УДК 629.735.051:629.735.03.63.6:66.028(045)

СИНТЕЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЕНЕРГІЄЮ ЕЛЕКТРОДВИГУНА БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

В. М. Казак, д-р техн. наук, проф.; ***О. К. Горбач***

Національний авіаційний університет

post@nau.edu.ua
solarandwind@i.ua

Розглянуто основні типи електродвигунів постійного струму. Проведено аналіз основних методів керування двигунами постійного струму. Показано основні співвідношення, використовувані при управлінні двигуном постійного струму. Проаналізовано методи регулювання частоти обертання електродвигуна як основної складової приводу гвинтів безпілотного літального апарату. Наведено розрахунки параметрів сонячних елементів як джерела живлення силової установки безпілотного літального апарату.

Ключові слова: управління електродвигуном постійного струму, привід гвинта, силова установка, безпілотний літальний апарат, сонячний елемент.

Direct current motors main types are considered. The analysis of the main methods of control DC motors is held. The basic relations used in the direct current motor management are showing. The methods of speed control motor as the drive screws main component of unmanned aerial vehicles are analyzed. Calculations of the solar cell parameters as a source of propulsion power unmanned aerial vehicle are given.

Keywords: direct current motor control, screw driver, propulsion system, unmanned aerial vehicle, a solar cell.

Вступ

В автоматизованих електроприводах, які забезпечують управління швидкістю і положенням різних об’єктів управління, широко використовуються машини постійного струму переважно в режимі двигуна.

У багатьох випадках в авіаційних і промислових електроприводах виникає необхідність регулювання швидкості обертання ротора двигуна.

Застосування двигунів постійного струму (ДПС) як виконавчі двигуни, як систем автоматичного управління, так і силових установок пояснюється гарними регулювальними характеристиками і дає змогу простими засобами змінити частоту обертання електроприводу в широких межах.

ДПС є основною складовою приводу гвинтів у силовій установці БПЛА.

Машини постійного струму бувають уніполярні, колекторні, тобто мають ковзний контакт колектор-щітки, і безконтактні.

Основною перевагою колекторних двигунів постійного струму (КДПС) є можливість регулювання частоти обертання в широкому діапазоні, лінійність механічної і, в більшості випадків, регулювальної характеристики, великий пусковий момент, високу швидкодію, мала маса й об’єм на одиницю корисної потужності.

Силові електродвигуни виконуються зі стабілізацією і без стабілізації частоти обертання. КДПС можуть відрізнятися за функціональними властивостями, а саме: швидкодією, добротністю пуску, ККД, жорсткістю механічної характеристики.

Двигуни з паралельним збудженням та зі збудженням від постійних магнітів унаслідок підвищеної жорсткості механічної характеристики мають більш стабільну частоту обертання, а з застосуванням спеціальних пристроїв-регуляторів швидкості (відцентрово-вібраційних або електронних) досягається стабільність частоти обертання від 5 до 0,5 % і вище.

Для регулювання частоти обертання двигунів з паралельним збудженням та зі збудженням від постійних магнітів застосовується переважно якірне управління, тобто зміна напруги живлення якірного ланцюга, при цьому механічна характеристика, не змінюючи жорсткості, зміщується паралельно своєму положенню при $U = U_{\text{ном}}$.

Недоліком КДПТ є наявність щітково-колекторного вузла, що обмежує їх довговічність і є джерелом радіоперешкод.

Унаслідок іскріння на ковзному контакті ці двигуни не придатні для експлуатації у вибухонебезпечних середовищах. За функціональним призначенням колекторні двигуни постійного струму поділяються на силові та керовані.

Безконтактні електродвигуни постійного струму (БДПС) являють собою електричні машини зі збудженням від постійних магнітів, що мають датчик кутового положення ротора і напівпровідниковий комутатор.

БДПС володіють такими важливими функціональними властивостями, як тривале напрацювання (до 30000 год і більше), висока надійність запуску після тривалого перебування в неробочому стані, придатність для роботи у вибухо- і пожежонебезпечних середовищах, працездатність при низьких тисках навколишнього середовища.

© В.М. Казак, О.К. Горбач, 2011

БДПС випускаються суміщеного виконання (двигун і комутатор об'єднані в одному корпусі) і роздільного виконання (двигун і комутатор виконані в окремих корпусах, з'єднаних проміжним кабелем).

За функціональним призначенням БДПС поділяються: на силові, керовані і зі стабілізацією частоти обертання.

Для регулювання частоти обертання в БДПС застосовуються здебільшого методи широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги живлення через малопотужні ланцюга комутатора. Цей метод реалізується на основі розімкнутих і замкнутих систем керування частотою обертання.

За способом збудження ДПТ поділяються аналогічно генераторам: на двигуни незалежного, паралельного, послідовного і змішаного збудження.

У двигунах незалежного збудження струми якоря $I_я$ і навантаження $I_н$ дорівнюють: $I_н = I_я$, у двигунах паралельного та змішаного збудження $I_з = I_я$, а в двигунах послідовного збудження $I_н = I_я = I_в$.

З незалежним збудженням від окремого джерела струму звичайно виконуються потужні двигуни з метою більш зручного й економічного регулювання величини струму збудження.

За своїми властивостями двигуни незалежного і паралельного збудження майже однакові.

Аналіз досліджень та публікацій

Відомий цілий ряд публікацій за темою управління електродвигуном постійного струму.

Всі вони описують управління двигуна щодо традиційних джерел живлення.

Пошук по патентної документації показав, що існує опис методу керування двигуном постійного струму, живлення якого здійснюється за рахунок фотоелектричних модулів [2].

Однак у цій роботі фотоелектричні елементи розглядаються як єдині джерела живлення двигуна.

Постановка задачі

Електричний двигун є основною складовою приводу гвинтів БПЛА.

Для забезпечення енергією електродвигуна приводу гвинтів БПЛА необхідно розробити комплексну систему управління енергетичною установкою БПЛА.

Комплексна система управління повинна включати в себе: систему управління відбором потужності сонячних елементів, систему управління оптимальною зарядкою акумуляторних батарей, систему керування силовою установкою та живлення бортового обладнання.

Отже, комплексна система управління повинна забезпечувати безперебійне живлення силової установки БПЛА, включати в себе алгоритм управління відбором енергії за пріоритетом від декількох дублюючих джерел живлення.

Для реалізації вказаного завдання проаналізуємо характеристики основних типів двигунів постійного струму і методи управління ними, розрахуємо параметри сонячної батареї: кількість, їх вагу, площу поверхні, потужність.

Основний матеріал

Основні співвідношення, що використовуються під час управління ДПС:

1. Крутний момент, що розвивається двигуном, пропорційний струму в обмотці якоря (ротора) [3]:

$$M = c_м \Phi I_я, \quad (1)$$

де $I_я$ — струм в обмотці якоря; $k_м$ — коефіцієнт крутного моменту двигуна (залежить від конструкції двигуна та струму в обмотці збудження).

2. Струм в обмотці ротора за законом Ома є прямо пропорційним прикладеній напрузі та обернено пропорційний опору обмотки якоря:

$$I_я = \frac{U_я}{R_я},$$

де U — напруга, прикладена до обмотки якоря; R — опір обмотки якоря.

3. Проти ЕДС в обмотках якоря пропорційна кутовій частоті обертання якоря:

$$E_я = c_е \Phi \omega, \quad (2)$$

де $c_е$ — коефіцієнт ЕДС двигуна; Ф — магнітний потік; ω — кутова швидкість обертання якоря.

Статичні властивості двигунів як об'єктів управління визначаються сімействами механічних і регулювальних характеристик.

Механічні характеристики визначають залежність кутової швидкості ω, що розвивається двигуном обертаючого моменту $M_д$:

$$\omega = f(M_д),$$

при деяких постійних значеннях керуючого впливу x = const.

Регулювальні характеристики визначаються залежністю

$$\omega = f(x) \text{ при } M_д = \text{const}.$$

Розглянемо найбільш застосовувані методи управління авіаційними і промисловими електроприводами.

Для регулювання частоти обертання двигуна існує три методи:

1. Найзручнішим, поширенішим і економічнішим є спосіб регулювання швидкості шляхом зміни потоку Ф, тобто струму збудження $I_{зб}$.

$$U = E_{\ddot{y}} + R_{\ddot{y}} I_{\ddot{y}}; \quad (3)$$

$$I_{\ddot{y}} = \frac{U - E_{\ddot{y}}}{R_{\ddot{y}}}, \quad (4)$$

де згідно з формулою (2)

$$n = \frac{U - R_{\ddot{y}}\ I_{\ddot{y}}}{c_{\mathring{a}}\Phi} \quad (5)$$

відповідно до (1)

$$n = \frac{U}{c_{\mathring{a}}\Phi} - \frac{R_{\ddot{y}}\grave{I}}{c_{\mathring{a}}c_{\grave{i}}\ \Phi}.$$

Із зменшенням Ф, згідно зі співвідношенням (5), швидкість зростає. Роботу двигунів розраховують при номінальному режимі з найбільшим значенням Ф, тобто з найменшою величиною ω. Тому зменшувати практично можна тільки Ф.

Отже, розглянутий спосіб дає змогу регулювати швидкість вгору від номінальної. При такому регулюванні ККД двигуна залишається високим, тому що потужність збудження мала, зокрема мала потужність реостатів для регулювання струму збудження.

До того ж при зменшенні $I_{зб}$ потужність збудження $P_в$ зменшується.

Верхня межа регулювання швидкості обертання обмежується механічною міцністю машини та умовами її комутації.

2. Інший спосіб регулювання швидкості полягає у включенні послідовно в ланцюг якоря реостата або регульованого опору $R_{ря}$.

Замість виразу (7) при цьому дістаємо:

$$n = \frac{U - \left(R_{\ddot{y}} + R_{\eth\ddot{y}}\right)^{2}{}_{\ddot{y}}}{c_{\mathring{a}}\Phi}. \quad (6)$$

Цей спосіб дає можливість регулювати швидкість вниз від номінальної і пов'язаний зі значними втратами в опорі $R_{ря}$ та зниженням ККД.

За номінального струму якоря $I_я$ = $I_{ян}$ середня величина рівності (5) у відносних величинах:

$$U_* - R_{\ddot{y}*}\ I_{\ddot{y}\acute{i}*} = 1 - 0,05 = 0,95.$$

Якщо при Ф = const необхідно зменшити швидкість удвічі, то потрібно зменшити цей чисельник удвічі, тобто:

$$U_* - R_{\ddot{y}*}\ I_{\ddot{y}\acute{i}*} - R_{\eth\ddot{y}*} = 1 - 0,05 - R_{\eth\ddot{y}*} I_{\ddot{y}\acute{i}*} = 0,475.$$

Оскільки U_* = $I_{\ddot{y}\acute{i}*}$, то при цьому:

$$R_{\eth\ddot{y}*} = 0,95 - 0,478 = 0,475.$$

тобто в реостаті буде витрачатися 47,5 % прикладеної напруги та потужності, що підводиться до ланцюга якоря.

За цієї причини даний спосіб використовується переважно для двигунів не великої потужності, а для більш потужних двигунів використовується рідко і лише короткочасно (пусконалагоджувальні режими і т. д.).

3. Регулювання швидкості здійснюється також шляхом регулювання напруги ланцюга якоря, так зване якірне управління. Оскільки робота двигуна при $U > U_н$ неприпустима, то цей спосіб, відповідно до виразів (5) і (6), дає можливість регулювати швидкість також вниз від номінальної. ККД двигуна при цьому залишається високим, тому що ніяких додаткових джерел втрат у схему двигуна не вноситься.

Проте в цьому випадку необхідне окреме джерело струму з регульованою напругою, що здорожує установку.

Отже, величиною крутного моменту можна управляти змінюючи напругу на ДПС. Такий спосіб застосовують для відносно малопотужних двигунів.

Для управління сильнішими (потужними) двигунами використовують:

- принцип ШІМ, коли змінюється не величина напруги, а тривалість його застосування до двигуна;
- регулювання крутного моменту зміною напруги на обмотці збудження, що потребує меншої потужності елементів схеми управління, ніж регулювання зміною напруги на всьому двигуні, але при цьому способі регулювання струм через обмотку якоря не управляється, через це навіть при малому крутному моменті великий струм через обмотку якоря буде нагрівати обмотку якоря, що може призвести до перегрівання і виходу з ладу двигуна. Можливе застосування для регулювання крутного моменту в невеликих межах від номінального обертального моменту.

У науковій літературі трапляються безліч різних методів керування електричним двигуном постійного струму.

Відзначимо деякі з них:

1. Генераторний метод управління двигунами постійного струму.

При генераторному методі управління двигуном здійснюється шляхом зміни значення напруги джерела енергії, що живить електричний двигун постійного струму незалежного збудження.

Як джерело енергії може бути використаний як генератор постійного струму, так і електромашинний підсилювач (ЕМП).

У першому випадку управління двигуном здійснюється за системою «генератор-двигун» (Г-Д), відомою також як система Леонара.

Ця система складається з трьох електричних машин: генератора Г, підключеного до затискачів якоря, керованого двигуном Д, що обертає генератор (рис. 1).

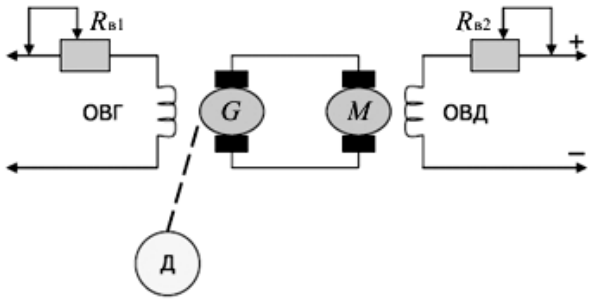

Рис. 1. Принципова схема генераторного методу управління двигунами постійного струму

На рис. 1 позначено: ОВГ — обмотка збудження генератора; ОВД — обмотка збудження двигуна; $R_{зб1}$, $R_{зб2}$ — виносні регулювальні резистори в ланцюгах ОВГ і ОВД відповідно.

У другому випадку управління проводиться за системою «ЕМП-двигун» (ЕМП-Д), яка також складається з трьох машин.

В обох системах допускається використання двох ступенів управління.

На першому ступені управління здійснюється при номінальному струмі збудження двигуна шляхом впливу на струм збудження генератора або струм у керуючій його обмотці ЕМП.

Другий ступінь відповідає управлінню двигуном шляхом зміни його струму збудження при номінальному режимі джерела енергії (у системі «ЕМП-Д» другий ступінь зазвичай не використовується).

Унаслідок хороших регулювальних властивостей та енергетичних співвідношень на основі системи «Г-Д» створені високоефективні системи управління, які широко застосовуються в радіолокаційних установках, рульових машинах автопілотів тощо.

Водночас необхідно відзначити, що основні недоліки системи «Г-Д» — це порівняно великі маса і габарити електричного приводу.

2. Дискретний метод управління двигунами постійного струму.

При дискретному методі управління двигуном здійснюється шляхом періодичного підключення ланцюга якоря двигуна до джерела живлення.

У цьому випадку використовуються двигуни з незалежним збудженням чи з самозбудженням від постійних магнітів, а як імпульсні елементи, які вмикають і вимикають ланцюг якоря двигуна, — електронні схеми з широтно-імпульсними модуляторами.

Найпростішу схему імпульсного управління двигуном при широтно-імпульсній модуляції показано на рис. 2.

Якір двигуна М на час імпульсу підключається до джерела електричної енергії (ДЕЕ) через нормально замкнуті контакти НЗК-1 і НЗК-2, а в період паузи гальмується противмиканням через нормально розімкнуті контакти НРК-1 і НРК-2.

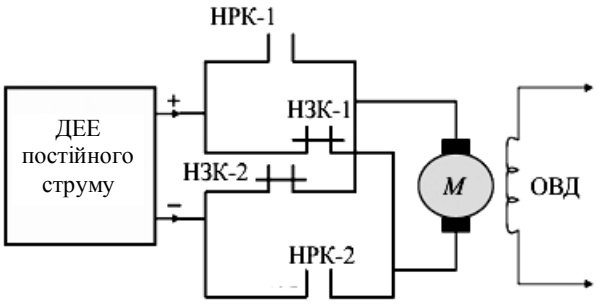

Рис. 2. Принципова схема дискретного методу управління двигунами постійного струму

У даному електроприводі використовується двигун з незалежною обмоткою збудження ОВД.

Такі системи управління застосовуються в більшості випадків у слідкуючих системах не великої потужності: пілотажно-навігаційних комплексах та радіотехнічних системах.

У силових електроприводах підвищеної потужності часто для цих цілей застосовуються керовані діоди-тиристори.

Основні чинники, які зумовили широке застосування тиристорного електроприводу в авіації, такі:

- високий ККД тиристорного перетворювача (0,95–0,97);
- відносно малі габарити і маса;
- незначна потужність пристроїв управління.

Управління електроприводами може бути зведене до виконання ряду основних операцій, а саме: пуск, гальмування, реверсування або стабілізація частоти обертання.

У переважній більшості випадків управління приводом здійснюється шляхом впливу на електричний двигун.

Зробимо розрахунок необхідної кількості сонячних елементів стосовно до одного з БПЛА, зазначених у класифікації [1].

За площею крила було обрано БПЛА «Кабур» класу «міні» з електродвигуном потужністю 350 Вт і розміром крила 4,2 м.

Один сонячний елемент має напругу від 0,4 до 0,5 В. Поєднуючи їх між собою, можна отримати необхідні вихідні параметри напруги і сили струму. Грубе оцінювання параметрів сонячного елемента на основі монокристалічного кремнію, таких як вага і вихідний потужності показує, що його: площа — 0,01 м^2, потужність — 1,3 Вт, маса — 10 г.

Для вибраного БПЛА легко можна бачити, що необхідна кількість сонячних елементів, становить 270 штук, загальною площею 2,7 м^2 і вагою 2,7 кг.

Ця кількість сонячних елементів дасть можливість живлення електродвигуна в сонячну погоду.

Для того, щоб ДПС не залежав від ступеня сонячного випромінювання (хмар, задимленості), до складу системи необхідно ввести акумуляторну батарею.

Ємність батареї в А*год не важко розрахувати. Потужність споживання двигуна розділимо на номінальну напругу двигуна:

$$A = \frac{P_{\text{д}}}{U_{\text{д}}}. \qquad (7)$$

Із співвідношення (7) видно, що для роботи двигуна потужністю 350 Вт протягом однієї години знадобиться батарея ємністю 350/$U_{\text{д}}$.

Висновок

Наведений аналіз ДПС і методів управління ДПС показує, що найбільш прийнятним електричним двигуном у складі приводу гвинтів БПЛА є БДПС.

БДПС мають ряд переваг, таких як тривале напрацювання, висока надійність запуску після тривалого перебування в непрацездатному стані, можливість застосування методів широтно-імпульсної модуляції напруги живлення через малопотужні ланцюги комутатора для регулювання частоти обертання.

Останнє дає можливість створення системи управління енергетичною установкою БПЛА.

Розрахунок кількості сонячних елементів показав, що їх сумарна вага не є критичною.

Оскільки сонячне випромінювання не постійне, то необхідно розрахувати ємність акумуляторних батарей як буфера для накопичення енергії для живлення електродвигуна задану кількість часу в темний час доби.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Казак В. М.* Безпілотні літальні апарати / В. М. Казак, О. В.Самков. — К. : НАУ, 2010. — 600 с.

2. *Patent*. Sposyb i ukiad sterowania elektrycznego silnika pradu stalego zasilanego z generatora fotowoltaicznego. — Przechpospolita Polska, 2001.

3. *Свириденко П. А.* Основы автоматизированного электропривода / П. А. Свириденко, А. Н. Шмелев. — М. : Высш. шк., 1970. — 393 с.

Стаття надійшла до редакції 23.02.2011.