

Б. Є. Журиленко, канд. фіз.-мат. наук, стар. наук. співроб., доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-2980-5630
e-mail zhurylenko@gmail.com

К. І. Ніколаєв, Avery Dennison Reflective Solutions,
Willem Einthovenstraat 11, 2342 BH Oegstgeest, The Netherlands
e-mail amidaf@mail.ru

Н. К. Ніколаєва,
Національний авіаційний університет
e-mail nnikolaeva1717@gmail.com

ЗМІНА КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ЕКОНОМІЇ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

Вступ

На сьогодні транспортні системи широко використовують електричні машини, які покращують екологічну обстановку і сприяють економії нафтових ресурсів.

Починає широко використовуватися електроенергія в легковому автомобільному транспорті у вигляді гібридних авто і електромобілів [1; 2]. Застосовуються електродвигуни і в авіації.

Останнім часом значного розвитку набули малі безпілотні літальні апарати (БПЛА), у яких найчастіше як двигуни використовують електричні машини з повітряними гвинтами.

Здійснено спробу створення літака на електродвигунах з автономними джерелами живлення, які мають підзарядження від фотоелементів по крилах і корпусу літака.

Останні випробування показали, що для такої конструкції літак здійснив досить тривалий переліт. Швейцарський літак «Solar Impulse 2» на сонячних батареях в 2015–2016 рр. облетів навколо світу з проміжними зупинками.

Відсутність автономних енергоємних джерел живлення зі швидким підзарядженням перешкоджає розвитку транспорту з використанням електроенергії.

Але навіть наявність енергоємних джерел живлення не виключає розгляду проблеми економічного використання електроенергії при експлуатації електричних транспортних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існують три основні схеми пристроїв автомобільних гібридних силових установок [1]: послідовна, паралельна і змішана.

Послідовна гібридна схема з'явилася першою в 1899 р., але в сучасних легкових автомобілях застосовується рідко. У послідовній схемі (рис. 1) колесам надає рух електромотор, а малолітражний двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) обертає генератор, що виробляє електроенергію.

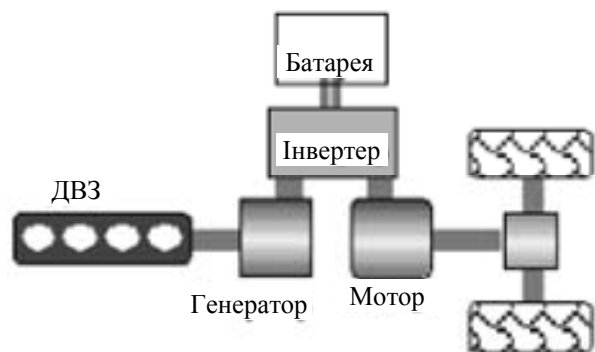


Рис. 1

Тут відсутня необхідність в коробці передач і потужному двигуні внутрішнього згоряння але потрібні акумулятори великої ємності.

Найпоширеніша зараз схема — паралельна. Вона запатентована ще в 1905 р. Генрі Піпером. Їй відповідають майже всі існуючі гібриди. Вони оснащуються потужним електромотором, який допомагає двигуну внутрішнього згоряння під

час розгону, а при гальмуванні накопичує рекуперативну енергію. Як трансмісію, переважно, використовують варіатор або планетарну передачу.

Поширені також змішані або, як їх ще називають, *послідовно-паралельні гібриди*. Класичні представники цієї сім'ї оснащені фірмовим «синергічним» приводом HSD (*Hybrid Synergy Drive*). Завдяки планетарній передачі виникає синергія — взаємодія двигуна внутрішнього згоряння і електромотора. Тут ДВЗ обертає колеси спільно з електромотором, одночасно обертаючи генератор. У традиційній коробці передач немає необхідності: електроніка регулює оберти моторів і генератора, перетворюючи таку систему на безступінчасту трансмісію.

На відміну від автомобільної схеми силової установки (рис. 1) електричні системи літака і БПЛА можуть містити генератор на сонячних елементах (як у випадку з «Solar Impulse 2»), батарею (акумулятор), інвертор, електродвигун з повітряним гвинтом. У даний час в БПЛА використовуються переважно тільки батарея, інвертор, електродвигун з повітряним гвинтом.

Мета роботи (постановка завдання). Зміна конструкції електродвигуна з метою підвищення коефіцієнта корисної дії та економії електроенергії в послідовній гібридній схемі, оскільки вона найбільш просто і дешево може бути реалізована в виробництві.

Виклад основного матеріалу

У зв'язку з метою роботи розглянемо модернізацію конструкції електричного двигуна БПЛА, літаків і електромобілів з метою економії енергоресурсів автономних джерел живлення.

Різні сили, що діють на повітряний гвинт літака або БПЛА, показані на рис. 2, де позначено: a — схема аеродинамічних сил, що діють на лопаті повітряного гвинта в польоті; $F_{св}$ — результуюча сила опору гвинта за кутової швидкості обертання ω ; R — результуюча аеродинамічна сила; F_m — результуюча тягова сила; F_c — сила обертання гвинта від електродвигуна, що компенсує силу опору $F_{св}$; НП — напрямком польоту; r_m — радіус до точки докладання тягової сили; r_{p2} — максимальний радіус повітряного гвинта; b — двигун НК-93.

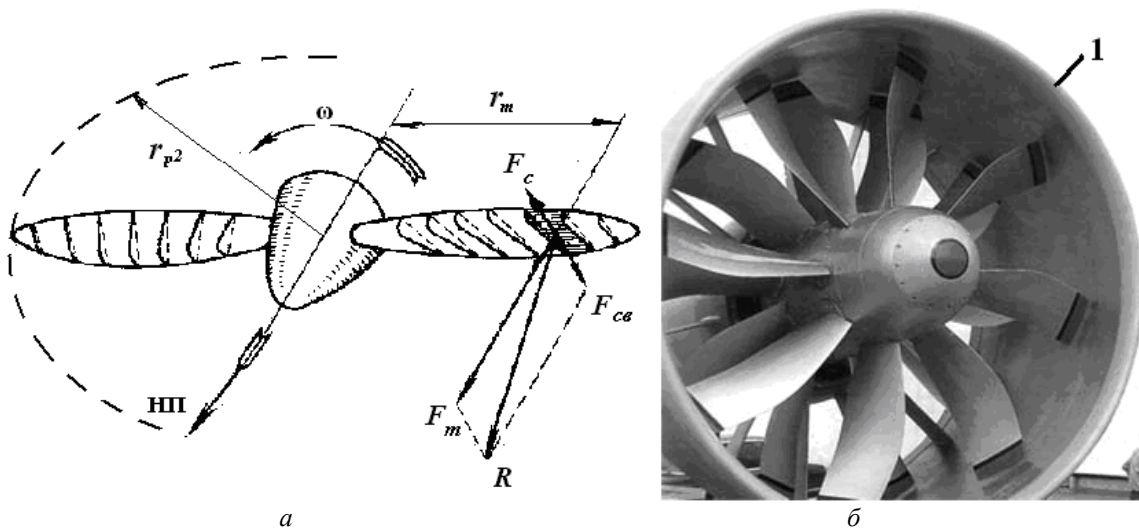


Рис. 2

Результуюча сила опору обертанню $F_{св}$ спрямована проти напрямку обертання гвинта [3; 4]. Щоб гвинт обертався з кутовою швидкістю ω , необхідно компенсувати результуючу силу опору обертанню силою F_c , яка розвивається електродвигуном. У результаті обертання гвинта виникають результуюча аеродинамічна сила R і результуюча тягова сила F_m . Із рис. 2, a і розрахунків для гвинта випливає, що результуюча аеродинамічна сила R прикладена всередині лопаті повітряного гвинта.

Розглянемо електродвигун потужністю P і гвинт БПЛА або літака, який повинен розвивати тягову силу F_m з результуючою силою опору

обертання $F_{св}$ за кутової швидкості обертання ротора ω .

Для компенсації результуючої сили опору необхідно, щоб електродвигун розвинув силу обертання $F_c = F_{св}$ з моментом

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (1)$$

Цей повний механічний момент буде постійним в усіх точках ротора і повітряного гвинта. Визначимо обертаючу силу F_c , яка повинна забезпечити необхідну тягову силу повітряного гвинта за постійної швидкості його обертання:

$$M_m = F_m r_p = F_c r_m, \quad (2)$$

де F_m — повна механічна сила на роторі, що виникає під дією електромагнітної сили; r_p — радіус ротора, на якому діє електромагнітна сила; r_m — радіус, на якому забезпечується необхідна тягова сила. Звідси

$$F_c = \frac{F_m r_p}{r_m}. \quad (3)$$

З цього виразу видно, що за постійної електромагнітної сили і однакою кутовою швидкості тягова сила обертання буде залежати від співвідношень радіуса ротора двигуна і радіуса до точки прикладання тягової сили. Причому, якщо радіус ротора буде більше радіуса точки тягової сили, то в цьому випадку можна отримати виграш у тяговій силі при одній і тій самій прикладеній електромагнітній силі.

У даний час в повітряних гвинтах БПЛА і літаках радіус ротора електродвигуна менше радіуса прикладеної тягової сили на лопаті гвинта. Якщо ротор електродвигуна виконати у вигляді кільця, що з'єднує верхні кінці повітряного гвинта по радіусу r_{p2} , тобто щоб ротор розташовувався по пунктирній лінії (рис. 2, а), то для літака з електродвигуном або БПЛА з'являється можливість економії енергоресурсу автономного джерела живлення при обраній силі тяги F_m . Тому пропонується відповідно з рис. 2, б розташувати обмотки статора в кожусі l обтічника вентилятора. Як в двигуні НК-93, можна розмістити і два статора для забезпечення обертання вентиляторів в різні боки і з різною швидкістю для зменшення ефекту замикання. У цьому випадку немає необхідності використовувати складні редукторні системи, які застосовуються в двигуні НК-93. Якщо використовувати асинхронний двигун, то ротор можна виконати у вигляді «білячої клітини» з кільцевим магнітопроводом, які розташовано на кінцях вентилятора, а для БПЛА — з постійними магнітами [5]. Як повітряні рушії, окрім повітряних гвинтів і вентиляторів, можуть застосовуватися імпелери. Для асинхронних модернізованих двигунів регулювання швидкості обертання вентиляторів можна здійснити за допомогою перетворювача частоти. Можливе застосування і інших електродвигунів, але конструкція повинна бути такою, щоб забезпечити радіус ротора більше радіуса прикладеної тягової сили.

Використання такої конструкції електродвигунів дозволить збільшити коефіцієнт корисної дії повітряного гвинта і час польоту літаків і БПЛА, тобто дозволить заощадити електроенергію автономних джерел живлення.

Розглянемо, у скільки разів зміниться час роботи асинхронного електродвигуна, статор якого

розташований в обтічнику, а ротор виконаний у вигляді «білячої клітини» і кільцевих магнітопроводів, які з'єднують кінці вентилятора (рис. 2). Передбачається, що електродвигун живиться від автономного джерела з електронним перетворювачем.

З теорії електродвигунів [6] відомо, що обертає момент асинхронного двигуна визначається виразом

$$M = C_m \Phi I \cos \psi, \quad (4)$$

де C_m — конструктивний параметр (електромашинна постійна), який є постійним для кожного певного типу двигуна; Φ — магнітний потік; I — струм в роторі двигуна; ψ — кут між ЕРС і струмом.

З виразу (4) визначимо механічну силу створювану струмом I в роторі двигуна. Для цього магнітний потік висловимо так

$$\Phi = \alpha \frac{\pi r_p}{p} l B, \quad (5)$$

де p — число пар полюсів; l — довжина активної частини провідників роторів; B — магнітна індукція в повітряному зазорі двигуна; α — розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги.

Із виразів (4) і (5) при постійному радіусі точки прикладання і величини тягової сили отримаємо співвідношення електромагнітних сил для різних радіусів роторів:

$$M_1 = C_m \alpha \frac{\pi r_{p1}}{p} l B I_1 \cos \psi; \quad (6)$$

$$M_2 = C_m \alpha \frac{\pi r_{p2}}{p} l B I_2 \cos \psi,$$

де I_1 і I_2 — величини струмів роторів з малим r_{p1} і великим r_{p2} радіусами відповідно.

Як указувалося в рівнянні (2) за однакою тяговою силою і кутовою швидкості обертання повітряного гвинта моменти повинні бути рівні, тобто $M_1 = M_2$.

Якщо в обох випадках довжини провідників, магнітної індукції, розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги і конструктивний параметр для електродвигунів однакові, то, порівнявши в (6) вираження для моментів, отримаємо струм споживаний двигуном з великим радіусом:

$$I_2 = \frac{I_1 r_{p1}}{r_{p2}}. \quad (7)$$

Із виразу (7) видно, що чим більше радіус ротора двигуна, тим менше потрібний струм для створення необхідної тягової сили.

Відомо, що ємність автономних джерел живлення — C , наприклад, акумуляторів, визначається в ампер-годинах. Отже, можна знайти у скільки разів час роботи електродвигуна H з ве-

ликим радіусом ротора буде працювати довше порівняно з меншим радіусом ротора

$$H = \frac{C}{I_2} = \frac{C r_{p2}}{I_1 r_{p1}}. \quad (8)$$

Таким чином, двигун з великим ротором буде працювати в r_{p2}/r_{p1} довше.

У разі зміни конструкції електродвигуна необхідно, щоб його робочі властивості відповідали попередньому електродвигуну, тобто щоб обидва двигуни мали однакові механічні характеристики, а саме електромагнітні моменти. Як видно з виразу (4), обертовий електромагнітний момент зумовлений тільки активною складовою струму ротора. Однією з умов виникнення магнітного моменту в асинхронній машині є наявність активного опору ротора R_2 , який визначає залежність моменту від ковзання, тобто визначає робочі властивості асинхронної машини. Залежність електромагнітного моменту від електричних параметрів двигуна при збереженні таких параметрів, як кількість фаз, кількості пар полюсів, напруги і частоти, що подається на двигун, ковзання, моменту при малому ковзанні буде залежати, в основному, від активного опору ротора. З іншого боку за малих ковзань $\cos\psi$ в (4) можна приблизно вважати рівним одиниці. Тоді згідно [6], можемо записати вираз для струму в колі ротора у вигляді

$$I_2 = \frac{4,44 s k_{\text{об2}} w_2 f_1 \Phi}{\sqrt{R_2^2 + (s x_2)^2}}, \quad (9)$$

де s — ковзання; $k_{\text{об2}}$ — обмотувальний коефіцієнт ротора; w_2 — число витків ротора в фазі; f_1 — частота живильної мережі; R_2 , x_2 — активний і реактивний опір ротора відповідно.

Порівнюючи струми з однаковою обраною тяговою силою для електродвигунів з малим і великим ротором, отримаємо

$$\frac{I_{22}}{I_{21}} = \frac{k_{\text{об22}} w_{22} R_{21}}{k_{\text{об21}} w_{21} R_{22}} = \frac{r_{p2}}{r_{p1}}, \quad (10)$$

де другий індекс в позначеннях параметрів: 1 — належить двигуну з малим радіусом ротора, а 2 — до електродвигуна з великим радіусом ротора.

Очевидно, що зі збільшенням розміру ротора параметри в формулі (10) будуть змінюватися, а для збереження механічної характеристики зміненого електродвигуна опори роторів повинні бути однакові, то визначимо, як має змінитися перетин провідників ротора.

Вважаючи, що питомий активний опір провідників з одного і того самого матеріалу мало змінюється від його перетину, отримаємо вираз для збільшення перерізу провідників великого ротора щодо до малого ротора

$$S_{\text{сеч2}} = \frac{k_{\text{об21}} w_{21} l_2 r_{p1}}{k_{\text{об22}} w_{22} l_1 r_{p2}} S_{\text{сеч1}}, \quad (11)$$

де $S_{\text{сеч1}}$, $S_{\text{сеч2}}$ — переріз провідників ротора малого і великого розміру відповідно; l_1 , l_2 — довжина провідників ротора в фазі малого і великого розміру ротору відповідно.

Аналогічним чином обчислюються індуктивні опори роторів.

Таким чином, якщо виконати вимоги рівності активних і реактивних опорів обмоток ротора, то після зміни конструкції електродвигуна можна зберегти механічні характеристики електродвигуна.

Розглянемо модернізацію електродвигуна для електромобілів. Під час руху автомобіля тягова сила на ведучих колесах у кожний даний момент дорівнює сумі зовнішніх сил опору, тобто силі опору коченню, силі опору повітря, силі опору підйому і силі опору розгону. Якщо цю рівність записати у вигляді формули, то можна отримати тяговий баланс автомобіля. В автомобілях зміна тягової сили, підводиться до ведучих коліс, залежить від швидкості руху автомобіля і передачі в коробці передач. Максимальна тягова сила досягається на першій передачі. На кожній з передач тягова сила має максимальне значення при певній швидкості, знижуючись далі з підвищенням швидкості руху. Такий характер зміни тягової сили визначається характером зміни крутного моменту M_c ДВЗ залежно від швидкості обертання колінчастого вала.

Облік усіх сил, що діють на автомобіль, дозволяє заздалегідь розрахувати експлуатаційні якості автомобіля. Для двигунів внутрішнього згоряння це ж можна зробити, розглядаючи не силу, а потужність двигуна. Рух автомобіля відбувається за рахунок потужності, одержуваної від двигуна. Потужність двигунів внутрішнього згоряння змінюється залежно від кількості палива, що подається в камеру згоряння, і, як наслідок, швидкості обертання колінчастого вала. В даному випадку від швидкості змінюється і крутний момент. Оскільки автомобіль — це комплексний механізм, на крутний момент двигуна впливає ряд характеристик інших вузлів і агрегатів. Провідні колеса автомобіля будуть отримувати максимальне тягове зусилля лише в той момент, коли взаємодія механізмів є оптимальною. Пік крутного моменту досягається на таких оборотах двигуна, коли наповнення камери згоряння робочою сумішшю, спалювання продуктів горіння і висновок відпрацьованих газів здійснюються з мінімальними механічними втратами. Для кожного двигуна цей параметр коливається залежно від конструктивних особливостей і типу вико-

ристовуваного палива. Так само відомо, що тягове зусилля на колесах не прямо пропорційно кількості оборотів або потужності. Двигун досягає піку крутного моменту і піку потужності на різних оборотах.

Щоб зменшити недоліки двигуна внутрішнього згоряння, використовують електродвигуни в автомобільному транспорті. Це дозволяє отримати підвищений крутний момент за нульових оборотах ротора — відразу при включенні електродвигуна. Отже, уже на місці при включенні електромоторів можна отримати підвищений крутний момент на колесах без використання механічних передач для зміни тягового моменту.

У даний час в електромобілях і гібридних автомобілях, щоб максимально збільшити тяговий момент, електродвигун розміщують в колесі [1]. Однак при розміщенні в колесі електродвигуна у відповідність з виразом (3) не можна істотно збільшити тяговий момент через наявність на колесі покришки, як в БПЛА і літаках, і, отже, здійснити значну економію електроенергії порівняно з існуючими конструкціями. Щоб отримати вигаши і економію енергоспоживання, необхідно дещо змінити конструкцію електродвигуна гібридного автомобіля. Наприклад, у цьому випадку необхідно виготовити електродвигун з діаметром ротора якомога більше діаметра колеса з покришкою. Практично виконати ці вимоги можна, якщо електродвигун зробити більш плоским і розмістити його горизонтально під капотом. Для передачі тягового моменту від такого двигуна на колеса можна використовувати диференціальну механічну передачу.

Висновки

У результаті модернізації конструкції електродвигунів БПЛА, літаків, електромобілів і гібридних автомобілів показана можливість вигаши в тяговій силі при обраному електромагнітному моменті, або в економії електроенергії на обраній тяговій силі і кутовій швидкості обертання ротора електродвигуна або гвинта. Показано, що відбувається зменшення споживання електроенергії, якщо радіус ротора електродвигуна перевищує радіус рушія. Причому, при використанні акумуляторних батарей, тривалість роботи джерел живлення збільшиться пропорційно відношенню їх радіусів ротора до рушія.

Результати даної роботи більшою мірою актуальні для літакових електродвигунів і БПЛА, тому що на практиці реалізація великого радіуса ротора електродвигуна літака або БПЛА до радіуса тягової сили вентилятора буде набагато простіше.

У цьому випадку в профільному корпусі встановлюється статор електродвигуна, а вентилятор виготовляється у вигляді ротора (рис. 2, б). Швидкість обертання лопатей двоядного вентилятора може регулюватися спеціальними перетворювачами — інверторами від автономного джерела живлення.

Перспективи подальших досліджень

Результати виконаної роботи можуть використовуватися при конструюванні електродвигунів для електромобіля і гібридного автомобільного транспорту.

У цьому випадку також необхідно дотриматися умови, щоб радіус ротора двигуна був більше радіуса колеса автомобіля. В принципі ці умови при конструюванні електродвигуна можуть бути виконані.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Токмаков Н. М.** Гибридный автомобиль [Электронный ресурс]. — 2011. — Режим доступа к ресурсу: http://e.cargarages.ru/index.php?sa=X&topic=186.0&ved=0CCMQ9QEoADAMOGRqFQoTCPrv77b3_MYCFUG-FAodZLQKHQ.
2. **Захаренко А. Б.** Оптимизация проектирования тихоходного вентиляционного двигателя с двумя индукторами для привода мотор-колеса / А. Б. Захаренко, А. Ф. Авдонин // Электротехника, 1999. — № 12. — С. 6–13.
3. **Надеждин Н.** Расчет воздушных винтов /по материалам П. И.Чумак, В. Ф.Кривокрысенко «Расчет и проектирование СЛА» [Электронный ресурс]. — Режим доступа к ресурсу: <http://stroimsamolet.ru/025.php>.
4. **Левшонков Н. В.** Методика проекторночного расчета и оптимизации воздушного винта при определении летных характеристик многорежимных летательных аппаратов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.dis.konflib.ru/dissertatsiya-mashinostroenie/2309-1-metodika-proektirovochnogo-rascheta-optimizacii-vozdushnogo-vinta-pri-opredelenii-letnih-harakteristik-mnogorezhimnih-letat.php>.
5. Мотор двигатель прямой привод LG Direct Drive [Электронный ресурс]. — 2017. — Режим доступа: https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjv8vCEjafUAhUC1iwKHVEUDzsQFgguMAA&url=http://www.olx.ua/%2Fobyavlenie/%2Fmotor-dvigatel-pryamoy-privod-lg-direct-drive-IDaa5B9.html&usq=AFQjCNGWBdZpj8anjn-f9FcaTh6zjURJRA&sig2=CjIfV7_flmiUR16tFyHuHQ
6. **Комисар М. И.** Авиационные электрические машины и источники питания / М. И. Комисар. — М. : Машиностроение. — 1975. — 496 с.

Журиленко Б. Є., Ніколаєв К. І., Ніколаєва Н. К.
ЗМІНА КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ЕКОНОМІЇ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

Розглянуто можливість модернізації конструкції електродвигуна для гібридного автомобіля, безпілотного літального апарату (БПЛА), літака і іншого транспорту з метою економії енергоресурсу автономного джерела живлення. Теоретичні розрахунки показали, що в разі розглянутої модернізації з'являється можливість забезпечити вигоди в тяговій силі при однаковому електромагнітному моменті, або економії електроенергії на тій же тяговій силі при одній і тій же кутовій швидкості обертання ротора електродвигуна або гвинта. В результаті зміни конструкції електродвигуна відбувається зменшення споживання електроенергії і, отже, збільшення часу його роботи від автономного джерела живлення, якщо радіус ротора модернізованого електродвигуна перевищує радіус рушії. Запропоновано варіанти модернізації електродвигунів для БПЛА і літаків, а також електромобілів для підвищення економії електроенергії на транспорті.

Ключові слова: електромобіль, літак, безпілотний літальний апарат, тягова сила.

Zhurilenko B. E., Nikolaev K. I., Nikolaeva N. K.
CHANGING THE DESIGN OF ELECTRIC MOTORS TRANSPORT SYSTEMS IN ORDER TO SAVE ENERGY RESOURCES OF AUTONOMOUS POWER SUPPLIES

In the article the possibility of modernization the design of an electric motor for a hybrid vehicle, an unmanned aerial vehicle (UAV), an aircraft and other transport systems in order to save the energy resources of an autonomous power supply are considered. Theoretically, the possibility of saving energy in the case of constant traction and rotor speed of the electric motor or increasing traction power with constant electromagnetic moment is shown. The constructional changes of the motor, specifically adjusting the radius of rotor to exceed the radius of the thruster, lowers the energy consumption of the motor and by that increases its operational time while keeping the same power source. The variants of modernization of electric motors for UAVs and planes, as well as electric vehicles for increasing energy saving in transport are offered.

Keywords: electric car, airplane, unmanned aerial vehicle, traction forcer.

Журиленко Б. Е., Николаев К. И., Николаева Н. К.
ИЗМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ЦЕЛЬЮ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Рассмотрена возможность модернизации конструкции электродвигателя для гибридного автомобиля, беспилотного летательного аппарата (БПЛА), самолета и другого транспорта с целью экономии энергоресурса автономного источника питания. Теоретические расчеты показали, что в случае рассмотренной модернизации появляется возможность обеспечить выгоды в тяговой силе при одинаковом электромагнитном моменте, либо экономии электроэнергии на той же тяговой силе при одной и той же угловой скорости вращения ротора электродвигателя или винта. В результате изменения конструкции электродвигателя происходит уменьшение потребления электроэнергии и, следовательно, увеличение времени его работы от автономного источника питания, если радиус ротора модернизированного электродвигателя превышает радиус движителя. Предложены варианты модернизации электродвигателей для БПЛА и самолетов, а также электромобилей для повышения экономии электроэнергии на транспорте.

Ключевые слова: электромобиль, самолет, беспилотный летательный аппарат, тяговая сила.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2018 р.
Прийнято до друку 28.02.2018 р.
Рецензент — д-р техн. наук, проф. Юн Г. М.