

Б. І. Мокін¹
О. Б. Мокін¹
В. В. Горенюк¹

ДО ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

¹Вінницький національний технічний університет

Показано, що результати, отримані вченими в дослідженнях з розв'язання задачі частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, вимагають суттєвої корекції, оскільки вони отримані з використанням математичної моделі кривої намагнічування, апроксимованої двома відрізками прямих, верхній з яких проходить паралельно осі струму, що не відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин і вимагає стабілізації магнітного потоку в зазорі на рівні, який задається горизонтальним відрізком кривої намагнічування, незалежно від змін частоти струму в обмотці статора. Запропоновано розв'язувати задачу оптимального за критерієм мінімуму втрат електричної енергії частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, який є тяговим в системі привода електромобіля, з використанням математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, яка з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин. Приведені результати розв'язання задачі оптимального частотного керування режимами короткозамкнутого асинхронного електродвигуна в умовах його роботи як тягового в системі привода електромобіля, які отримані із застосуванням варіаційного варіанту методу Лагранжа та математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса і які приводять до поля екстремалей в координатах «відносний час — відносна швидкість руху електромобіля — відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна».

Ключові слова: короткозамкнутий асинхронний електродвигун, привод електромобіля, частотне керування, оптимізація режимів, акумуляторна батарея, критерій мінімуму втрат електричної енергії.

Вихідні передумови та постановка задачі

Як відомо [1], легкові електромобілі нині виготовляються виключно лише з використанням електричних машин змінного струму, серед яких переважають асинхронні електродвигуни з короткозамкнутим ротором (АД), про характеристики яких можна прочитати у будь-якому навчальному посібнику з електротехніки, що містить розділ, присвячений електричним машинам, наприклад [2]. І оскільки основним джерелом електричної енергії в електромобілях є силові акумуляторні батареї (САБ), які генерують постійний струм, то між джерелом електричної енергії в легкових електромобілях і приводними асинхронними електродвигунами встановлюються інвертори постійного струму в трифазний змінний (ППЗ), силовий контур схеми включення яких має вигляд, розглянутий, наприклад в роботі [3], який показано на рис. 1.

У зв'язку з тим, що запас електричної енергії в САБ є обмеженим, то завжди актуальною була, є і завжди буде задача, як домогтись, щоб електромобіль з використанням цього запасу міг проїхати якомога довший відрізок дороги, яка зводиться до задачі мінімізації витрат електроенергії САБ електромобіля для подолання ним заданого відрізка шляху.

В роботі [1] ця задача розв'язана нами для вантажних електромобілів з електроприводом постійного струму. Але кінцеві результати її розв'язання не можуть бути використаними для легкових електромобілів з електроприводом змінного струму, оскільки математична модель тягового електромагнітного моменту електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням, яка використана при оптимізації руху вантажного електромобіля, суттєво відрізняється від математичної

моделі тягового електромагнітного моменту асинхронного електричного двигуна змінного струму. Саме ця обставина і зумовила необхідність розгляду, як окремої, задачі оптимізації руху легкового електромобіля з асинхронним електроприводом, розв'язанню якої і присвячена ця стаття.

Але перш, ніж перейти до розв'язання поставленої задачі, як вихідну передумову приведемо її формулювання, яке здійснене нами в роботі [1]. Отже, необхідно мінімізувати функціонал

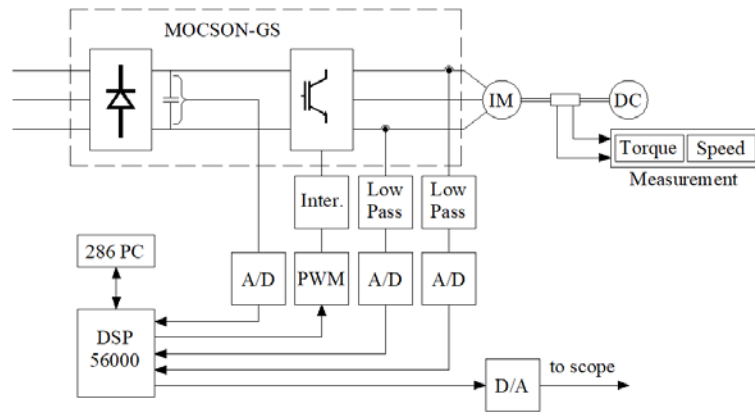


Рис. 1. Схема силового контуру системи електроприводу легкового електромобіля з тяговими асинхронними електродвигунами

$$E_I = \int_0^{T_I} U I dt = \int_0^{T_I} (U_B - \Delta U) I dt = \int_0^{T_I} U_B \left(1 - \frac{r_B}{U_B} I\right) I dt, \quad (1)$$

де E_I — кількість використаної електроенергії за час T_I їзди електромобіля, а U_B , I , r_B — базова напруга, струм та внутрішній опір силової акумуляторної батареї САБ, за наявності обмежень у вигляді функціоналу

$$L_I = \int_0^{T_I} V dt, \quad (2)$$

де V — швидкість руху електромобіля; L_I — відстань, яку він проїде за час T_I , та у вигляді моделі динаміки руху горизонтальним відрізком дороги у вигляді диференціального рівняння

$$m \frac{dV}{dt} = F_T - k_0 F_G - k_1 V - k_2 V^2, \quad (3)$$

де m — маса електромобіля, V — швидкість з якою рухається електромобіль, F_T — сили тяги, що створює електродвигун, F_G — вага електромобіля, k_0 — табличний коефіцієнт, який залежить від матеріалу поверхні дороги, k_1 — коефіцієнт, що залежить від площі бічної поверхні електромобіля, k_2 — коефіцієнт, що залежить від площі поперечного перерізу електромобіля.

А з урахуванням того, що тяговий електромагнітний момент M_T електродвигуна зв'язаний з силою тяги F_T та радіусом колеса R співвідношенням

$$F_T = \frac{M_T}{R}, \quad (4)$$

та з урахуванням базових величин — *основних*:

- для тягової сили F_T її значення F_H в номінальному режимі;
- для моменту M на валу його номінальне значення M_H ;
- для швидкості V руху електромобіля її номінальне значення V_H ;
- для струму I САБ його номінальне значення I_H ;
- для напруги U , що прикладається до зажимів тягового електродвигуна, напругу U_B акумуляторної батареї при її повному заряді;
- для магнітного потоку Φ його значення Φ_H при номінальному струмі намагнічування I_H , тобто $\Phi_H = \Phi(I_H)$,

та *похідних*:

- для часу t — електромеханічну сталу T_M , яка зв'язана з основними базовими величинами співвідношенням

$$T_M = \frac{mV_H}{F_H}; \quad (5)$$

– для відстані L — величину L_H , яка зв'язана з основними базовими величинами співвідношенням

$$L_H = V_H T_M; \quad (6)$$

– для енергії E постійного струму акумуляторної батареї величину E_H^I , яка зв'язана з основними базовими величинами співвідношенням

$$E_H^I = U_B I_H T_M, \quad (7)$$

співвідношення (1), (2), (3) набувають безрозмірного вигляду

$$e_i = \int_0^{\tau_i} (1 - \alpha i) i d\tau; \quad (8)$$

$$l_i = \int_0^{\tau_i} v d\tau; \quad (9)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{T_M M_T}{m V_H R} - f_0 - f_1 v - f_2 v^2; \quad (10)$$

де
$$v = \frac{V}{V_H}; \quad \tau = \frac{t}{T_M}; \quad i = \frac{I}{I_H}; \quad e_i = \frac{E_I}{E_H^I} = \frac{E_I}{U_B I_H T_M}; \quad \tau_i = \frac{T_I}{T_M}; \quad (11)$$

$$f_0 = \frac{k_0 F_G T_M}{m V_H}; \quad f_1 = \frac{k_1 T_M}{m}; \quad f_2 = \frac{k_2 V_H T_M}{m}; \quad \alpha = \frac{r_B I_H}{U_B}; \quad l_i = \frac{L_I}{V_H T_M}. \quad (12)$$

Порівнюючи вищенаведені вирази з наведеними в роботі [1], бачимо, що вони відрізняються першим членом у правій частині рівняння (10), що, як буде показано в основній частині дослідження, приводить до суттєвої зміни кінцевих результатів оптимізації.

Викладення основних результатів дослідження

Викладення матеріалу почнемо з нагадування про те, що в роботі [4] описано один з варіантів розв'язання сформульованої нами задачі, але за умови, по-перше, що характеристика намагнічування $\Phi = \Phi(I)$ осердя статора АД є аж занадто ідеалізованою і являє собою сукупність двох прямих, одна з яких з'єднує початок системи координат $(0,0)$ з точкою (I_H, Φ_H) , а друга, розпочинаючись з точки (I_H, Φ_H) , проходить паралельно осі абсцис (струму). А другою умовою, яку використав автор роботи [4], є умова гіперболічної залежності електромагнітного моменту від ковзання s , де

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} = \frac{f_c - f}{f_c}; \quad (13)$$

ω , ω_c — відповідно, поточна кутова швидкість обертання вала ротора АД, якій відповідає частота f та кутова швидкість обертання вектора електричного струму живлення, який подається в обмотку статора АД, якій відповідає частота f_c .

За цих умов мінімум електричних втрат в АД за використання частотного регулювання його швидкості, як показано в роботі [4], досягається шляхом такого регулювання частоти живлення f_c , за якого підтримується на номінальному рівні Φ_H магнітний потік Φ .

Але, як показано в роботі [5], моделювання гіперболічною функцією залежності електромагнітного моменту M_T асинхронного електродвигуна від ковзання s не відповідає характеру електромеханічних процесів в АД, а тому є хибним і призводить до результатів, що йдуть врозрід з реальними характеристиками АД, оскільки в дійсності ця залежність має вигляд

$$M_T = M_H \left(\frac{s}{s_H} \right) \left(\frac{U}{U_H} \right) \left(\frac{\Phi}{\Phi_H} \right) \frac{1 + \left(\frac{x_p}{r_p} \right)^2 s_H^2}{1 + \left(\frac{x_p}{r_p} \right)^2 s^2} = M_H s_* u \varphi \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2}, \quad (14)$$

де U — напруга, що подається на обмотку статора АД, U_H — номінальне значення цієї напруги, r_p, x_p — відповідно, активний та реактивний опір ротора АД в загальмованому стані, безрозмірні величини мають вигляд

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_H}; \quad (15)$$

$$u = \frac{U}{U_H}; \quad (16)$$

$$s_* = \frac{s}{s_H}, \quad (17)$$

а параметри мають вигляд

$$a = \frac{1}{s_H}; \quad b = \frac{x_p}{r_p}. \quad (18)$$

А як впливає з результатів роботи [6], використана в роботі [4] ідеалізація характеристики намагнічування $\varphi = \varphi(i)$ призводить до значних похибок в розрахунках у разі її використання, тож суттєво зменшити ці похибки можна, якщо математичну модель кривої намагнічування, приведеної з реальними значеннями фізичних параметрів, взятими, наприклад, з роботи [7], задати у вигляді зваженого оберненого гіперболічного синуса [8], тобто, у вигляді

$$\varphi = 1,136 \operatorname{Arsh} i = 1,136 \ln \left(i + \sqrt{i^2 + 1} \right). \quad (19)$$

Підставляючи вираз (14) у рівняння (10) та враховуючи співвідношення (4), (5), (11), (15), приведемо це рівняння до вигляду

$$\frac{dv}{d\tau} = \varphi u \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0 - f_1 v - f_2 v^2, \quad (20)$$

а з урахуванням виразу (19) — до вигляду

$$\frac{dv}{d\tau} = 1,136 \ln \left(i + \sqrt{i^2 + 1} \right) u \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0 - f_1 v - f_2 v^2. \quad (21)$$

З урахуванням здійснених вище перетворень наша задача отримала таке формулювання: знайти закони для відносної швидкості руху $v(\tau)$ електромобіля та відносного струму $i(\tau)$ у обмотці статора АД, які забезпечать мінімум функціоналу (8) в умовах дотримання обмежень (9) та (21).

Аналізуючи рівняння динаміки (21) електромобіля, бачимо, що впливати на його швидкість руху та струм в асинхронному двигуні електропривода можна або змінюючи ефективне значення напруги, що прикладається до обмотки статора цього електродвигуна, або змінюючи частоту цієї напруги, яка виразами (13) та (17) зв'язана з відносним ковзанням ротора АД.

Як відомо [1], регулювання кутової швидкості обертання роторів приводних асинхронних електродвигунів в усіх легкових електромобілів здійснюється шляхом змін частоти струму, що подається в обмотку статора, реалізація яких при інверторному перетворенні напруги постійного струму силової акумуляторної батареї в напругу змінного струму, потрібного для живлення АД, не викликає труднощів і дозволяє у рівнянні (21) відносну напругу u вважати константою. Для спрощення викладок вважатимемо, що в інверторі і обмотці статора втрачається до 12 % підведеної напруги в її ефективному значенні, тобто

$$1,136u = 1. \quad (22)$$

Це дає нам право при частотному регулюванні кутової швидкості обертання ротора АД записати рівняння (21) у вигляді

$$\frac{dv}{d\tau} = \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*^2} s_* - f_0 - f_1 v - f_2 v^2. \quad (23)$$

Розпочнемо розв'язання сформульованої задачі з синтезу функції Лагранжа, яка для приведених вище умов набуває вигляду

$$L(\tau, u, i, v, s_*, \psi, u', i', v', s_*', \psi') = (1 - \alpha i) i + \lambda_1 \left(v' - \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{a^2 + b^2}{a^2 + b^2 s_*'^2} s_*' + f_0 + f_1 v' + f_2 v'^2 \right) + \lambda_2 (\psi' - v). \quad (24)$$

Оскільки функція Лагранжа (24) містить 4 залежних від відносного часу τ змінних s_* , v , i , ψ , то аби вони були екстремальними, як відомо, наприклад, з роботи [4], їх потрібно знаходити з системи рівнянь

$$\begin{cases} L_i - \frac{d}{d\tau} L_{i'} = 0, \\ L_v - \frac{d}{d\tau} L_{v'} = 0, \\ L_\psi - \frac{d}{d\tau} L_{\psi'} = 0, \\ L_{s_*} - \frac{d}{d\tau} L_{s_*'} = 0. \end{cases} \quad (25)$$

Беручи частинні похідні $L_i, L_{i'}, L_v, L_{v'}, L_\psi, L_{\psi'}, L_{s_*}, L_{s_*'}$ від функції Лагранжа (24) по відповідним змінним, позначеним в нижніх індексах цих частинних похідних, і підставляючи отримані вирази в систему рівнянь (25), отримаємо цю систему рівнянь у вигляді

$$\begin{cases} 1 - 2\alpha i - \lambda_1 \frac{(a^2 + b^2) s_*}{a^2 + b^2 s_*'^2} \frac{1}{\sqrt{i^2 + 1}} = 0, \\ \lambda_1 (f_1 + 2f_2 v) - \lambda_2 - \frac{d\lambda_1}{d\tau} = 0, \\ -\frac{d\lambda_2}{d\tau} = 0, \\ -\lambda_1 \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) \frac{(a^2 + b^2)(a^2 - b^2 s_*'^2)}{(a^2 + b^2 s_*'^2)^2} = 0. \end{cases} \quad (26)$$

З урахуванням того, що

$$\begin{cases} a^2 + b^2 s_*'^2 \neq 0, \\ \sqrt{i^2 + 1} \neq 0, \end{cases} \quad (27)$$

систему рівнянь (26) можна трансформувати у систему рівнянь

$$\begin{cases} (a^2 + b^2 s_*'^2) \sqrt{i^2 + 1} (1 - 2\alpha i) - \lambda_1 (a^2 + b^2) s_* = 0, \\ \frac{d\lambda_1}{d\tau} - \lambda_1 (f_1 + 2f_2 v) + \lambda_2 = 0, \\ -\frac{d\lambda_2}{d\tau} = 0, \\ -\lambda_1 \ln\left(i + \sqrt{i^2 + 1}\right) (a^2 + b^2) (a^2 - b^2 s_*'^2) = 0, \end{cases} \quad (28)$$

яка матиме ті ж розв'язки, що і система (26).

З третього рівняння системи (28) маємо

$$\lambda_2 = -C_2, \quad (29)$$

де C_2 — поки що невідома константа, підставляючи яку в друге рівняння системи (28), отримаємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку

$$\frac{d\lambda_1}{d\tau} - (f_1 + 2f_2v)\lambda_1 = C_2, \quad (30)$$

розв'язком якого є функція

$$\lambda_1(\tau) = C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2\int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2v}, \quad (31)$$

де C_1 — ще одна поки що невідома константа.

Підставляючи вираз (31) у перше та четверте рівняння системи (28), отримаємо еквівалентну їй систему, але уже лише двох рівнянь:

$$\begin{cases} (a^2 + b^2 s_*^2) \sqrt{i^2 + 1} (1 - 2\alpha i) - \left(C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2\int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2v} \right) (a^2 + b^2) s_* = 0, \\ - \left(C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2\int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2v} \right) \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) (a^2 + b^2) (a^2 - b^2 s_*^2) = 0. \end{cases} \quad (32)$$

Розглянемо друге рівняння системи (32). Оскільки, як легко переконатись, аналізуючи вираз (31)

$$\lambda_1(\tau) \neq 0 \quad \text{для} \quad \forall \tau \geq 0, \quad (33)$$

то друге рівняння системи (32) може виконуватись лише за умови

$$a^2 - b^2 s_*^2 = 0, \quad (34)$$

з якої випливає, що

$$s_* = \frac{a}{b}. \quad (35)$$

Підставляючи вираз (35) в перше рівняння системи (32) та в рівняння динаміки (23), отримаємо систему двох рівнянь з двома залежними від відносного часу τ невідомими i , v :

$$\begin{cases} 2a\sqrt{i^2 + 1} (1 - 2\alpha i) - \left(C_1 e^{(f_1\tau + 2f_2\int v d\tau)} - \frac{C_2}{f_1 + 2f_2v} \right) \frac{(a^2 + b^2)}{b} = 0, \\ \frac{dv}{d\tau} = \ln(i + \sqrt{i^2 + 1}) \frac{(a^2 + b^2)}{2ab} - f_0 - f_1v - f_2v^2, \end{cases} \quad (36)$$

на розв'язках яких

$$i = i(C_1, C_2, \tau), \quad v = v(C_1, C_2, \tau) \quad (37)$$

досягатиметься мінімум функціоналу (8) в умовах дії обмежень (9), (10).

Матеріал, щодо чисельного визначення констант C_1, C_2 в рівняннях системи (36) та розроблення алгоритму розв'язання цієї системи рівнянь, а також синтезу закону регулювання частоти змінного струму в обмотці статора тягового АД для формування екстремалей (37), буде викладений у наступній статті.

Висновки

1. Показано, що результати, отримані вченими в дослідженнях з розв'язання задачі частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, оптимального за критерієм мінімуму електричних втрат, вимагають суттєвої корекції, оскільки вони отримані з використанням математичної моделі кривої намагнічування, апроксимованої двома відрізками прямих, верхній з яких проходить паралельно осі струму, що не відповідає фізичним умовам ре-

льного функціонування асинхронних електричних машин і вимагає стабілізації магнітного потоку в зазорі на рівні, який задається горизонтальним відрізком кривої намагнічування, незалежно від змін частоти струму в обмотці статора.

2. Запропоновано розв'язувати задачу оптимального за критерієм мінімуму втрат електричної енергії частотного керування режимами роботи короткозамкнутого асинхронного електродвигуна, який є тяговим в системі привода електромобіля, з використанням математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса, що з високою точністю зв'язує між собою електричний струм в обмотці статора асинхронного двигуна з магнітним потоком, який створюється полем цього струму, а тому відповідає фізичним умовам реального функціонування асинхронних електричних машин.

3. Наведені результати розв'язання задачі оптимального частотного керування режимами короткозамкнутого асинхронного електродвигуна в умовах його роботи в якості тягового в системі привода електромобіля, які отримані із застосуванням варіаційного варіанта методу Лагранжа та математичної моделі кривої намагнічування у вигляді оберненого гіперболічного синуса і які приводять до поля екстремалей в координатах відносний час, відносна швидкість руху електромобіля та відносний струм в обмотці статора його приводного електродвигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. А. Лобатюк, О. Б. Мокін, та Б. І. Мокін, *Математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2019.
- [2] В. А. Вартабедян, *Загальна електротехніка. Навчальний посібник*, 4-е вид., перероб. і доп. В. А. Вартабедян. Київ, Україна: Вища школа, 1986, 359 с.
- [3] Alfredo Munoz-Garcia, Thomas A. Lipo, and Donald W. Novotny. "A New Induction Motor V/f Control Method Capable of High-Performance Regulation at Low Speeds," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 34, no. 4, July/August 1998.
- [4] Ю. П. Петров, *Вариационные методы теории оптимального управления*. Москва-Ленинград: Энергия, 1965, 220 с.
- [5] О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, та Д. А. Шокар'єв, «До питання про характеристики частотно-регульованого електропривода з короткозамкнутим асинхронним електродвигуном,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 35-39, 2015.
- [6] Б. І. Мокін, та О. Б. Мокін, «Математичні моделі характеристики намагнічування електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням та їх порівняльний аналіз,» *Вісник КрДПУ*, вип. 3, 2005.
- [7] В. Г. Герасимова, и др., «Электромеханические устройства,» в *Электротехнический справочник*, в 3-х т. Под общ. ред. проф. МЭИ В. Г. Герасимова, 6-е изд., испр. и доп. Москва: Энергоиздат, 1981, т. 2, 640 с.
- [8] И. Н. Бронштейн, и К. А. Семендяев, *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов*. Москва: Наука, 1967, 608 с.

Мокін Борис Іванович — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем та комплексів; професор кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: borys.mokin@gmail.com ;

Мокін Олександр Борисович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, e-mail: abmokin@gmail.com ;

Горенюк Вадим Вікторович — аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем та комплексів, e-mail: gvv.ghost@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

B. I. Mokin¹
O. B. Mokin¹
V. V. Horeniuk¹

On the Issue of Optimization of Electric Car Movement with Asynchronous Electric Drive

¹Vinnitsia National Technical University

It is shown that the results obtained in the research of a number of scientists devoted to solving the problem of frequency control of the modes of operation of a Squirrel-cage induction motor, optimal for the criterion of minimum electrical losses, require significant correction, since they are obtained using a mathematical model of the magnetization curve approximated by two straight line segments, the top of which runs parallel to the axis of current that does not meet the physical conditions of the real functioning of induction machines and requires a stabilization of the magnetic flux in the gap at a level that is

specified horizontal magnetization curve regardless of changes in frequency current in the stator winding. It is proposed to solve the problem of the optimal criterion for minimizing the losses of electric energy of frequency control of the modes of operation of a Squirrel-cage induction motor, which is a traction in the electric car, using a mathematical model of the magnetization curve in the form of an inverse hyperbolic sinus, which, with high accuracy, binds the electric current in the stator winding of the induction motor with a magnetic flux created by the field of this current, and therefore corresponds to the physical conditions of the real functioning of induction machines. Presented the results of the solution of the problem of optimal frequency control by the modes of a Squirrel-cage induction motor in the conditions of its work as a traction in the electric car motor drive system obtained using the Lagrange variational method option and the mathematical model of the magnetization curve in the form of an inverse hyperbolic sinus and which lead to the field of extremals in coordinates relative time, relative velocity of electric vehicle and relative current in winding of a stator of its driving electric motor.

Keywords: squirrel-cage induction motor, electric car drive, frequency control, optimization of modes, accumulator battery, minimum energy loss criterion.

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Renewable Energy and Transport Electrical Systems and Complexes, Professor of the Chair of System Analysis, Computer Monitoring and Engineering Graphics, e-mail: borys.mokin@gmail.com ;

Mokin Oleksandr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of System Analysis, Computer Monitoring and Engineering Graphics, e-mail: abmokin@gmail.com ;

Horeniuk Vadym V. — Post-Graduate Students of the Chair of Renewable Energy and Transport Electrical Systems and Complexes, e-mail: gvv.ghost@gmail.com

Б. И. Мокин¹
О. Б. Мокин¹
В. В. Горенюк¹

К вопросу об оптимизации движения электромобилей с асинхронным электроприводом

¹Вінницький національний технічний університет

Показано, что результаты, полученные в исследованиях ряда ученых, посвященных решению задачи частотного управления режимами работы короткозамкнутого асинхронного электродвигателя, оптимального по критерию минимума электрических потерь, требуют существенной коррекции, поскольку они получены с использованием математической модели кривой намагничивания, аппроксимированной двумя отрезками прямых, верхний из которых проходит параллельно оси тока, не соответствует физическим условиям реального функционирования асинхронных электрических машин и требует стабилизации магнитного потока в зазоре на уровне, который задается горизонтальным отрезком кривой намагничивания, независимо от изменений частоты тока в обмотке статора. Предложено решать задачу оптимального по критерию минимума потерь электрической энергии частотного управления режимами работы короткозамкнутого асинхронного электродвигателя, который является тяговым в системе привода электромобиля с использованием математической модели кривой намагничивания в виде обратного гиперболического синуса, которая с высокой точностью связывает между собой электрический ток в обмотке статора асинхронного двигателя с магнитным потоком, который создается полем этого тока, а потому отвечает физическим условиям реального функционирования асинхронных электрических машин. Приведены результаты решения задачи оптимального частотного управления режимами короткозамкнутого асинхронного электродвигателя в условиях его работы в качестве тягового в системе привода электромобиля, полученные с применением вариационного варианта метода Лагранжа и математической модели кривой намагничивания в виде обратного гиперболического синуса и которые приводят в поле экстремалов в координатах относительное время, относительную скорость движения электромобиля и относительный ток в обмотке статора его приводного электродвигателя.

Ключевые слова: короткозамкнутый асинхронный электродвигатель, привод электромобиля, частотное управление, оптимизация режимов, аккумуляторная батарея, критерий минимума потерь электрической энергии.

Мокин Борис Иванович — академик НАПН Украины, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, профессор кафедры системного анализа, компьютерного мониторинга и инженерной графики, e-mail: borys.mokin@gmail.com ;

Мокин Александр Борисович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры системного анализа, компьютерного мониторинга и инженерной графики e-mail: abmokin@gmail.com ;

Горенюк Вадим Викторович — аспирант кафедры возобновляемой энергетики и транспортных электрических систем и комплексов, e-mail: gvv.ghost@gmail.com