

УДК 629.114

## КЕРУВАННЯ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ, ЩО ПІДВАРЯДЖАЄТЬСЯ

О.В. Бажинов, проф., д.т.н., М.А. Весела, асп.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Науково обґрунтовано базові параметри і характеристики силової установки електромобіля. Досліджено закон управління вентилювальним двигуном у складі силової установки за заданого тягово-швидкісного режиму.

*Ключові слова:* електромобіль, силова установка, вентилювальний двигун, система управління.

## УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ ПОДВАРЯЖАЕМОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

А.В. Бажинов, проф., д.т.н., М.А. Веселая, асп.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Научно обоснованы базовые параметры и характеристики силовой установки электромобиля. Исследован закон управления вентилювальным двигателем в составе силовой установки при заданном тягово-скоростном режиме.

*Ключевые слова:* электромобиль, силовая установка, вентилювальний двигател, система управления.

## CONTROL OF ELECTRIC POWER PLANT OF ELECTRIC VEHICLE WITH RECHARGEABLE

A. Bazhinov, Prof., D. Sc. (Eng.), M. Vesela, P. G.,  
Kharkiv National Automobile and Highway University

**Abstract.** Basic parameters and characteristics of the electric vehicle powerplant are scientifically grounded. The law of control of brushless motor as a part of the powerplant at a given towing speed mode is investigated.

**Key words:** electric vehicle, powerplant, brushless motor, control system

### Вступ

Найбільш перспективним напрямом вирішення задачі підвищення екологічної чистоти й економічності автомобілів вважається використання тягового електропривода. Цей напрям пов'язаний як із подальшим вдосконаленням електромобілів, так і з розробками автомобілів, оснащених гібридними силовими установками. Такі силові установки включають, окрім двигуна внутрішнього згорання, тяговий електродвигун, контур рекуперації енергії, а також пристрій управління перерозподілом потоків потужності.

У наш час як тяговий електропривід часто застосовують вентилювальний двигун (ВД). ВД є системою регульованого електропривода, що складається з електродвигуна змінного струму, конструктивно подібного до синхронної машини, вентилювального перетворювача і пристрою управління, що забезпечує комутацію ланцюгів обмоток статора залежно від кутів положення ротора. Як тяговий електропривід застосовуються ВД на основі синхронного двигуна зі збудженням від розташованих на роторі постійних магнітів. Використання ВД має ряд конструктивних і техніко-експлуатаційних переваг: безконтактність і

відсутність вузлів, що вимагають обслуговування; велика перевантажувальна здатність за моментом; найвищі енергетичні показники через відсутність втрат на збудження; простота системи охолодження через відсутність на роторі обмоток, що нагріваються струмом навантаження; великий термін служби, надійність; кращі масогабаритні й вартісні показники.

### Аналіз публікацій

Останнім часом з'явилася достатньо велика кількість робіт вітчизняних і зарубіжних дослідників, присвячених ідентифікації математичних моделей тягового електропривода різних транспортних засобів і синтезу оптимального управління автомобільних силових установок. Це говорить про актуальність вказаної проблеми.

Зокрема в роботах [1–4] викладені підходи до моделювання силових установок гібридних автомобілів, що включають ВД як допоміжний електропривід, і відповідних систем управління.

У роботах [5–7] досліджуються питання математичного моделювання ВД, а також оптимізації управління вектором струму статора.

### Мета і постановка завдання

При проектуванні нових автомобільних силових установок виникає складна проблема наукового обґрунтування їх базових параметрів і характеристик. Для вирішення цієї проблеми використовуються методики, що базуються на проведенні обчислювальних експериментів з відповідними математичними моделями. Проте проведення порівняльного аналізу різних конструктивних рішень не є можливим без оптимізації алгоритмів управління як силовою установкою в цілому, так і окремих агрегатів, що її складають. Ця робота присвячена дослідженню закону управління ВД у складі автомобільної силової установки, що забезпечує мінімальний струм споживання за заданого тяговошвидкісного режиму.

### Основні положення виконаного дослідження

Проте завдання порівняльного аналізу різних конструктивних рішень автомобільних силових установок на підставі обчислювального

експерименту породжує ряд особливостей як при синтезі моделей об'єкта управління, так і управляючих впливів. Питання технічної реалізації законів управління виявляються неістотними. В той же час оптимальність управління вектором струму на всіх тяговошвидкісних режимах за заданих обмежень і критеріїв якості набуває особливого значення. При цьому рівень складності моделей, що використовуються, повинен забезпечувати можливість дослідження роботи силової установки у стандартному ізовому циклі руху автомобіля.

Проведемо дослідження різних підходів до моделювання тягового електропривода автомобіля на основі ВД при оптимальному управлінні вектором струму статора й оцінки величини помилки моделювання, зумовленої нехтуванням динамічними властивостями ВД при ступінчастих діях, що управляють.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити структурні схеми динамічної та статичної моделей тягового електропривода, а також модель трансмісії автомобіля. Порівняльний аналіз моделей може бути здійснений за часовими залежностями основних змінних, отриманих для ступінчастих управляючих впливів і при оптимальному управлінні вектором струму статора, при врахуванні обмежень області допустимих режимів ВД.

Розглянемо систему координат  $d, q$ , пов'язану з ротором ВД і нерухому відносно нього. Вважатимемо, що вісь  $d$  суміщена з віссю магнітного потоку ротора. У цій системі координат рівняння для електромагнітних процесів ВД у скалярній формі можна записати у вигляді

$$\begin{cases} u_d = R_1 \cdot i_d + L_{1d} \cdot \frac{d i_d}{dt} - p_p \cdot \omega \cdot L_{1q} \cdot i_q \\ u_q = R_1 \cdot i_q + L_{1q} \cdot \frac{d i_q}{dt} + p_p \cdot \omega \cdot L_{1d} \cdot i_d + p_p \cdot \omega \cdot \Psi_{mag} \\ M_{VD} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \Psi_{mag} + i_d \cdot L_{1d} - L_{1q} \cdot i_q, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_d$ ,  $u_q$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  – проєкції векторів напруги і струму статора на осі системи координат, що обертається;  $L_{1d}$  і  $L_{1q}$  – повні індуктивності обмоток статора по подовжній і поперечній осях;  $R_1$  – активний опір фазних об-

МОТОК;  $\psi_{mag}$  – вектор потокозчеплення статора відносно магнітного потоку ротора;  $p_p$  – число пар полюсів;  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора;  $M_{VD}$  – електромагнітний момент ВД

Значення складових струму статора ВД  $i_d^*$  і  $i_q^*$  потрібні для забезпечення заданого тягово-швидкісного режиму й визначаються з урахуванням обраного критерію якості управління. Якщо критерієм якості виступає мінімум повного струму споживання ВД у статичному режимі, оптимальна залежність  $[i_d^*, i_q^*] = f(\beta_M, \omega)$  може бути отримана з умови

$$\begin{cases} i_d^* = \arg \min_{i_d \in [-1_{max}, 0]} I_m(i_d, M_{VDzd}) \\ i_q^* = \sqrt{\left( \min_{i_d \in [-1_{max}, 0]} I_m(i_d, M_{VDzd}) \right)^2 - i_d^{*2}} \end{cases}$$

при  $M_{VDzd} = const$ , (2)

де

$$I_m = \sqrt{i_d^2 + \left( \frac{2 \cdot M_{VDzd}}{3 \cdot p_p} \right)^2 \cdot \frac{1}{\psi_{mag} + i_d \cdot L_{1d} - L_{1q}}^2}$$

– модуль вектора струму статора (повний струм споживання ВД);  $M_{VDzd}$  – електромагнітний момент, що задається, потрібний для підтримки необхідного тягово-швидкісного режиму автомобіля;  $\beta_M \in [-1, 1]$  – сигнал управління електромагнітним моментом ВД;  $\beta_M = M_{VDzd} / M_{VDmax}$ ;  $M_{VDmax}$  – максимальний момент обертання ВД.

Очевидно, що оптимальне, згідно з обраним критерієм, співвідношення подовжньої і поперечної складових струму може бути забезпечене тільки в тих зонах області допустимих режимів роботи ВД, де не використовується режим ослаблення поля. Як регулятор струму тягового електропривода в [8] запропонований регулятор вигляду

$$\begin{cases} u_d^* = k_{pd} \cdot i_d^* - i_d + k_{id} \cdot \int_0^t (i_d^* - i_d) dt - \omega \cdot p_p \cdot \hat{L}_{1q} \cdot i_q - R_{ad} \cdot i_d \\ u_q^* = k_{pq} \cdot i_q^* - i_q + k_{iq} \cdot \int_0^t (i_q^* - i_q) dt + \omega \cdot p_p \cdot \hat{L}_{1d} \cdot i_d - R_{aq} \cdot i_q \end{cases}, (3)$$

де  $k_{pd} = a_c \cdot \hat{L}_{1d}$ ;  $k_{pq} = a_c \cdot \hat{L}_{1q}$ ;

$k_{id} = a_c \cdot \hat{R}_1 + R_{ad}$ ;  $k_{iq} = a_c \cdot \hat{R}_1 + R_{aq}$ ;

$R_{ad} = a_c \cdot \hat{L}_{1d} - \hat{R}_1$ ;  $R_{aq} = a_c \cdot \hat{L}_{1q} - \hat{R}_1$ ;  $\hat{L}_{1d}$ ,  $\hat{L}_{1q}$ ,  $\hat{R}_1$  – оцінки величин  $L_{1d}$ ,  $L_{1q}$  і  $R_1$  відповідно;  $a_c$  – параметр, що визначає необхідну ширину смуги пропускання замкнутої системи управління. Зазвичай  $a_c \ll R_1 / L_{1q}$ .

У цьому регуляторі перші дві складові виразів для подовжнього і поперечного каналів є стандартним ПІ-регулятором. Треті складові вказаних виразів призначені для компенсації зв'язності струмової динаміки між подовжнім і поперечним каналами моделі ВД. Останні, четверті, складові забезпечують активне демпфування.

Перетворення отримуваних на виході регулятора струму сигналів задання напруги із системи координат  $d, q$ , що обертається, у нерухому  $x, y$  можна здійснити згідно з виразами [9]:

$$\begin{cases} u_x^* = u_d^* \cdot \cos Q_c - u_q^* \cdot \sin Q_c \\ u_y^* = u_d^* \cdot \sin Q_c + u_q^* \cdot \cos Q_c \end{cases}, (4)$$

де  $Q_c$  – кут повороту ротора ВД.

Зворотнє перетворення координат для складових струму статора, що поступають на вхід регулятора, виконується відповідно до

$$\begin{cases} i_d = i_x \cdot \cos Q_c + i_y \cdot \sin Q_c \\ i_q = -i_x \cdot \sin Q_c + i_y \cdot \cos Q_c \end{cases}. (5)$$

Перетворення фаз 2/3 для сигналів задання напруги здійснюється за виразами [9]:

$$\begin{cases} u_A^* = u_x^* \\ u_B^* = -\frac{1}{2} \cdot u_x^* + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_y^* \\ u_C^* = -\frac{1}{2} \cdot u_x^* - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot u_y^* \end{cases}. (6)$$

Значення фазних струмів, отримані на підставі сигналів датчиків струму  $DT_A$  і  $DT_C$ , можуть бути приведені до нерухомої системи координат  $x, y$  з використанням виразів:

$$\begin{cases} i_x = i_A \\ i_y = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (7)$$

Інерційність трифазного інвертора з ШІМ може бути охарактеризована чистим запізнюванням на величину періоду широко-імпульсної модуляції  $T_{PWM}$ . Для спрощення завдання розглядатимемо інвертор як лінійний підсилювач потужності з коефіцієнтом посилення  $k_u = 1$  і постійною часу  $T_u = T_{PWM}$  [19]

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \frac{k_u}{p \cdot T_u + 1} \cdot \begin{bmatrix} u_A^* \\ u_B^* \\ u_C^* \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де  $p$  – оператор диференціювання.

Використовуючи перетворення координат, можна отримати опис трифазного інвертора з ШІМ спочатку в нерухомій  $x, y$ , а потім і в пов'язаній з ротором системі координат, що обертається  $d, q$

$$\begin{cases} p \cdot T_u + 1 \cdot u_A = k_u \cdot u_A^* \\ p \cdot T_u + 1 \cdot \frac{u_B - u_C}{\sqrt{3}} = k_u \cdot \frac{u_B^* - u_C^*}{\sqrt{3}} \end{cases}; \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_u \cdot \frac{d u_x}{dt} + u_x = k_u \cdot u_x^* \\ T_u \cdot \frac{d u_y}{dt} + u_y = k_u \cdot u_y^* \end{cases}; \quad (10)$$

$$T_u \cdot \frac{d}{dt} \cdot u_x + ju_y + u_x + ju_y = k_u \cdot u_x^* + ju_y^*, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_u \cdot \frac{d}{dt} \cdot u_d + ju_q \cdot e^{jQ_c} + u_d + ju_q \times \\ \times e^{jQ_c} = k_u \cdot u_d^* + ju_q^* \cdot e^{jQ_c}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T_u \cdot \frac{d u_d}{dt} + jT_u \cdot u_d \cdot \omega_c + jT_u \cdot \frac{d u_q}{dt} - \\ - T_u \cdot u_q \cdot \omega_c + u_d + ju_q = k_u \cdot u_d^* + jk_u \cdot u_q^*, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{cases} u_d = \frac{k_u}{T_u \cdot p + 1} \cdot u_d^* + \frac{T_u \cdot p_p \cdot \omega}{T_u \cdot p + 1} \cdot u_q; \\ u_q = \frac{k_u}{T_u \cdot p + 1} \cdot u_q^* - \frac{T_u \cdot p_p \cdot \omega}{T_u \cdot p + 1} \cdot u_d. \end{cases} \quad (14)$$

Останній вираз, що є математичним описом інвертора з ШІМ у системі координат, що обертається  $d, q$ , відображає також існуючі взаємовпливи подовжнього і поперечного каналів управління, які посилюються за збільшення частоти обертання ротора ВД. Ці взаємовпливи можна розглядати як збурення, що діють на струмові контури. Для їх мінімізації необхідно зменшувати величину періоду ШІМ.

Елементи трансмісії автомобіля, які виступають навантаженням цього електропривода, характеризуються достатньо великим приведеним моментом інерції. Постійні часу процесу управління швидкістю обертання ротора ВД у складі силової установки автомобіля виявляються істотно більшими постійних часу ВД, регулятора струму й інвертора з ШІМ. Це дозволяє нехтувати динамічними властивостями власне тягового електропривода під час дослідження різних тягово-швидкісних режимів автомобільної силової установки. Потужність, споживану ВД, можна визначити як суму миттєвих потужностей фаз статора

$$\begin{aligned} P_{ptr} &= u_A \cdot i_A + u_B \cdot i_B + u_C \cdot i_C = \\ &= \frac{3}{2} u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q. \end{aligned} \quad (15)$$

На рис. 1 показано зміну потужності, споживаної ВД від тягової мережі, при розгоні автомобіля, або тієї, що віддається в мережу в результаті рекуперації кінетичної енергії гальмування.

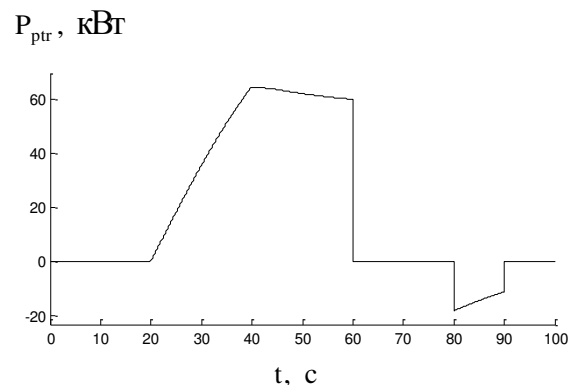


Рис. 1. Потужність, що споживана або віддається в тягову бортову мережу електроприводом автомобіля

Порівняльний аналіз результатів моделювання трансмісії автомобіля з тяговим електро-

приводом при використанні статичної і динамічної моделей ВД при ступінчастих управляючих впливах й оптимальному управлінні вектором струму показав, що середньоквадратичні відхилення складових струму і напруги, електромагнітного моменту і частоти обертання ротора ВД становлять:

$$\sigma_{I_q} = 0,90478 \text{ A} ; \sigma_{I_d} = 0,57824 \text{ A} ;$$

$$\sigma_{U_q} = 0,35869 \text{ В} ; \sigma_{U_d} = 0,56286 \text{ В} ;$$

$$\sigma_{M_{\text{вд}}} = 0,37262 \text{ кгм} ; \sigma_n = 1,6344 \text{ кгм відпо-} \\ \text{відно.}$$

### Висновки

Таким чином, величини помилок основних змінних моделювання, викликані нехтуванням динамічними властивостями ВД, виявляються достатньо малими порівняно з діапазоном зміни відповідних змінних. Це підтверджує доцільність використання статичної моделі ВД у процесі синтезу оптимального управління силовою установкою автомобіля з тяговим електроприводом, а також вибору й обґрунтування її базових параметрів і характеристик.

### Література

1. Гібридні автомобілі / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Сериков та ін. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 328 с.
2. Смирнов О.П. Характерні режими роботи гібридної енергетичної установки автомобіля / О.П. Смирнов, В.І. Калмиков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 18. – С. 13–15.
3. Смирнов О.П. Исследование функциональных возможностей вентиляльных машин в электроприводе автомобилей / О.П. Смирнов, В.И. Калмыков, В.С. Боженов, А.М. Быков, Д.А. Воробьев // Весті автомобільно-дорожнього інституту «ДонНГУ». – 2007. – № 1(4). – С. 129–132.
4. Смирнов Д.О. Схемні рішення застосування вентиляльних машин у електроприводі автомобілів / Д.О. Смирнов, А.В. Сараєв // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 41. – С. 45–47.
5. Сериков С.А. Нечітка модель системи керування силовою установкою гібридного автомобіля / С.А. Сериков, Ю.Н. Бороденко, А.А. Дзюбенко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2006. – Вып. IV(39). – С. 240–247.
6. Сериков С.А. Синтез системы управления силовой установкой гибридного автомобиля / С.А. Сериков, Ю.Н. Бороденко, А.А. Дзюбенко // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2007. – Вып. 36. – С. 69–73.
7. Овчинников И.Е. Вентиляльные электрические двигатели и привод на их основе / И.Е. Овчинников. – С.Пб.: Корона-век, 2007. – 336 с.
8. Сериков С.А. Управление вектором тока тягового вентиляльного электродвигателя силовой установки гибридного автомобиля / С.А. Сериков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. – 2009. – Вып. 25. – С. 127–133.
9. Бажинов А.В. Система управления гибридной силовой установки с тяговым электроприводом на базе вентиляльного двигателя с электромагнитным возбуждением / А.В. Бажинов, В.Я. Двудненко, С.А. Сериков // Вісник СХУ ім. Володимира Даля. – 2010. – №7 (149). – С. 61–66.

Рецензент: А.В. Гнатов, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 27 вересня 2016 р.