

**Висновки.** 1. Перспективність розвитку інтелектуальних методів аналізу (оптимізації і контролю режимно-технологічних множин параметрів і їх підмножин) полягає у тому, що задаючи допустимі діапазони зміни підмножин вхідних кількісних і якісних параметрів, симулюючи їхній вплив на ПК, можна визначити оптимальне значення цільової функції (економічності чи надійності).

2. Розглядається процес зниження ефективності роботи турбогенераторів внаслідок деградації. Розроблена нейро-нечітка рекурентна модель оптимізації режимно-технологічних параметрів, які впливають на ефективність роботи турбогенераторів.

1. Тимошик А.М. Інтелектуальний контроль надійності ефективної роботи турбогенераторів / А.М. Тимошик // *Електроінформ.* – 2009. – № 1. – С. 15–18. 2. Тимошик А.М. Стратегія експлуатаційних експрес випробувань для оцінки індивідуальної надійності турбогенераторів з вичерпаним ресурсом / А.М. Тимошик // *Енергетика и електрифікація.* – 2004. – № 9. – С. 36–42. 3. Тимошик А. М. Оптимізація режимів роботи турбогенераторів з вичерпаним ресурсом / А.М. Тимошик // *Енергетика и електрифікація.* – 2004. – № 10. – С. 13 – 17.

УДК 621.313

В.І. Ткачук, І.Є. Біляковський, Б.Л. Копчак  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕМА

## РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНИХ ДВИГУНІВ БЕЗ ДАВАЧІВ У ЯВНОМУ ВИГЛЯДІ

© Ткачук В. І., Біляковський І. Є., Копчак Б. Л., 2009

Розглянуто режими роботи електроприводу на базі вентильних двигунів без давачів положення ротора у явному вигляді та співвідношення для розрахунків відповідних параметрів компонентів схемотехніки для забезпечення надійного запуску, регулювання швидкості обертання та гальмування двигунів.

The electric drive is offered on the base of direct current brushless motor without rotor position sensing apparatus in an obvious kind and correlation for the calculations proper parameters of components of circuit technique for providing reliable start, rotation speed control and braking of motor.

**Постановка проблеми.** Високі темпи впровадження регульованих електроприводів, які спостерігалися у верстатобудуванні, робототехніці, підйомно-транспортному устаткуванні, віднедавна поширилися на нові сфери, такі, як побутова та офісна техніка, медичне устаткування, автомобільна техніка тощо, де є необхідність регулювати швидкість у широкому діапазоні. Застосування регульованого приводу дає змогу істотно покращити технічні характеристики устаткування, якість і діапазон регулювання, розширити функціональні можливості системи. Крім того знижується споживана електроприводом потужність, що приводить до відчутної економії електроенергії і дозволяє створювати енерго- та ресурсозберігаюче устаткування і технології, які особливо важливі для транспортних засобів з автономним живленням.

Значний розвиток цифрового регульованого електроприводу переважно спричинений стрімким розвитком і впровадженням у виробництво силової напівпровідникової техніки, зокрема,

силових IGBT транзисторів, драйверів, а також інтелектуальних силових модулів з інтегрованими функціями захисту і прямим процесорним управлінням. Крім того, дуже великий вплив на розвиток регульованих електроприводів спричинила поява спеціалізованих мікроконтролерів для управління двигунами, внаслідок чого вартість електроприводів, за використання вентиляльних двигунів, стала співмірна з вартістю електроприводів на базі колекторних двигунів, забезпечивши при цьому вищу надійність та довговічність.

**Аналіз останніх досліджень.** На кафедрі електричних машин і апаратів Національного університету “Львівська політехніка” розроблено низку електроприводів для транспортних засобів, зокрема, електропривод крісла-візка для інвалідів [1] на базі вентиляльних двигунів, які керуються розробленим на кафедрі пультом керування. Цей електропривод містить два вентиляльних електродвигуни з трьома системами обмоток та давачем положення ротора (ДПР) і блок керування. Будова електроприводу для крісла-візка на базі вентиляльних двигунів з давачами положення ротора у явному вигляді детальніше розглянута в [2].

Істотним недоліком вентиляльних двигунів з ДПР є підвищена складність виготовлення та, відповідно, нижча надійність, а також необхідність ускладнення системи додатковим інформаційним каналом між ДПР і комутатором. Очевидно, що у такому випадку доцільно приділити увагу можливості застосування в електроприводі візка та електроприводах інших транспортних засобів вентиляльних двигунів, які не містять ДПР у явному вигляді.

Однак при цьому запуск двигуна здійснюється у декілька етапів. Насамперед, ротор виставляється у визначену позицію, а потім прискорюється, у кроковому режимі, доки генерований сигнал зворотної ЕРС не досягне значення, достатнього для розпізнавання кутового положення ротора. У такому випадку доцільно приділити увагу режимам роботи електроприводу транспортного засобу при застосуванні вентиляльних двигунів, які не містять ДПР у явному вигляді.

**Формулювання цілей статті.** Розширення функціональних можливостей цифрових систем керування дозволяє розв’язати не тільки задачу керування роботою транспортних засобів, які приводяться в рух електроприводами на базі вентиляльних двигунів, але, зокрема, і забезпечити роботу самих двигунів без вузла давача положення ротора у явному вигляді. Тому ціллю статті є аналіз режимів роботи електроприводу транспортного засобу, у якому застосовані вентиляльні двигуни без давачів положення ротора у явному вигляді та контролер ML4425. Доцільно навести співвідношення для розрахунків відповідних параметрів компонентів схемотехніки для забезпечення надійного запуску, регулювання швидкості обертання та гальмування двигунів.

**Викладення основного матеріалу.** Застосування вищезгаданого контролера, наведеного на рис. 1, забезпечує відпрацювання всіх необхідних для електроприводу режимів завдяки новим необхідним функціям, зокрема, електричній схемі запуску, управлінню комутацією за зворотною ЕРС, широтно-імпульсному модулятору (ШІМ) для регулювання швидкості, фіксованому обмеженню струму, гальмуванню і захисту від пониження напруги, які дозволяють використати його для забезпечення пуску і управління швидкістю трифазного вентиляльного двигуна постійного струму без ДПР у явному вигляді. У робочому режимі інформаційним параметром слугує зворотна ЕРС, яка надходить із вільних від комутації обмоток двигуна та визначає черговість комутації фаз. Завдяки системі фазового підстроювання частоти, комутація двигунів в широких межах є нечутливою до шумів внутрішнього ШІМу і електричної схеми двигуна. Передбачене обмеження струму двигуна базується на використанні контуру управління ШІМ за постійної частоти. Для управління швидкістю можна використати внутрішній підсилювач. Електрична схема контролера гарантує відсутність наскрізних струмів у керованих зовнішніх потужних МОП-транзисторах. Синхронізація під час пуску досягається підбором ємності трьох конденсаторів, що дозволяє використовувати двигуни при зміні навантаження в широких межах.

Алгоритм роботи контролера такий. Електрична схема запуску виставляє ротор двигуна у відому позицію, потім прискорює двигун у кроковому режимі до швидкості, за якої рівень зворотної

ЕРС стає достатнім для управління комутацією. Зворотний зв'язок за швидкістю (ШВ.ФВ – рис. 1) використовується блоком регулювання швидкості, який складається з підсилювача розузгодження і ШІМ-компаратора, що використовується також і для обмеження струму двигуна.

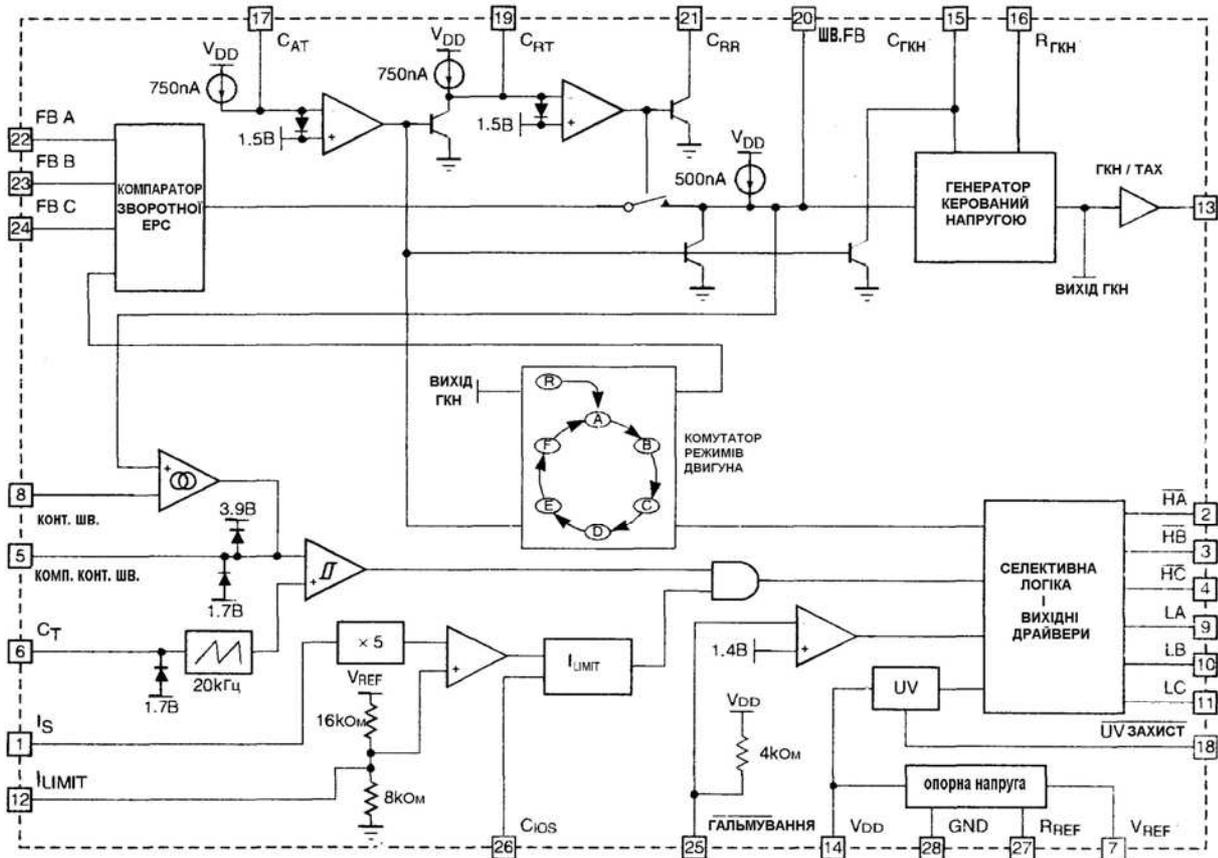


Рис. 1. Структурна схема контролера ML4425

Управління комутацією, ШІМ-регулювання швидкості і обмеження струму об'єднані так, щоб отримати вихідні сигнали управління трифазним мостом із заданими для двигуна напругою і струмом на шести виходах LA, LB, LC, HA, HB, HC. Додаткові функції включають гальмування і схему захисту від заниженої напруги.

Розроблення схемотехніки використання контролера для приводу конкретного вентильного двигуна, зокрема, для електроприводу крісла-візка передбачає розрахунки значень додаткових компонентів для забезпечення надійного відпрацювання кожного кроку алгоритму запуску та роботи двигуна у всіх передбачених для такого електроприводу режимах.

**Розглянемо основні режими електроприводу детальніше.** *Виставляння ротора у початкову позицію.* Перш, ніж двигун стартує, ротор повинен зайняти відому позицію. Коли подається живлення, контролер скидається в режим виставляння позиції. У цьому режимі включаються драйвери виходу LB, HA і HC, виставляючи ротор двигуна в позицію 30 електричних градусів щодо центра першого стану комутації. Режим повинен тривати достатньо довго, щоб двигун з навантаженням встиг зайняти цю позицію. Тривалість режиму встановлюється конденсатором  $C_{AT}$  (рис. 1).  $C_{AT}$  заряджається постійним струмом величиною 750 мкА від 0 В (GND) до 1.5 В. Початкове значення для  $C_{AT}$  розраховується за формулою

$$C_{AT} = \frac{t_s \times 7.5 \times 10^{-7}}{1.5}. \quad (1)$$

Якщо тривалість режиму встановлювання не достатня для надійного старту, збільшують  $C_{AT}$ , поки не буде досягнуто бажаного ефекту.

*Режим розгону.* В кінці режиму виставляння положення ротора контролер входить в режим розгону, по чергово комутуючи фази. Частота комутації наростає, і, відповідно, наростає частота обертання ротора двигуна, що забезпечує досягнення такого рівня зворотної ЕРС, який дозволяє компаратору ЕРС виконувати комутацію двигуна. Тривалість режиму розгону визначається конденсатором  $C_{RT}$  (рис. 1), який заряджається постійним струмом величиною 750 мкА від 0 В до 1.5 В, доки не закінчиться режим розгону.  $C_{RT}$  розраховується за формулою

$$C_{RT} = \frac{2\pi \times J \times 5 \times 10^{-7} \times K_V}{I_{MAX} \times K_t \times 3 \times N}, \quad (2)$$

де  $K_t$  – коефіцієнт моменту двигуна (Нм/А);  $J$  – момент інерції двигуна і навантаження (кг м<sup>2</sup>);  $I_{MAX}$  – максимальний робочий струм (А);  $N$  – кількість магнітів (полісів).

Інтенсивність, з якою розганяється двигун, визначається струмом на виводі ШВ.ФВ. Джерела струму заряджають компоненти фільтра фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ), внаслідок чого

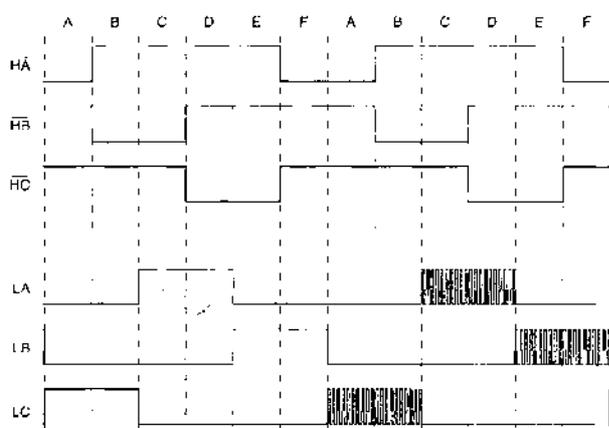


Рис. 2. Часова діаграми послідовності комутації виводів:  
цикл 1 – повна комутація, цикл 2 – комутація з введеним ШІМ на 50 %

зростає частота керованого напругою генератора (ГКН). Протягом режиму розгону компаратор зворотної ЕРС заблоковано. Оптимальне прискорення розгону, відповідно до параметрів двигуна і навантаження, може бути відкоректоване зміною значення  $C_{RR}$ .

*Управління комутацією.* Вентильний двигун для забезпечення обертального руху вимагає організації електронної комутації, яка передбачає ввімкнення-вимкнення силових ключів трифазового мосту та визначається положенням ротора. Електронна комутація в ML4425 здійснюється по черговим ввімкненням і вимкненням у належній послідовності одного виводу N однієї фази і одного виводу P іншої фази – всього шість станів перемикачів, які становлять повний цикл комутації. Ці запрограмовані для комутації

двигуна стани від А до F, ілюстровані на рис. 2. Синхронізація комутації забезпечується генератором, керованим напругою, який змінює частоту на виході ГКН/ТАХ пропорційно до вхідної напруги на вході ШВ.ФВ з коефіцієнтом пропорційності  $K_V$ , який визначається резистором  $R_{ГКН}$  і конденсатором  $C_{ГКН}$  (рис. 3, а).  $R_{ГКН}$  встановлює струм пропорційно вхідній напрузі на ШВ.ФВ. Цей струм заряджає  $C_{ГКН}$  між пороговими напругами 2.3 В і 4.3 В. Хвиля у вигляді послідовності трикутних імпульсів на  $C_{ГКН}$  (рис. 3, а) відповідає частоті синхроімпульсів на ГКН.  $K_V$  повинен бути таким, щоб вихідна частота ГКН відповідала максимальній частоті комутації або максимальній частоті обертання двигуна, коли напруга на вході ГКН дорівнює або трохи менша, ніж опорна  $V_{REF}$ .  $C_{ГКН}$  розраховується за формулою

$$C_{ГКН} = \frac{6.5 \times 3.101 \times 10^{-6}}{0.05 \times N \times n_{MAX}}, \quad (3)$$

де  $n_{MAX}$  – максимальна робоча швидкість (об/хв).

Вибирається найближче до  $C_{ГКН}$  стандартне значення. Максимальну частоту обчислюють за формулою

$$f_{MAX} = 0.05 \times N \times n_{MAX}. \quad (4)$$

Сигнал до ГКН подається з компаратора зворотної ЕРС, на входи FB A, FB B, і FB C якого надходять зворотні ЕРС фаз двигуна через додаткові опори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (рис. 3, б), значення яких визначається за формулою

$$R_1 = 670/V \times (V_M - 10), \quad (5)$$

де  $V=12$  В, а  $V_M$  – постійна напруга живлення двигуна.

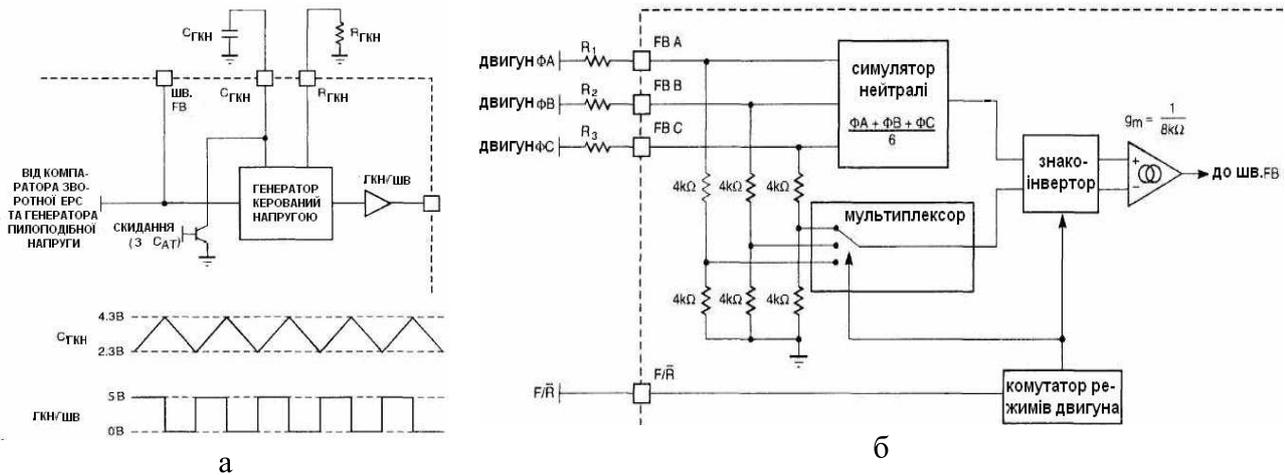


Рис. 3. Зовнішні зв'язки генератора керованого напругою та компаратора зворотної ЕРС

Компаратор зворотної ЕРС через підсилювач порівнює отримані аналоги фазних напруг двигуна з обчисленою напругою умовної нейтральної точки

$$E_N = \frac{E_{\phi 1} + E_{\phi 2} + E_{\phi 3}}{3}. \quad (6)$$

Вимірюється електрорушійна сила тієї фази двигуна, яка не керується (тобто, якщо LA і NB включені, фаза А керується сигналом низького рівня, фаза В керується сигналом високого рівня і вимірюється сигнал фази С).

Для надійної роботи системи розпізнавання фаз за зворотними ЕРС, яку реалізують три блоки: комутатор режимів двигуна, генератор, керований напругою і компаратор зворотної ЕРС, необхідний фільтр затримки, компоненти якого встановлені на ШВ.ФВ (рис. 4) і розраховуються за формулами:

$$C_{ШВ.ФВ1} = 0.25 \times \frac{K_{O1}}{\sqrt{M}} \times \left( \frac{N_s^2}{\ln\left(\frac{d}{100}\right)^2 \times f_{ГКН}^2} \right);$$

$$C_{ШВ.ФВ2} = C_{ШВ.ФВ1} \times (M - 1); \quad (7)$$

$$R_{ШВ.ФВ} = 2 \times M \times \ln\left(\frac{d}{100}\right) \times \left( \frac{f_{ГКН}}{N_s \times K_{O1} \times (1 - M)} \right),$$

де  $K_{O1}$  – коефіцієнт зворотної ЕРС двигуна;  $M$  – розузгодження між полюсом і початком відліку циклу;  $d$  – базовий коефіцієнт для фіксування відсотка циклів, необхідних для досягнення потрібного зміщення за фазою;  $N_s$  – кількість циклів, необхідна для досягнення потрібного зміщення за фазою.

Регулювання швидкості здійснюється установкою команди швидкості на вході КОНТ.ШВ вхідною напругою від 0 до 6.9 В ( $V_{REF}$ ). Точність команди швидкості досягається навісними компонентами  $R_{ГКН}$  і  $C_{ГКН}$ . Компоненти компенсації блока регулювання швидкості розраховують за

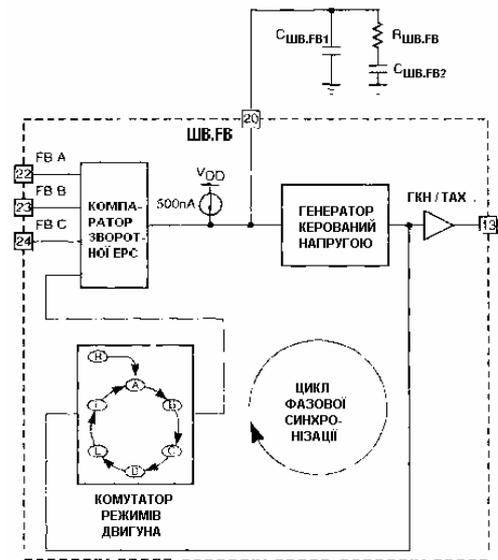


Рис. 4. Система комутації фаз зворотною ЕРС

формулами

$$C_{SC} = \frac{26.9 \times N \times V_M \times C_{ГКН}}{f_{SB} \times K_e \sqrt{2.5 + 98.696 \times \tau \text{ м}^2 + f_{SB}^2}}; R_{SC} = \frac{10}{2\pi \times f_{SB} \times C_{SC}}, \quad (8)$$

де  $f_{SB}$  – ширина смуги частот блока швидкості,  $K_e$  – коефіцієнт зворотної ЕРС (В·с/рад).

Напруга на КОНТ.ШВ порівнюється генератором розгону зі створеною ним пилкоподібною напругою від 1.7 В до 3.9 В (рис. 1). Спад напруги на діоді нижче 1.7 В (приблизно 1В) запускає генератор. Частота генератора розгону встановлена конденсатором  $C_{IOS}$  і визначається за формулою

$$C_T = \frac{1/f_{ШИМ} \times 50}{2.4}, \quad (9)$$

де  $f_{ШИМ}$  – частота ШИМ.

Коли ML4425 переходить від режиму виставлення позиції в режим розгону, є ймовірність наскрізної провідності у фазах силового моста. Ця наскрізна провідність може мати місце, коли  $\overline{HC}$  включений в режим виставлення позиції, (стан R на рис. 1), а контролер переходить в положення A. Наскрізна провідність може з'явитися і через відмінності між часом ввімкнення і вимкнення силової установки. Щоб вирішити цю проблему, драйвер LC не вмикається, поки напруга на  $\overline{HC}$  не дорівнює  $V_{DD} = 3В$  (рис. 1).

*Гальмування.* Коли на вході ГАЛЬМУВАННЯ (рис. 1) напруга нижча 1.4 В, вихідні драйвери сторони низького рівня LA, LB і LC залишаються ввімкненими, а вихідні драйвери сторони високого рівня HA, HB, HC – вимкнені, що забезпечує гальмування. При гальмуванні дезактивоване обмеження струму і тому його необхідно використовувати обережно.

*Блокування при зниженій напрузі* використовується, щоб захистити силовий міст. Знижена напруга на  $V_{DD}$  до 9.5 В, або менше визначається виходами низького рівня на виводі UV ЗАХИСТ, тим самим вимикаючи всі вихідні драйвери (LA, LB, LC,  $\overline{HA}$ ,  $\overline{HB}$ , і  $\overline{HC}$ ). Компаратор, який запускає блокування зниженої напруги, має гістерезис у 150 мВ.

Вихідні драйвери ML4425 сконфігуровані так, щоб управляти силовим мостом з напругою від 12 до 80 В, що достатньо для електроприводу крісла-візка.

**Висновки.** 1. Розглянуто режими роботи електроприводу на базі вентильних двигунів без давачів положення ротора у явному вигляді та контролера ML4425, а також розрахунки параметрів компонентів схемотехніки для забезпечення запуску, регулювання швидкості обертання та гальмування. 2. Запропоноване розв'язання задачі реалізоване для вентильного двигуна без ДПР у явному вигляді потужністю 150 Вт, який, зокрема, можна застосувати для крісла-візка.

1. Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Дишовий Р.В., Макаруч О.В. Крісло-візок з електричним приводом // Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Вісник НТУ ХПІ. Сер. Електротехніка, електроніка і електропривод. Вип. 12, т. 1. – Харків: Вид-во НТУ ХПІ, 2002. С. 230–231. 2. Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Буштинський М.В. Керований електропривод транспортних засобів на базі вентильних двигунів // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: Вид-во НТУ ХПІ, 2004. 3. <http://www.fairchildsemi.com>.