде по двом напрямкам:

Перше: передбачає використання нейтралізаторів та фільтрів в системах викиду газів, при цьому силові установки автомобіля майже не змінюються. Але до сьогоднішнього часу майже не вдалося створити прості дешеві, довговічні та ефективно діючі системи, що забезпечують очистку відпрацьованих газів по всім шкідливим компонентам.

Другий напрям полягає в розробці практично нетоксичних транспортних засобів. До таких засобів відносяться електромобілі, у яких нема ДВС, і які до того ж дозволяють знизити шкідливий вплив транспортного шуму до мінімуму [4, 5].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Прогрес у технології виготовлення акумуляторів та висока надійність компонентів силової електроніки разом з ростом цін на енергоносії сприяє збільшенню кількості прибічників електричних транспортних засобів. Більшість передових розробників автомобілів з двигунами внутрішнього згорання представляють свої концепції електромобілів [1, 6].

Для тягових електроприводів електромобілів на даний час можна сформулювати наступні вимоги, які можна поділити на 4 групи:

- функціональні;
- конструктивні;
- експлуатаційні;
- економічні.

Функціональні в свою чергу потребують:

1. Плавне регулювання швидкості;
2. Стабільність автоматичного підтримування швидкості не менше 10 %, що дозволяє енергетично вигідно рухатися в колоні міського руху;
3. Плавне керування моментом при зрушенні з місця;
4. Плавне керування гальмівним моментом при швидкості більше 15 км/год;
5. Автоматичне обмеження максимального моменту та потужності на заданому рівні;
6. Обмеження зарядного струму батареї при рекуперативному гальмуванні;
7. Максимальне використання можливостей рекуперативної енергії при гальмуванні або русі під уклон;
8. Можливість руху в режимі вибігу;
9. Реверс електродвигуна тільки після зупинки автомобіля.

Конструктивні вимоги потребують:

1. Маса тягового електроприводу не повинна бути більше 5–6 % від загальної маси електромобіля
2. Вузли та агрегати електроприводу повинні виконуватися у вигляді конструктивно закінчених модулів;
3. Агрегати електроприводу повинні мати захист від потрапляння сторонніх предметів та води;
4. Повинен бути передбачено захист від помилкових дій водія.

Експлуатаційні вимоги потребують:

1. Працездатність електроприводу повинна забезпечуватися при температурі навколишнього середовища від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
2. Наявність бортової системи діагностування роботи електроприводу.

Економічні вимоги:

1. Вартість електроприводу не більше 15–20 % від вартості електромобіля;
2. Трудомісткість технічного обслуговування не більше 30–40 % від загальної трудомісткості технічного обслуговування електромобіля [5].

Актуальною є проблема передачі обертового моменту від електродвигуна до рушія транспортного засобу. На сьогоднішній день існують наступні основні концепції тягового електроприводу електромобіля: тяговий електропривод, що складається з електродвигуна, зчеплення, коробки передач, та диференціала; тяговий електропривод з електродвигуном постійної потужності з великим діапазоном швидкості, ця конструкція зменшує розмір та масу механічної передачі, спрощує контроль за тягою, так як виключає можливість перемикання передач; тяговий електропривод в якому електродвигун вбудовано в колесо, так званий «мотор-колесний привід» [1, 5].

З точки зору переобладнання автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння на автомобілі з

енергомеханічною установкою, найбільш зручною є концепція електроприводу з електродвигуном, зчепленням, коробкою передач та диференціалом, так як у даному випадку заміни потребує лише двигун внутрішнього згоряння з його системами (паливна система, система охолодження, система змащення), а всі інші частини на автомобілі зберігаються. Також такий тип передачі має просту конструкцію, компактність, низьку вартість виготовлення та досить високий середній ККД (0,85–0,9). Але такий тип передачі має серйозні недоліки. Із-за використання механічної коробки передач, яка має обмежену кількість ступенів тягова характеристика автомобіля буде мати вигляд ступінчатої ламаної лінії (рис. 1).

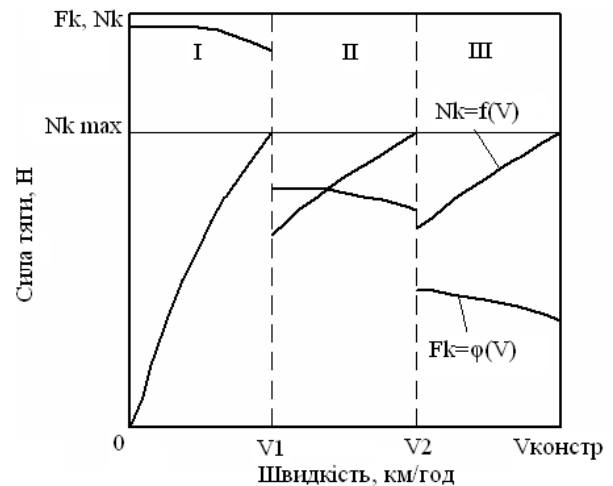


Рис. 1. Тягова характеристика автомобіля з трьохступінчатою коробкою передач:
 N_{kmax} – максимальна сила тяги; V_1 , V_2 – задані швидкості; $V_{констр}$ – конструкційна швидкість

Ступінчатість характеристики не забезпечує повного використання потужності електродвигуна в швидкісних діапазонах кожної ступені швидкості. Іншим недоліком є повна втрата сили тяги при перемиканні ступенів передачі. Тому перемикання швидкостей в процесі руху викликають динамічні переважання деталей передачі.

Окремо стоїть проблема у виборі електродвигуна для енергомеханічної установки електромобіля. На даний час доцільно використовувати асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, так як цей двигун найбільш масовий та дешевий у виробництві і менш вибагливий під час експлуатації (у конструкції відсутні механічні колектори, контактні кільця). При установці асинхронного електродвигуна доцільно використовувати для його керування векторне керування.

Для асинхронного електродвигуна принцип векторного керування можна сформулювати наступним чином: першочергово система диференціальних лінійних рівнянь трьохфазного двигуна перетворюється в систему рівнянь узагальненої двохфазної машини, яка має дві фази (розташовані просторово під 90° відносно один одного) на статорі і дві фази на роторі, також взаємно розташованих. Потім усі вектора, що описуються цією системою, проектується

на довільно обертову ортогональну систему координат, з початком на осі ротора, при цьому найбільша простота рівнянь виходить при обертанні системи координат зі швидкістю поля машини, крім того при такому поданні рівняння вироджуються і стають схожими на рівняння двигуна постійного струму, проектування всіх векторів на напрямок поля машини відбивається в назві цього методу – «орієнтування по полю». Фактично другим етапом формування величин, орієнтованих по полю – це заміна обмоток двохфазної узагальненої машини (дві на статорі і дві на роторі) однією парою взаємно перпендикулярних обмоток, що обертаються синхронно з полем. Крім характеристик, близьких до характеристик двигуна постійного струму, асинхронний двигун з орієнтуванням по полю має гранично допустиму швидкодію при управлінні моментом в режимі підтримання сталості потокозчеплення.

Рівняння електромагнітних процесів, записані щодо струмів статора і потокозчеплення ротора в синхронній ортогональній системі координат, орієнтованої по вектору потокозчеплення ротора мають вигляд [7–9]:

$$\begin{cases} \sigma L_s \frac{dI_d}{dt} = -R_s I_d + U_d + \sigma L_s \omega_\psi I_q - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt}, \\ \sigma L_s \frac{dI_q}{dt} = -R_s I_q + U_q - \sigma L_s \omega_\psi I_d - \frac{L_m}{L_r} \omega_\psi \psi_r, \\ T_r \frac{d\psi_r}{dt} = -\psi_r + L_m I_d, \\ \omega_\psi = \omega_r e + \omega_c k = \omega_r e + \frac{L_m}{T_r} \frac{I_d}{\psi_r}, \\ M = \frac{3}{2} Z_r \frac{L_m}{L_r} \psi_r I_q, \end{cases} \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт розсіювання; L_s , L_m , L_r – індуктивності статора, ротора та взаємна; R_s – активний опір статора; ψ_r – потокозчеплення ротора; ω_ψ – частота обертання вектора потокозчеплення ротора; $\omega_r e$ – електрична частота обертання ротора; I_d , I_q – проекції струмів на вісі d та q ; T_r – постійна часу роторного кола.

При цьому можуть бути два варіанти методу: орієнтування по полю ротора, орієнтування по полю головного потокозчеплення.

При практичній реалізації першого методу необхідно визначити напрямок і кутове положення вектора потокозчеплення ротора двигуна. Ортогональні осі d , q направляють так, що вісь d збігається з напрямком вектора потокозчеплення ротора. Вектор напруги статора двигуна регулюють в осях d , q . Складова напруги по осі d регулює величину струму статора по осі d .

Змінюючи струм статора по осі d слід домагатися необхідного значення амплітуди вектора потокозчеплення ротора. Струм статора по осі q , контрольований напругою по цій осі, визначає момент, що розвивається двигуном. У такому режимі роботи характеристики асинхронного двигуна подібні двигуну

постійного струму, так по осі d формується поле машини (обмотка збудження для двигуна постійного струму, тобто індуктор), а струм по осі q задає момент (якірна обмотка двигуна постійного струму). Управління двигуном за даним методом теоретично забезпечує більшу переважувальну здатність асинхронного двигуна, але при цьому неможливо безпосередньо визначити вектор потокозчеплення ротора.

Даний метод векторного управління був спочатку реалізований в системі «Transvektor» фірми «Сіменс» [10].

Пристрої з керуванням по вектору головного потокозчеплення двигуна, в нашій країні стали іменуватися векторними системами. При використанні пристрою управління по вектору головного потокозчеплення і стабілізації модуля головного потокозчеплення двигуна у всіх режимах роботи виключається надмірне насичення магнітної системи, спрощується структура управління асинхронним двигуном. Для складових вектора головного потокозчеплення (по осях α , β статора) можливе пряме вимірювання, наприклад, за допомогою датчиків Холла, що встановлюються в повітряному зазорі двигуна.

Живлення асинхронного двигуна в режимі векторного управління здійснюється від інвертора, який може забезпечити в будь-який момент часу необхідну амплітуду і кутове положення вектора напруги (або струму) статора. Вимірювання амплітуди та положення вектора потокозчеплення ротора проводиться за допомогою спостерігача (математичний апарат, що дозволяє відновлювати не вимірювальні параметри системи) [11–14].

3. Мета та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету створення моделі, для синтезу універсальної енергомеханічної установки і основних параметрів її елементів в різних режимах руху.

Для досягнення поставлено мети вирішувались наступні задачі:

- створення віртуальної моделі асинхронного електроприводу з векторним керуванням у середовищі MatLab;

- зняття та аналіз характеристик електроприводу під час основних режимів руху електромобіля.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Обладнання, що використовувалось в експерименті

Імітаційна модель електроприводу з системою векторного керування, реалізована в пакеті MATLAB з додатком SIMULINK та SIMPOWERSYSTEM. Вона повторює структуру реального електроприводу.

Звернемось до блочної схеми електроприводу змінного струму (рис. 2). Вкажемо основні елементи електроприводу: асинхронний електродвигун з короткозамкненою обмоткою, інвертор (перетворювач частоти), джерело живлення інвертора та схема векторного керування (регулятор, перетворювачі координат та фаз, розраховувач частоти обертання системи координат та частоти інвертора, моделі структурних елементів двигуна, інформація про які недоступна для прямого вимірювання).

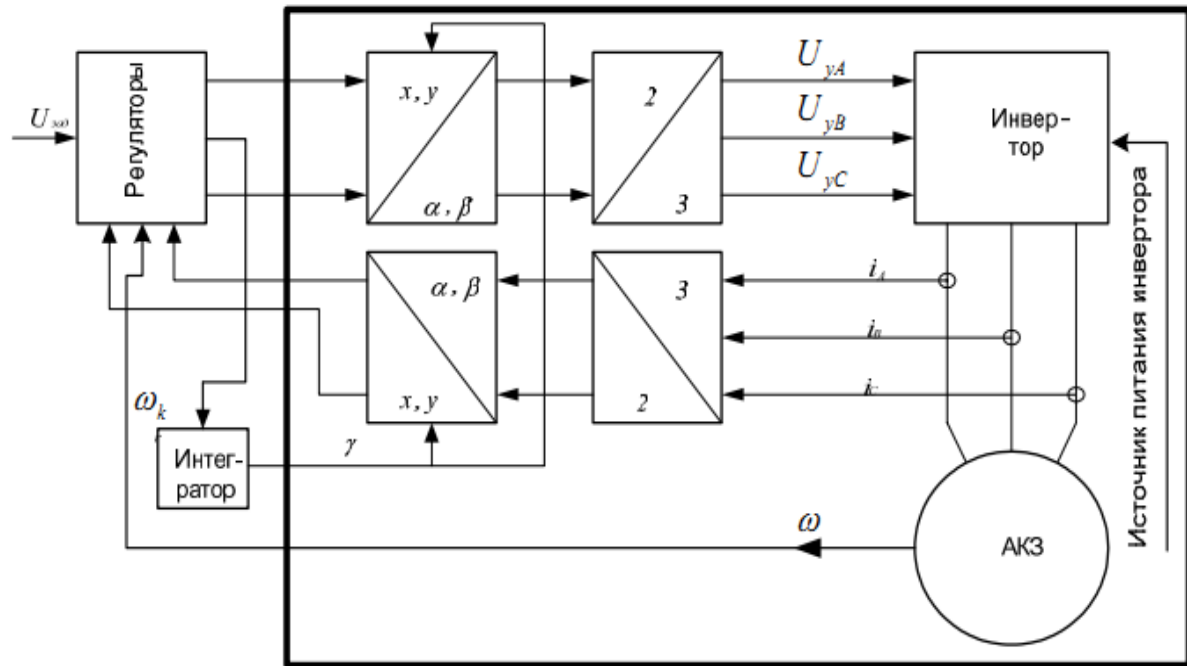


Рис. 2. Блок-схема електроприводу змінного струму

Крім того, структура електроприводу змінного струму має у своєму складі перетворювачі фаз 2/3 та 3/2. Перші перетворюють двохфазні параметри струмів та напруг в трьохфазні, а другі – трьохфазні струми та напруги в двохфазні.

В блоці регуляторів, на основі задаючого сигналу $U_{зад}$ та сигналів з каналу зворотного зв'язку, по змінним станам, виробляються сигнали керування в обертальній системі керування, а також швидкість обертання системи координат (ω_k). Перемикач S знаходиться в середньому положенні, та інтегратор повертає координати зі швидкістю ω_k . Потім вихідні сигнали регуляторів переводяться в систему нерухомих координат, які керують інвертором. Сигнал зворотного зв'язку по струму статора, що виробляється в нерухомій системі координат, перетворюється в обертальну систему і тільки тоді він може бути поданий на регулятори.

4.2. Методика проведення дослідження

На рис. 3 приведена схема моделі електроприводу з векторним керуванням. Усі складові електроприводу представлені. В якості джерела живлення інвертора представлена акумуляторна батарея. Напруга живлення інвертора прийнята 600 В, яке забезпечує елемент VDC. Завдання швидкості забезпечують два блоки Speed та Speed1, установка навантаження здійснюється також двома блоками Torque та Torque1. По два блоки прийнято для розширення можливостей комбінування швидкістю та навантаженням.

Процес моделювання в даній моделі прийнято з фіксованим кроком з використанням дискретної вирішальної програми. Крок моделювання T_s задається в спеціальному вікні, доступ до якого можливо при зверненні до головного меню. У зв'язку з цим форма представлення налаштувань блоків моделі специфічна і у вікні SampleTime необхідно вказувати

символ T_s . Відповідні переналаштування були виконані. Крім того для пришвидшення вирішення використана процедура Accelerator.

Для візуалізації результатів моделювання використовується осцилограф Scope.

Центральним ланцюгом електроприводу є схема векторного керування (рис. 4).

На блок VektorControl (рис. 4) від електродвигуна надходять два сигнали, доступні для вимірювання – трьохфазний струм статора та частота обертання ротора. Інші сигнали вимірює схема векторного керування. Перш за все повинна бути розрахована частота обертання координат ω_k (частота інвертора) та поточний кут повороту координат γ . Цю функцію виконує блок GammaCalculation (рис. 5).

Блок реалізує два рівняння:

$$\omega_u = \omega_k = p\omega_m + k_R + R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}, \tag{2}$$

$$\gamma = \frac{1}{S}(\omega_k), \tag{3}$$

де ω_u – частота струму інвертора; ω_k – частота обертання рухомої системи координат x,y; ω_m – частота обертання ротора; k_R, R_R – параметри двигуна; i_{Sy} – складова струму статора по вісі Y.

З рівняння (3) виходить, що потік ротора $\psi_{Rиом} = \psi_{Rx}$ орієнтовано по вісі x, якщо частота інвертора ω_u відповідає частоті обертання координат ω_k . Крім того з виразу (3) виходить, що завданням на формування необхідної частоти джерела струму є струм статора i_{Sy} і потік ротора ψ_{Rx} .

Так як рівняння записані в абсолютних одиницях, а ω_m діє в схемі в машинних одиницях, то вході ω_m (рис. 5) з'явився підсилювач з коефіцієнтом під-

силення 10. По тій же причині з'явився підсилювач на вході I_r з коефіцієнтом підсилення $1/0,66$. Кут повороту системи координат формує дискретний сигнал, в схемі керування інтегратора передбачено скидання вихідної напруги інтегратора до нульового рівня після досягнення значення 2π .

Далі, регулятори струму в контурах потоку та швидкості виробляють завдання на струм статора двигуна в двох фазах і в обертальній системі координат. Необхідно перевести завдання в нерухому систему та представити сигнал трьохфазним. Це завдання виконує блок xy to ABC conversion (рис. 6).

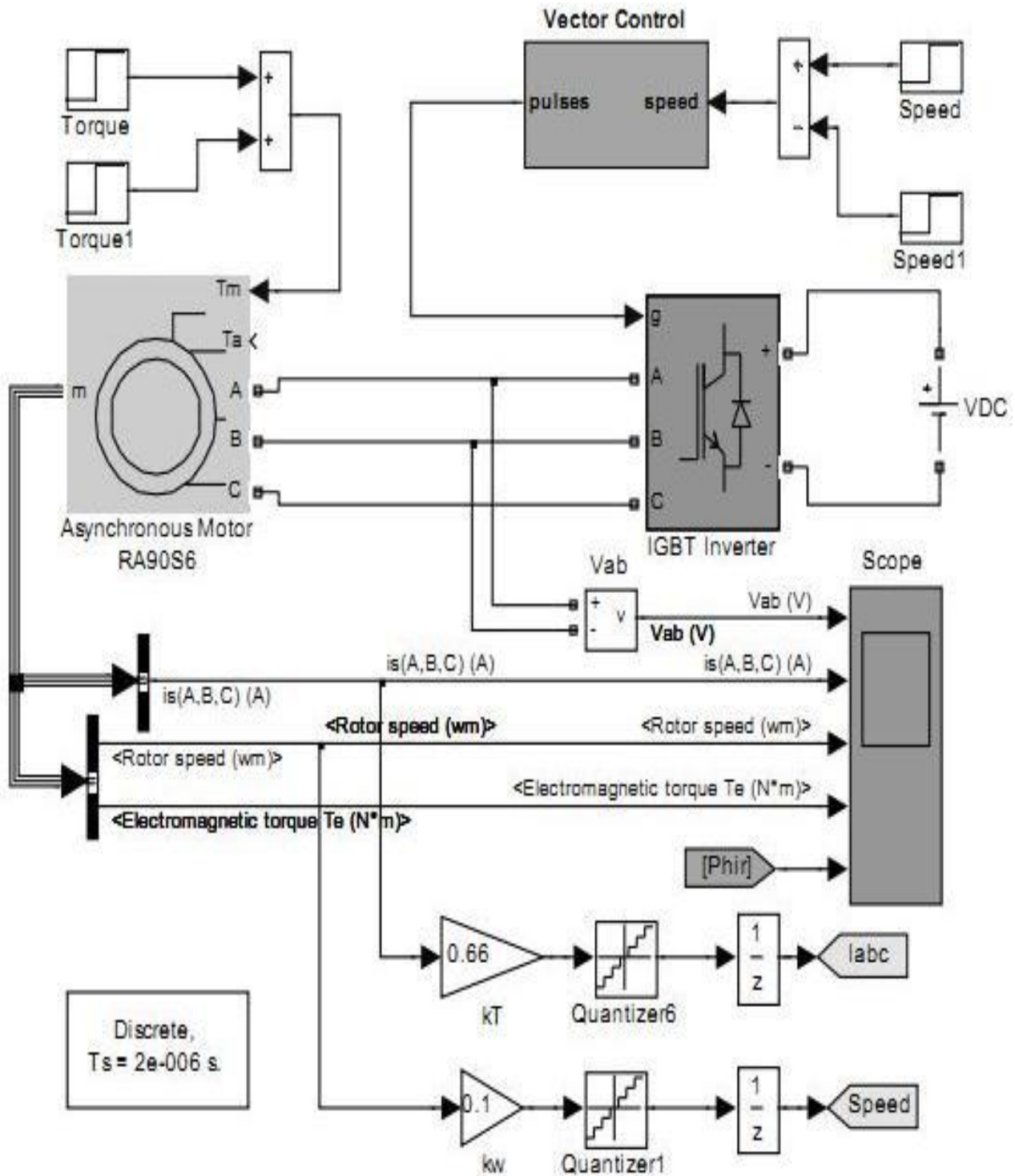


Рис. 3. Модель електропривода з векторним керуванням

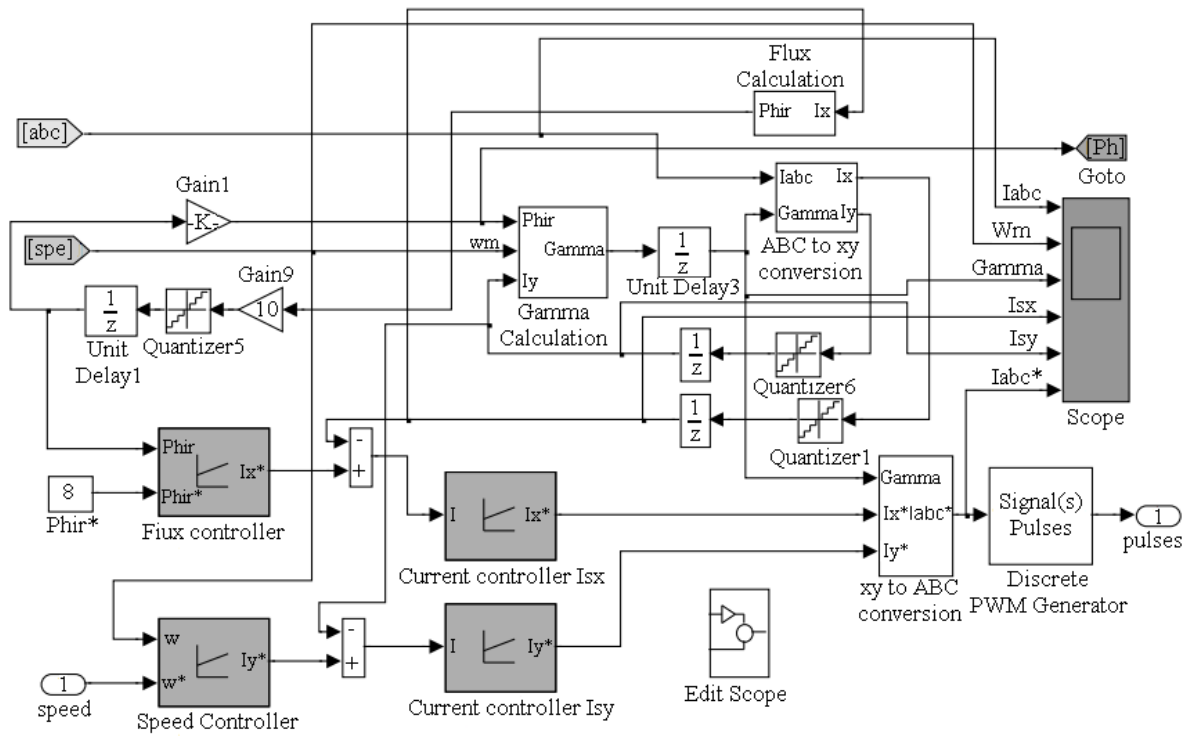


Рис. 4. Модель схеми керування приводом VektorControl

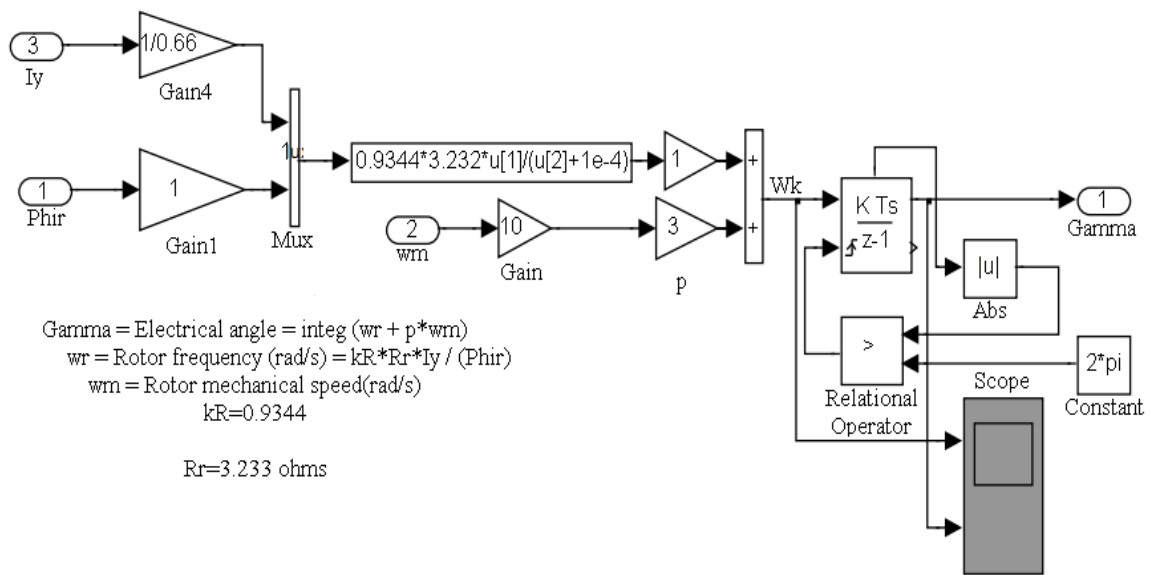


Рис. 5. Схема моделі блока GammaCalculation

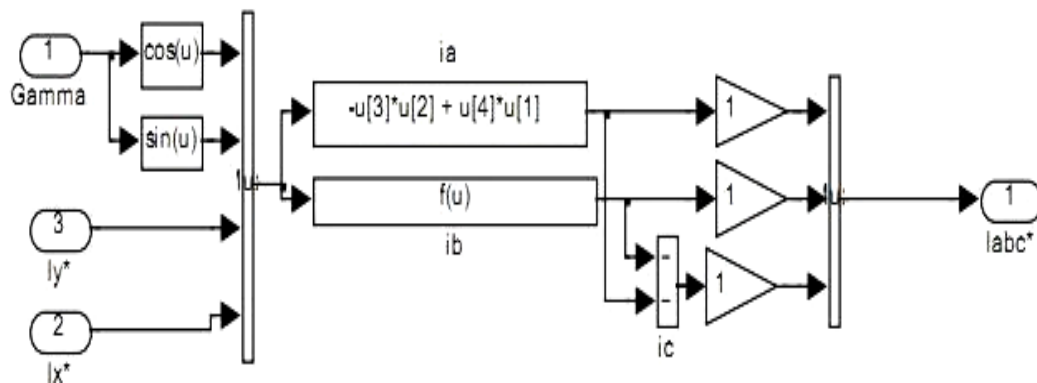


Рис. 6. Схема моделі блока xy to ABC conversion

Перетворення йдуть в машинних одиницях, тому масштабні коефіцієнти не вводимо. На виході блока маємо трьохфазне завдання на потрібній поточній частоті роботи інвертора.

Трьохфазній сигнал завдання, потрібної частоти та амплітуди струму статора, поступає в блок керування інвертором DiscretePWMGenerator.

Особливістю схеми керування інвертором є завдання несучої частоти 1250 Гц, в два рази менше значення частот комутацій. максимальне значення амплітуди вхідного сигналу завдання любої полярності 10 В.

Вихідні сигнали блока DiscretePWMGenerator забезпечують керування шістьма транзисторами

інвертора та упаковані в мікропроцесорну шину. Інвертор обробляє завдання: на обмотках двигуна з'являються напруга та струм. Керування струмове, тому регулятори струму керують струмами статора по вісям X та Y таким чином, щоб швидше відпрацювати завдання при обмеженні струму на допустимому рівні.

Сигнали зворотного зв'язку по дійсному струму статора, квантований та затриманий після обробки, поступає на блок ABCtoxyconversion і перетворюється в двохфазний та переводиться в обертальну систему координат. Схема показана на рис. 7.

Перетворення здійснюються в машинних одиницях.

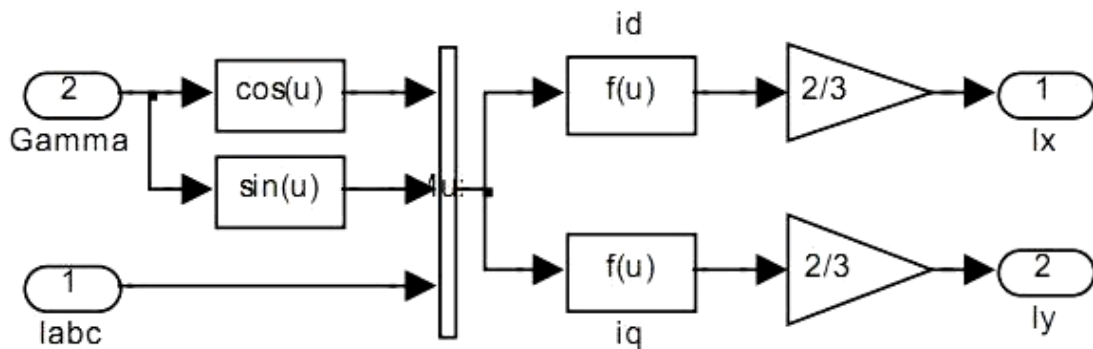


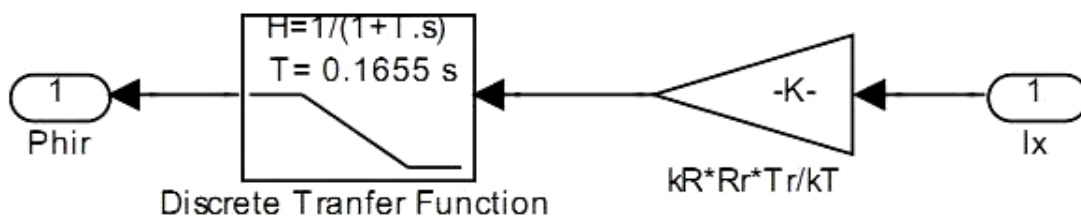
Рис. 7. Схема моделі блока ABCtoxyconversion

Отримані після вироблення сигнали зворотних зв'язків по струму, квантовані по рівню та затримані на час обробки, поступають у коло порівняння з заданим значенням на регулятори струму. Так як елементів зворотного зв'язку по магнітному потоку нема, то потребується коло намагнічування двигуна моделюва-

ти по даним розрахунку схеми заміщення. Схема моделі кола намагнічування двигуна зображена на рис. 8.

Модель характеризує наступне рівняння

$$\psi_{Rx} = \frac{T_R}{(1+T_R s)} k_R R_r i_{sx} \quad (4)$$



$$Phir = kR \cdot R_r \cdot T_r \cdot I_x / (1 + T_r \cdot s)$$

$$kR = 0.9344$$

$$R_r = 3.232 \text{ ohms}$$

$$L_m = 500 \text{ mH}$$

$$L_r = L_l' + L_m = 35.2 + 500 = 535.2 \text{ mH}$$

$$T_r = L_r / R_r = 0.1655 \text{ s}$$

Рис. 8. Схема моделі кола намагнічування двигуна

5. Результати дослідження

Наступним етапом дослідження є моделювання роботи електропривода. На рис. 9 продемонстро-

вані результати пуску привода з векторним керуванням на номінальну частоту обертання ±100 1/с. Привод загалом задовольнив поставлені вимоги.

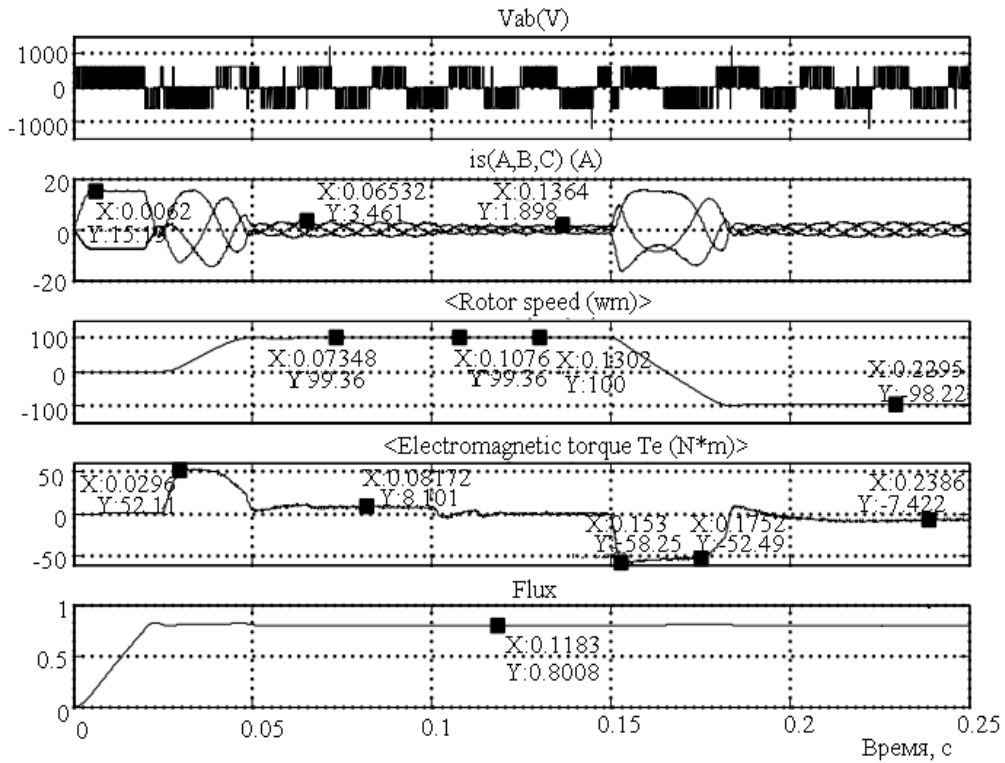


Рис. 9. Пуск та реверс привода з векторним керуванням на ± 100 1/с

Привід чітко відпрацьовує задану частоту обертання, але пусковий момент (а відповідно і пусковий струм) під час пуску непостійний. Потік веде себе нормально, внутрішні збурення суттєво не проявляються. Такий висновок можна зробити аналізуючи процеси пуску та реверсу на частоту обертання ± 50 1/с (рис. 10). Аналізуючи роботу привода на малій частоті обертання (рис. 11), можна стверджу-

вати, що такий електропривод виконує всі функції: чітко формулює задану частоту обертання, відновлює задану частоту обертання після збурення по навантаженню (момент реактивний не перевищував номінального значення). Даний електропривод можна реалізовувати, якщо при обробці інформації будуть використані АЦП та ЦАП відповідної розрядності.

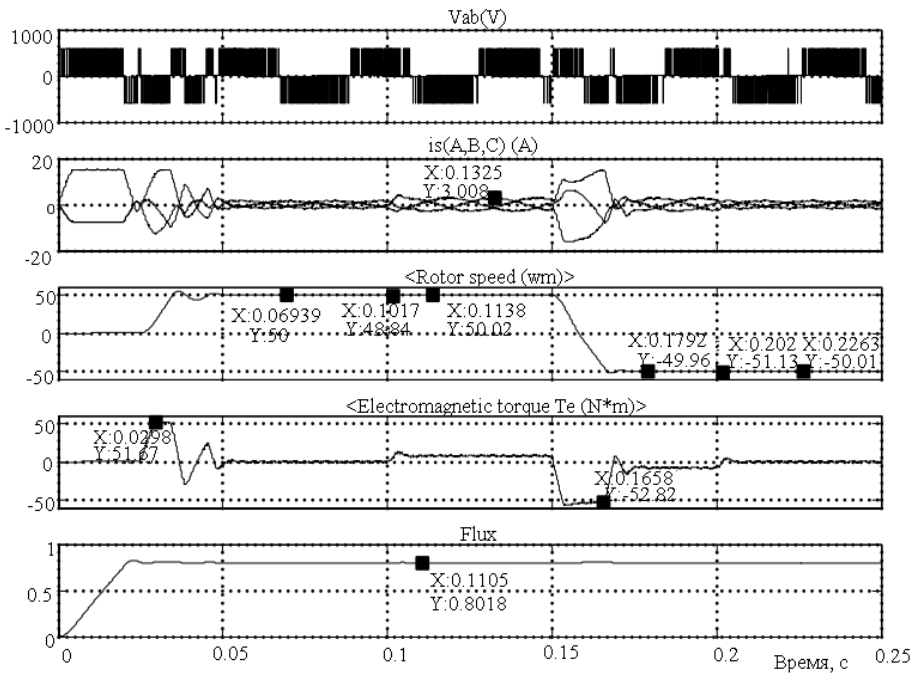
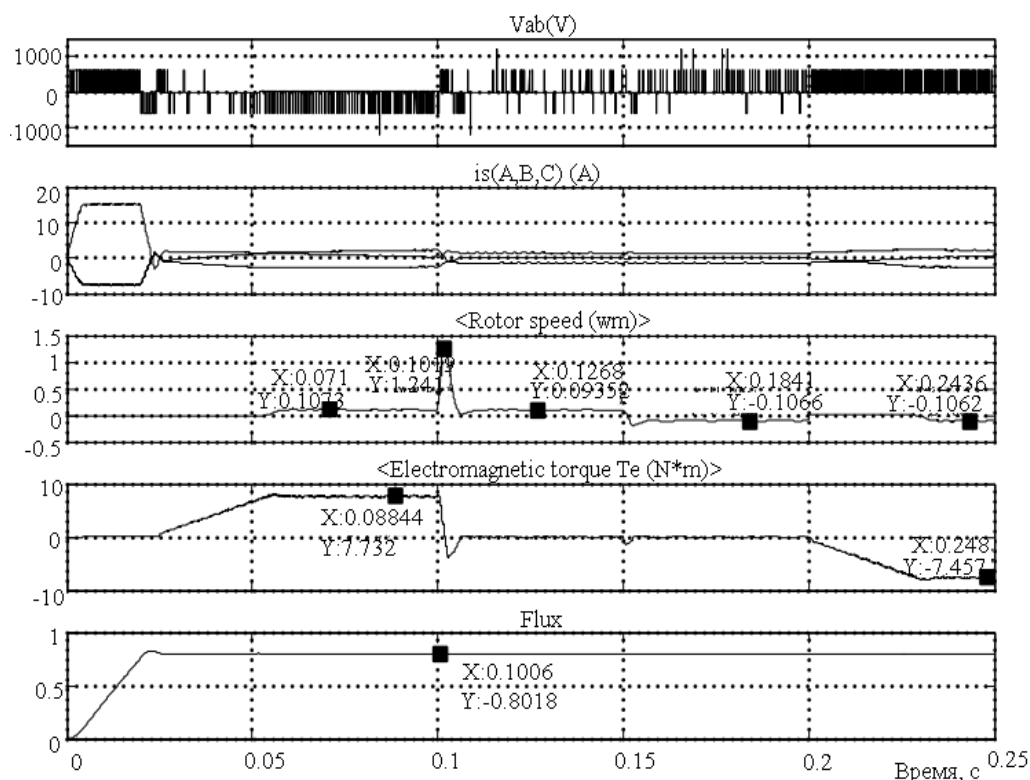


Рис. 10. Пуск і реверс привода з векторним керуванням на ± 50 1/с

Рис. 11. Пуск та реверс привода з векторним керуванням на $\pm 0,01$ 1/c

6. Висновки

В результаті виконаних досліджень було побудовано імітаційну модель універсального електроприводу змінного струму з векторним керуванням для електромобіля. Побудування моделі проводилось за допомогою пакета програм MATLAB. У ході експерименту було знято та проаналізовано основні характеристики роботи електроприводу. Загалом аналізуючи результати роботи електроприводу під час різних режимів руху та різній частоті обертання можна стверджувати, що на високих, середніх та низьких частотах обертання привід чітко відпрацьовує задані частоти обертання, відновлює задані частоти обертання після збурень по навантаженню. Пусковий момент (а відповідно, і пусковий струм) під час пуску декілька непостійний.

Аналіз попередніх досліджень і розробок та отримані нами результати дослідження електроприводу універсальної енергомеханічної установки електромобіля говорять про можливість та доцільність заміни двигуна внутрішнього згоряння на енергомеханічну установку. Так як електропривод має ряд переваг над двигунами внутрішнього згоряння (більш повна реалізація сили тяги електродвигуном; суттєве зменшення шкідливих викидів в атмосферу; спрощення конструкції транспортного засобу).

Література

1. Богданов, К. Л. Тяговый электропривод автомобиля [Текст]: учеб. / К. Л. Богданов // Московский автомобильно – дорожный государственный технический университет. – М.: Издательство МАДИ, 2009. – 57 с.
2. Канило, П. М. Современный анализ экоканцерогенной опасности легковых автомобилей [Текст] / П. М. Канило, А. В. Гриценко // Вестник ХНАДУ. – 2015. – № 68. – С. 36–44.

3. Орлов, Д. С. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении [Текст]: учеб. пос. / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, И. Н. Лозановская. – М.: Высшая школа, 2002. – 334 с.
4. Бусыгин, Б. П. Электромобили [Текст]: учеб. пос. / Б. П. Бусыгин. – М.: Издательство МАДИ, 1979. – 72 с.
5. Щетина, В. А. Электромобиль: техника и экономика [Текст] / В. А. Щетина, Ю. Я. Морговский, Б. И. Ценгер, В. А. Богомазов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 253 с.
6. Шевченко, А. И. Моделирование работы тягового привода электромобіля [Текст] / А. И. Шевченко, А. В. Павленко, В. В. Павленко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – № 3 (74). – С. 88–93.
7. Ключев, В. И. Теория электропривода [Текст]: учеб. / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
8. Nguyen, P. Q. Vector control of three – phase AC machines [Text] / P. Q. Nguyen, J. A. Dittich. – Springer Berlin Heidelberg, 2008. – 340 p. doi: 10.1007/978-3-540-79029-7
9. Marino, R. Induction Motor Control Design [Text] / R. Marino, P. Tomei, C. M. Verrelli. – Springer London, 2010. – 351 p. doi: 10.1007/978-1-84996-284-1
10. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока [Текст]: учеб. / А. Б. Виноградов. – Иваново, 2008. – 298 с.
11. Беспалов, В. Я. Исследование многополюсного асинхронного тягового частотно – регулируемого двигателя [Текст] / В. Я. Беспалов, А. Б. Красовский, М. В. Панихин, В. Г. Фисенко // Научное издание МГТУ им.Н. Э. Баумана Наука и Образование. – 2014. – № 5. – С. 295–307. doi: 10.7463/0514.0709521
12. Trzynadlowski, A. M. Control of induction motors [Text] / A. M. Trzynadlowski. – Academic Press, N. Y., 2001. – 228 p.
13. Терёхин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MATLAB 7. 0. 1) [Текст]: учеб. пос. / В. Б. Терёхин. – Т.: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

14. Марков, А. В. Элементы и устройства систем управления [Текст] / А. В. Марков, А. С. Шмарловский. – Минск: БГИУР, 2010. – 102 с.

References

1. Bogdanov, K. L. (2009). Tyagovyy elektroprivod avtomobilya [Traction electric drive of car]. Moskovskiy avtomobil'no – dorozhnyy gosudarstvennyy tehnikeskij universitet. Moscow: Izdatel'stvo MADI, 57.

2. Kanilo, P. M., Gritsenko, A. V. (2015). Sovremennuyu analiz ekokantserogennoy opasnosti legkovykh avtomobiley [Modern analysis of ecological and cancerogenic dangers of motor cars]. Bulletin of Kharkov national automobile and highway university, 68, 36–44.

3. Orlov, D. S., Sadovnikova, L. K., Lozanovskaya, I. N. (2002). Ekologiya i okhrana biosfery pri khimicheskoy zagryaznenii [Ecology and protection of the biosphere with chemical pollution]. Moscow: Vysshaya shkola, 334.

4. Busygin, B. P. (1979). Elektromobili [Electric cars]. Moscow: Izdatel'stvo MADI, 72.

5. Shchetina, V. A., Morgovskiy, Ju. Ja., Tsenter, B. I., Bogomazov, V. A. (1987). Elektromobil': tekhnika i ekonomika [Electric car: technology and economics]. Mashinostroyeniye, 253.

6. Shevchenko, A. I., Pavlenko, A. V., Pavlenko, V. V. (2012). Modelirovaniye raboty tyagovogo elektroprivoda avtomobilya [Modelling of electric vehicle traction drive]. Transaction of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy University, 3 (74), 88–93.

7. Klyuchev, V. I. (1985). Teoriya elektroprivoda [Electric drive theory]. Moscow: Energoatomizdat, 560.

8. Nguyen, P. Q., Dittrich, J. A. (2008). Vector control of three – phase AC machines. Springer Berlin Heidelberg, 340. doi: 10.1007/978-3-540-79029-7

9. Marino, R., Tomei, P., Verrelli, C. M. (2010). Induction Motor Control Design. Springer London, 351. doi: 10.1007/978-1-84996-284-1

10. Vinogradov, A. B. (2008). Vektornoye upravleniye elektroprivodami peremennogo toka [Vector control of electric drive AC]. Ivanovo, 298.

11. Bepalov, V. Ja., Krasovskiy, A. B., Panikhin, M. V., Fisenko, V. G. (2014). Issledovaniye mnogopolyusnogo asinkhronnogo tyagovogo chastotno – reguliruyemogo dvigatelya [Research of the multipolar induction traction frequency regulated motor]. Scientific periodical of the Bauman MSTU Science and Education, 5, 295–307. doi: 10.7463/0514.0709521

12. Trzynadlowski, A. M. (2001). Control of induction motors. Academic Press, N. Y., 228.

13. Terokhin, V. B. (2010). Modelirovaniye system elektroprivoda v Simulink (MATLAB 7. 0. 1) [Simulation of electric drive systems in Simulink (MATLAB 7. 0. 1)]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 292.

14. Markov, A. V., Shmarlovskiy, A. S. (2010). Elementy i ustroystva sistem upravleniya [Elements and devices of control systems]. Minsk: BGIUR, 102.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Тартаковський Е. Д.

Дата надходження рукопису 15.09.2016

Зубенко Денис Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002
E-mail: Denis04@ukr.net

Олехно Микита Юрійович, кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002
E-mail: olekhnony@ukr.net

Петренко Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002
E-mail: Petersanya2007@mail.ru

Шавкун В'ячеслав Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002
E-mail: Shavkyn1977@mail.ru

Коваленко Андрій Віталійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002
E-mail: AVMK@yandex.ru