

Електродвигун з економією електроенергії джерел автономного живлення

Виконано порівняння електричних і динамічних параметрів різних конструкцій електродвигунів з великим і малим радіусами роторів з метою економії електроенергії автономного джерела живлення для електроавтомобіля, безпілотного літального апарату, літака, підводного човна. В результаті порівняння теоретично показана можливість підвищення електричних або динамічних параметрів електродвигуна у разі збільшення радіусу ротора або використання пустотілого циліндричного ротора.

Сьогодні транспорт розвивається у напрямку використання електричних машин. Електродвигуни використовуються в такому легковому автомобільному транспорті, як електромобілі, а також в авіації, безпілотних літальних апаратах (БПЛА) і підводних човнах.

Розвиток електротранспорту стикається з необхідністю мати автономні енергоємні джерела живлення великої ємності, що мають швидко підзарядку акумуляторних батарей. Але це не виключає питань економічного використання електроенергії в процесі експлуатації електротранспортних систем.

Якщо розглянути електродвигун з радіусом ротору r_m , який розвиває обертальну силу F_m з моментом M , і двигун з рівним йому моментом M , який повинен розвивати обертальну силу F_c на радіусі r_c , то можна отримати вираз залежності прикладеної обертальної сили від радіусу ротору

$$F_c = \frac{F_m \cdot r_m}{r_c} \quad (1)$$

З (1) видно, що при зростанні радіусу ротора двигуна $r_c > r_m$ для однакового M , можна зменшувати обертальну силу прикладену до ротору двигуна в r_m / r_c разів.

З іншого боку відомо

$$M = k \cdot \Phi \cdot I \cdot \cos\psi = k \cdot 4 \cdot \pi \cdot I^2 \cdot \mu \cdot n \cdot 2 \cdot l \cdot r \cdot \cos\psi = F \cdot r = A \cdot I^2 \cdot r, \quad (2)$$

де k – конструктивна стала двигуна; I – струм ротора, зведений до обмотки статора; μ – магнітна проникність; n – кількість витків обмотки статора; l – довжина витків статора; r – радіус ротора; $A = k \cdot 4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot n \cdot 2 \cdot l \cdot \cos\psi$; $\cos\psi$ – кут зсуву між ЕРС і струмом ротора; F – обертальна сила прикладена до ротору. З цього виразу видно, що обертальна сила прикладена до ротора буде залежати від струму, а момент від квадрата струму і радіусу.

Теорія електродвигунів дозволяє визначити співвідношення величин струмів роторів з малим r_{p1} та великим r_{p2} радіусами. Враховуючи навантаження при однаковій кутовій швидкості обертання ω та те, що неможливо зробити електродвигуни з абсолютно однаковими параметрами, для порівняння двигунів моменти роторів з малим і великим радіусами повинні бути рівні,

тобто $M_1=M_2$, а, оскільки, $M_1=A_1 \cdot I_1^2 \cdot r_{p1}$ та $M_2=A_2^2 \cdot I_2^2 \cdot r_{p2}$, отримаємо струм споживаний двигуном з великим радіусом r_{p2} .

$$I_2 = \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \cdot \sqrt{\frac{r_{p1}}{r_{p2}}} \cdot I_1. \quad (3)$$

Струм для ротора з великим радіусом буде в $\sqrt{\frac{r_{p1}}{r_{p2}}}$ меншим, ніж для ротора з малим радіусом. Струм I_1 можна розрахувати з корисної потужності двигуна з малим радіусом.

Враховуючи струм контура намагнічування двигуна $I_{\mu 1}$ з малим радіусом ротора і $I_{\mu 2}$ – з великим радіусом, одержимо споживаний струм для двигуна з малим і великим роторами відповідно

$$\begin{aligned} I_1^* &= I_{\mu 1} + I_1 \\ I_2^* &= I_{\mu 2} + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \cdot \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \cdot I_1. \end{aligned} \quad (4)$$

З виразів (3), (4) видно, що чим більше радіус ротора двигуна r_2 , тим менше потрібен струм для створення необхідного моменту тягової сили.

Відомо, що ємність автономних джерел живлення – C , наприклад, акумуляторів, визначається в ампер-годинах. Отже, можна знайти час роботи електродвигунів t_1 і t_2 з малим та великим радіусами роторів

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{C}{I_1^*} = \frac{C}{I_{\mu 1} + I_1} \\ t_2 &= \frac{C}{I_2^*} = \frac{C}{I_{\mu 2} + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \cdot \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \cdot I_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Оскільки знаменник у t_2 менший, то час роботи електродвигуна з великим радіусом ротора працюватиме довше в порівнянні з меншим радіусом ротора. Отже, можна знайти у скільки разів час роботи електродвигуна з великим радіусом ротора буде працювати довше в порівнянні з меншим радіусом ротора

$$h_t = \frac{t_2}{t_1} = \frac{I_{\mu 1} + I_1}{I_{\mu 2} + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \cdot \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \cdot I_1}. \quad (6)$$

Розглянемо, як змінюється коефіцієнт корисної дії (ККД) від радіусу ротора. Корисна механічна потужність, що розвиває двигун буде для двигуна з малим ротором $P_1=M_1 \cdot \omega_1=A_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot \omega_1$, а з великим ротором $P_2=M_2 \cdot \omega_2=A_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \cdot \omega_2$. Повна потужність, що споживається електродвигуном з малим радіусом буде $P_1^*=U \cdot I_1^*$ і великим – $P_2^*=U \cdot I_2^*$. Отже ККД буде

$$\begin{aligned} \text{ККД}_1 &= \frac{A_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot \omega_1}{U \cdot (I_{\mu 1} + I_1)} \\ \text{ККД}_2 &= \frac{A_2 \cdot (\sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \cdot \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \cdot I_1)^2 \cdot r_2 \cdot \omega_2}{U \cdot (I_{\mu 2} + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \cdot \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \cdot I_1)}. \end{aligned} \quad (7)$$

В загальному випадку проаналізувати вираш в ККД дуже важко, тому зробимо деякі припущення, що не спотворює практичних результатів. Корисну механічну потужність для обох роторів оберемо однаково. Тоді $M_1 \cdot \omega_1 = M_2 \cdot \omega_2$. Струм I_1 для двигуна з малим ротором визначимо з рівняння потужності

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_1}{A_1 \cdot r_1 \cdot \omega_1}} \quad (8)$$

В цьому випадку виграв в ККД буде такий же, як для виграву в часі

$$h_{\text{ККД}} = \frac{h_{\text{ККД}2}}{h_{\text{ККД}1}} = \frac{I_{\mu 1} + I_1}{I_{\mu 2} + \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \cdot \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \cdot I_1} \quad (9)$$

Таким чином, двигун з більшим ротором працюватиме довше.



Рис1. Двигун НК-93

Реалізувати двигун з великим ротором можна, якщо його виконати із порожнистим ротором і статором, які розміщені в кожусі 1 рис.1. Як показано в роботах [1,2], якщо використовувати порожнистий ротор, тобто ротор та статор, виконані в кожусі рис.1, можна заощадити електроенергію та збільшити час роботи електродвигуна БПЛА, літака або іншої транспортної системи. Зауважимо, що в порівнянні енергетичних характеристик двигуна з циліндричним ротором і звичайним ротором, цікавими є його інерційні характеристики, від яких залежать їх динамічні властивості.

Наведемо моменти інерції для двигунів із суцільним ротором та з пустотілим циліндричним ротором.

Момент інерції суцільного ротора буде

$$J_{\text{ц}} = \frac{1}{2} m \cdot r_1^2 = \frac{\pi \cdot \rho_1 \cdot h_1}{2} \cdot r_1^4, \quad (10)$$

момент інерції пустотілого циліндричного ротора

$$J_{\text{пц}} = m \cdot \frac{r_3^2 + r_2^2}{2} = \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot h_2}{2} \cdot (r_3^4 - r_2^4), \quad (11)$$

де ρ_1 – середня щільність суцільного ротора, ρ_2 – середня щільність циліндричного ротора; h_1 – довжина суцільного ротора, h_2 – довжина циліндричного ротора; r_1 – радіус суцільного ротора; r_2 внутрішній радіус порожнистого циліндричного ротора, r_3 – зовнішній радіус порожнистого циліндричного ротора.

На рис.2а по формулі (10) обчислено момент інерції для порожнистого циліндричного ротора ($j(r)$), а по формулі (11) обчислено момент інерції для суцільного ($j1(r)$) ротора.

Коефіцієнти перед радіусами у формулах (10), (11) в розрахунках бралися однаковими та дорівнювали одиниці (середня щільність і довжини роторів однакові). Розміри радіусів роторів: суцільного ротора $r_1=2$, внутрішній

радіус циліндричного ротора $r_2=3$, зовнішній радіус порожнистого циліндричного ротора $r_3=3,5$ всі в умовних одиницях.

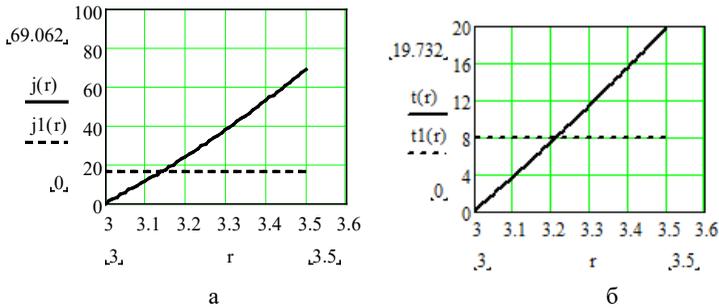


Рис. 2. Момент інерції $j(r)$ та час $t(r)$ для циліндричного ротора, момент інерції $j_1(r)$ та час $t_1(r)$ суцільного ротора

З графіка (рис.2а) можна зробити наступні висновки: при радіусі 3,14 та товщині робочої стінки циліндричного ротора = 0,14 умовних одиниць (це приблизно 4,67% від внутрішнього радіусу порожнистого циліндричного ротора) моменти інерції роторів однакові. Але, зазначимо, через збільшення радіусу циліндричного ротора буде зменшення споживання електроенергії від джерела автономного живлення при одному і тому ж механічному навантаженні і, як внаслідок, більш тривала робота електродвигуна.

Якщо враховувати середні питомі густини матеріалів роторів (ρ_1, ρ_2) та довжини (h_1, h_2) роторів і якщо вдасться їх конструктивно зменшити, то при однаковому моменті інерції можна поліпшити його енергетичні характеристики.

Важливим параметром для електродвигунів є час перехідного режиму, який залежить від моменту інерції.

Запишемо рівняння руху для електродвигуна без навантаження. Врахуємо залежність моменту і моменту інерції від радіусу ротора.

$$F_u \cdot r_1 = J_u \cdot \frac{d\omega}{dt} \tag{12}$$

Де F_u – сила, що обертає ротор.

Інтегруючи вираз (12) по часу для суцільного ротору від кутової швидкості $\omega=0$ до швидкості ідеального холостого ходу $\omega=\omega_0$, отримаємо

$$t_u = \frac{\pi \cdot \rho_1 \cdot h_1}{2 \cdot F_u} \cdot r_1^3 \cdot \omega_0 \tag{13}$$

Вирішуючи аналогічно рівняння руху (12) для електродвигуна з пустотілим ротором без навантаження, отримаємо

$$t_{nu} = \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot h_2}{2 \cdot F_{nu}} \cdot r_3^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^4\right] \cdot \omega_0. \tag{14}$$

З рис.26 видно, що час перехідного режиму буде однаковий при зовнішньому радіусі 3.22 пустотілого ротору. При однакових моментах роторів 3.14 час перехідного режиму пустотілого ротору буде менше.

Сьогодні в повітряних гвинтах БПЛА, літаках і підводних човнах радіус ротора електродвигуна менший за радіус 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 в кожусі 1 (рис.1) двигуна, то для літака з електродвигуном, підводного човна або БПЛА з'являється можливість економії електроенергії автономного джерела живлення при вибраній силі тяги. Тому пропонується у відповідність до рис.1 розмістити обмотки статора і ротор в кожусі 1 обтічника вентилятора. Як у двигуні НК-93, там можна розмістити два статори і два ротори для забезпечення обертання вентиляторів у різні боки та з різною швидкістю для зменшення ефекту запирання. У цьому випадку немає необхідності використовувати складні редукторні системи, що застосовуються у двигуні НК-93. Як повітряні рушії, крім повітряних гвинтів і вентиляторів, можуть застосовуватися імпелери. В електромобілі електродвигун з великим пустотілим ротором можна розмістити на весь багажник та зробити передачу на колеса. Регулювання швидкості обертання вентиляторів можна здійснити за допомогою спеціальних інверторів перетворювачів струму або частоти. Можливе застосування різних типів електродвигунів, але їх конструкція повинна бути такою, щоб забезпечити радіус ротора більше радіуса застосування тягової сили.

В роботі показана можливість економії електроенергії автономних джерел живлення за рахунок збільшення розміру ротора; отримання однакових інерційних характеристик, а саме: моментів інерції та часу перехідного режиму для суцільного ротора з малими розмірами і пустотілим циліндричним ротором з великими розмірами.

Список літератури

1. Журиленко Б.Є. Зміна конструкції електродвигунів транспортних систем з метою економії енергоресурсів автономних джерел живлення /Журиленко Б.Є., Ніколаєв К.І., Ніколаєва Н.К.// Наукоємні технології. - 2018. - №1(37). – 130 – 135. DOI:[10.18372/2310-5461.37.12379](https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12379)
2. В.Е. Zhurilenko Saving energy resources of autonomous power sources of unheeled flying apparatuses / В.Е. Zhurilenko, N.P. Sokolova, N.K. Nikolayeva// PROCEEDINGS, The Eighth World Congress “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” Safety in Aviation And Space Technologies October 10-12, 2018 – P. 1.1.34 – 1.1.37.