

Ефремов М. А., Ткачук А. А., Монастырский Д. Я., Ким К. К., Иванов С. Н.
M. A. Efremov, A. A. Tkachuk, D. Ya. Monastyrskiy, K. K. Kim, S. N. Ivanov

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

DESIGN OF THE ELECTROMECHANICAL DRIVE OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Ефремов Михаил Андреевич – инженер-электромеханик (Россия, Санкт-Петербург); 190013, г. Санкт-Петербург. E-mail: em@email.knastu.ru.

Mikhail A. Efremov – Electromechanic Engineer (Russia, Saint Petersburg); 190013, Saint Petersburg. E-mail: em@email.knastu.ru.

Ткачук Антон Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru.

Anton A. Tkachuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, «Electrical and Heat Power Engineering» Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); Russian Federation, 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9. E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru.

Монастырский Дмитрий Ярославович – аспирант кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. E-mail: toe@pgups.ru.

Dmitriy Ya. Monastyrskiy – Postgraduate, «Electrical and Heat Power Engineering» Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); Russian Federation, 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9. E-mail: toe@pgups.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical and Heat Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Saint Petersburg); Russian Federation, 190031, Saint Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Sergey N. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения размерных соотношений и электромагнитных нагрузок электромеханического привода для беспилотного летательного аппарата на основе классической теории электромагнитного преобразования энергии. Проведён анализ современных беспилотных летательных аппаратов, показаны основные технические ограничения их выполнения. Приведены требования к параметрам устройства, определяющие область его применения. Рассмотрены структура и аппаратная реализация основных элементов и модулей. Предложена трёхмерная модель проектируемого двигателя. Даны рекомендации по выбору типа и параметров исполнительных элементов. Приведены результаты электромагнитного расчёта бесколлекторного двигателя с учётом технических характеристик летательного аппарата. Определена аналитическая связь между параметрами исполнительного элемента и электромагнитными характеристиками электромеханического преобразователя. Получены рабочие характеристики в номинальном диапазоне скоростей вращения. Рассмотрен вариант системы управления двигателем на базе отечественных дискретных элементов.

Summary. The article shows the issues of determining the dimensional ratios and electromagnetic loads of an electromechanical drive for an unmanned aerial vehicle based on the classical theory of electromagnetic energy conversion are considered. The analysis of modern unmanned aerial vehicles is carried out; the main technical limitations of their implementation are shown. The requirements for the device parameters defining the scope of its application are given. The structure and hardware implementation of the main elements and modules are considered. A three-dimensional model of the projected engine is proposed. Recommendations on the choice of the type and parameters of the executive elements are given. The results of the electromagnetic calculation of the brushless motor are given, taking into account the technical characteristics of the aircraft. The analytical relationship between the parameters of the actuator and the electromagnetic characteristics of the electromechanical converter is determined. The operating characteristics in the nominal range of rotation speeds are obtained. A variant of the engine control system based on domestic discrete elements is considered.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, электромеханический привод, электромагнитные нагрузки, модель, проектирование.

Key words: unmanned aerial vehicle, electromechanical drive, electromagnetic loads, model, design.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00159, <https://rscf.ru/project/24-29-00159/>.

УДК 621.313:681.511

Введение. Вопрос проектирования приводов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является достаточно актуальным, поскольку сами аппараты востребованы в различных отраслях [1]. Очевидно, что одним из критериев, обеспечивающих эффективность БПЛА в условиях ограниченного ресурса, является стоимость его комплектующих, основным из которых является силовая установка, реализуемая на основе двигателей внутреннего сгорания или электромеханических преобразователей.

При выборе типа привода необходимо обеспечить целый ряд проектных параметров: тяговое усилие, грузоподъёмность, весогабаритные соотношения, динамические характеристики, помехоустойчивость, надёжность при минимальной стоимости.

Применение двигателей внутреннего сгорания на БПЛА связано с ограниченной динамикой, сложным процессом управления, ограниченной высотой полётов, низкой защитой от обнаружения.

Использование привода на базе электродвигателей с интегрированной системой управления позволяет получить более высокие технические характеристики, в частности повысить скорость, улучшить управляемость, обеспечить требуемую наработку. Высокие энергетические характеристики и отсутствие дополнительного топливного оборудования, в сравнении с аналогичными по мощности двигателями внутреннего сгорания, расширяют область их применения. Несмотря на конструкционную простоту БПЛА, проектирование электромеханической системы для его привода связано с определёнными трудностями. Так, относительно невысокая мощность двигателя не позволяет использовать апробированные для преобразователей средней и большой мощности методики расчёта. Использование постоянных магнитов требует формализации и замены их на фиктивные источники намагничивающей силы (НС). Существующие методы расчёта на практике приводят к необоснованно завышенным весогабаритным характеристикам. Увязка эксплуатационных требований к аппарату с его энергетическими и надёжностными параметрами позволяет повысить эффективность БПЛА.

Постановка задачи исследования. Начальным этапом проектирования является обоснование требуемой мощности электродвигателя, передаваемой на исполнительный механизм, который представляет многолопастную систему тяговых элементов. На этом этапе не важен тип двигателя, поскольку определяются характеристические точки механической характеристики электромеханического преобразователя, связанные с режимами его работы (пуск, регулирование, реверс, но-

минальный режим, режим максимальной нагрузки). Объектом исследования на первом этапе является исполнительный механизм. На сегодняшний день апробированная методика решения обратной задачи нахождения размерных соотношений лопастного механизма по требуемым выходным характеристикам отсутствует, т. е. для проектирования электропривода, кроме вращающего момента и частоты, необходимо иметь информацию о количестве лопастей, их размерных соотношениях, профиле, наличии ограничивающих или направляющих элементов. Определение момента сопротивления, преодолеваемого электродвигателем, сводится к вариативной задаче, не имеющей однозначного решения. Такой подход предполагает наличие аэродинамических характеристик исполнительного элемента, которые могут быть получены аналитически, экспериментально на физических или имитационных моделях.

Для установления функциональной связи между размерными соотношениями исполнительного механизма и энергетическими характеристиками приводного двигателя аппарата обычно рассматривают параметр k_U , представляющий отношение количества оборотов электродвигателя на единицу приложенного напряжения при условии отсутствия нагрузки на валу (без лопастного механизма). На величину параметра k_U влияет число витков в обмотках статора, с увеличением их количества значение k_U снижается. При больших внешних диаметрах лопастного механизма, сопряжённого с приводом с высоким значением k_U , требуемые динамические характеристики могут быть обеспечены за счёт увеличения потребляемого тока. При проектировании необходимо учитывать, что k_U непосредственно влияет на величину как тока, так и допустимого напряжения. Соответственно, при определении обмоточных данных для двигателей с высоким k_U обмотки выполняются короче, что снижает максимальное допустимое напряжение и увеличивает потребляемый ток для одного и того же исполнительного механизма. При увеличении длины пропорционально увеличивается сопротивление обмотки, значение k_U уменьшается. Также необходимо отметить, что привод выполняется с большим числом полюсов магнитной системы для обеспечения заданных динамических характеристик БПЛА. В свою очередь, это приводит к увеличению сечения проводников обмотки с соответствующим снижением сопротивления и возрастанием мощности. Постоянные магниты, используемые для создания магнитного поля, часто выполнены на основе неодима, поскольку могут применяться при температурах до 120 °С, остаточная магнитная индукция $B_r = 1,2$ Тл; коэрцитивная сила $H_c = 910$ кА/м; магнитная энергия $BH = 370$ кДж/м³.

Все размерные соотношения в БПЛА привязываются к характеристикам исполнительного механизма, определяющего не только эффективность работы электродвигателя, но и соответствие мощности привода аэродинамической нагрузке. Эффективность электродвигателя определяется отношением тяги во всём диапазоне мощностей к нагрузке и потребляемой мощности или отношением тяги к потребляемому току. Обычно большая тяга требует большого тока, поэтому необходимо подбирать двигатели с максимальной тягой при минимальном токе. Напряжение источника питания выбирается в зависимости от типа аккумулятора, например, литий-ионный аккумулятор обеспечивает величину напряжения 24 В.

Расчётная часть. При определении мощности двигателя необходимо знать минимальную мощность, требуемую для вращения лопастной системы, определяемую назначением БПЛА (минимальное рекомендованное соотношение тягового усилия к весу 5:1).

Аналитически производительность лопастного механизма Q и развиваемого им давления H связана с полезной мощностью электропривода $P_{2ном}$ выражением

$$P_{2ном} = \eta_{лоп} Q \cdot H, \quad (1)$$

где $\eta_{лоп}$ – коэффициент полезного действия лопастной системы.

Сложность выражения (1) обусловлена тем, что определяющие параметры в его правой части связаны нелинейной зависимостью [2–4], примерный вид которой показан на рис. 1.

Исходные данные для расчёта напорной характеристики лопастного механизма:

- действительный напор одной лопасти, H ;
- действительная производительность одной лопасти Q ;
- гидравлический и объёмный коэффициенты полезного действия η_r и η_o ;

- коэффициент K_{Δ} , учитывающий конечное число лопастей на теоретический напор исполнительного механизма.

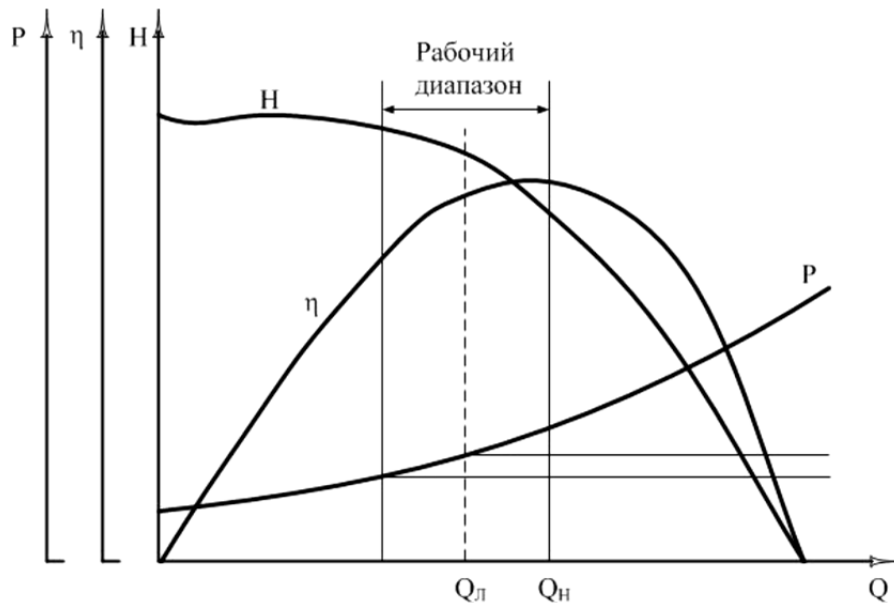


Рис. 1. Расчётные характеристики лопастного механизма

Пример расчёта двухлопастного исполнительного механизма приведён на рис. 2.

Аналитический расчёт позволяет ориентировочно найти мощность проектируемого двигателя, передаваемую на исполнительный механизм. Приближённый характер расчёта связан с неполным учётом проектных параметров и, как правило, требует верификации полученных результатов с использованием физической модели.

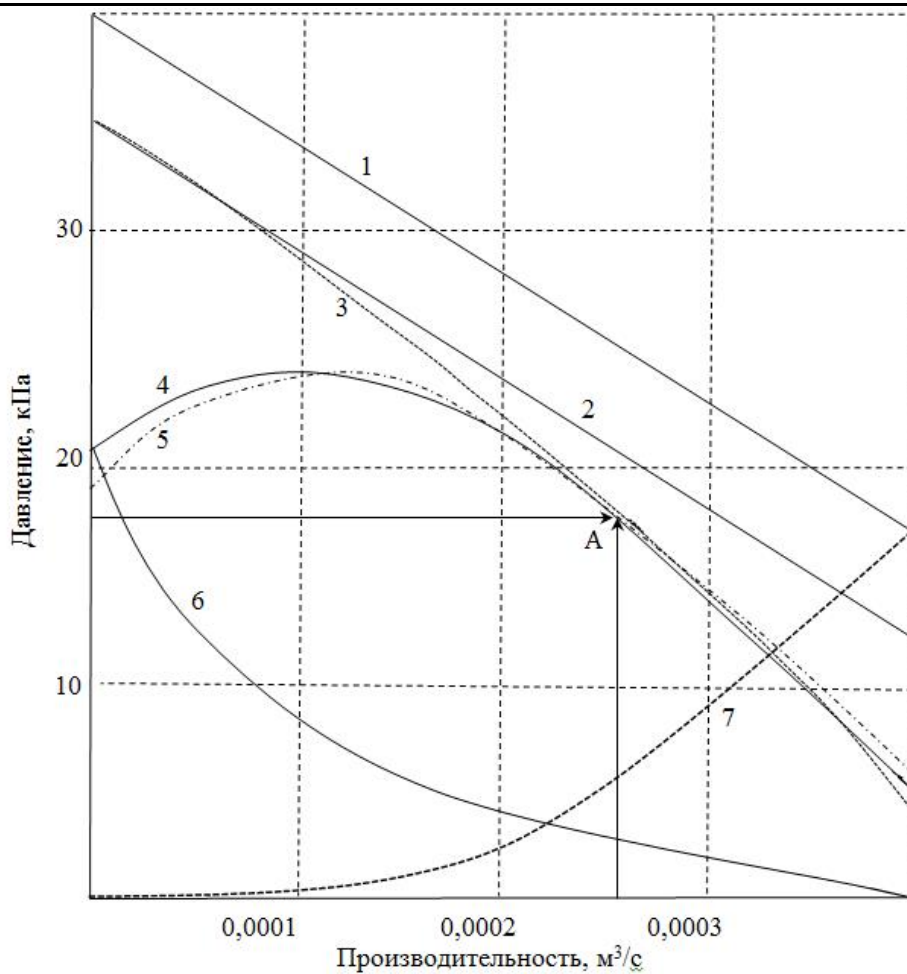
Экспериментальное исследование является наиболее точным, но требует наличия реального исполнительного механизма, что не только снижает эффективность проектирования, но и не позволяет найти оптимальный вариант привода. Его целесообразно выполнять после проведения компьютерного моделирования с целью подтверждения и возможного уточнения результатов.

Третий способ определения требуемой мощности, передаваемой лопастному механизму от приводного электродвигателя, основан на анализе результатов имитационного моделирования. С учётом доступных информационных источников для квадрокоптерных БПЛА широко применимы лопасти марки APC MR, имеющие высокие аэродинамические характеристики. Размерные соотношения и коэффициент полезного действия лопастного исполнительного механизма в первом приближении привязаны к его наружному диаметру. С учётом формы лопасти создаётся параметризуемая трёхмерная модель лопастного механизма, с помощью которой обеспечивается сопряжение присоединительных и установочных размеров приводного двигателя (указанных в справочной литературе [5–7]).

Создание цифровой модели реализуется в CAD-редакторе (например, AutoCAD, T-Flex, Компас). В качестве проектных параметров задаются геометрические размеры, форма лопасти, шаг, внешний и внутренний диаметр посадочного кольца, количество лопастей.

На рис. 3, а показана цифровая модель двухлопастного винта типа APC 7x38WSF.

Далее файл преобразуется в формат STL, адаптированный для преобразования в G-код для управления 3D-принтером с использованием программ-слайсеров. Заключительной частью первого этапа является печать исполнительного механизма, физическая реализация которого из поликарбоната показана на рис. 3, б.



$1 - H_{\infty} = f(Q_t)$ – зависимость расчётного теоретического напора лопастного механизма с бесконечно большим количеством лопастей при расчётном значении подачи;
 $2 - H_t = f(Q_t)$ – зависимость теоретического напора; $3 - H' = f(Q)$ – зависимость теоретического напора при конечном числе лопастей; $4 - H = f(Q_t)$ – расчётная характеристика при постоянной частоте вращения; $5 - H = f(Q)$ – действительная напорная характеристика;
 $6 - h_1$ – гидравлические потери на трение; $7 - h_2$ – ударные потери

Рис. 2. Расчётная характеристика лопастного механизма

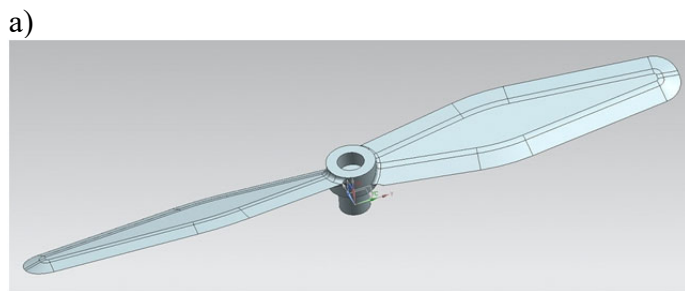


Рис. 3. Модель лопастного исполнительного механизма

Готовый лопастной механизм соединяется с тарированным приводным двигателем, обеспечивающим возможность снятия реальной аэродинамической характеристики и определения требуемой мощности и коэффициента полезного действия (КПД) в различных скоростных режимах. Полученная информация позволяет совместить механическую характеристику проектируемого двигателя и тяговую характеристику лопастного механизма.

Выбор типа и элементов электродвигателя. В БПЛА часто используются бесколлекторные синхронные двигатели с постоянными магнитами, управляемые микроэлектронным контроллером. Это связано с относительно небольшими размерами и весом аппарата, высоким использованием, широким диапазоном и плавностью регулирования, низким уровнем электромагнитных помех.

Конструктивная схема бесколлекторного двигателя (см. рис. 4) включает ротор 1, на котором размещены постоянные магниты, и статор с обмотками 2, число которых определяет его фазность.

Исходными данными для проектирования электродвигателя являются: тяговая сила, значение КПД лопастного механизма при различных скоростях вращения, напряжение питания, кривая размагничивания постоянных магнитов. Для обеспечения точности регулирования количество полюсов и постоянных магнитов выбирается достаточно большим. Для вычисления тяговой силы необходима информация об аэродинамических характеристиках лопастного механизма: диаметре пропеллера D ; коэффициентах тяги $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$; коэффициентах мощности $\beta_0, \beta_1, \beta_2$; оптимальном коэффициенте скорости $\lambda_{\text{опт}}$; коэффициенте сопротивления лопастного механизма R_y .



Рис. 4. Физическая модель бесколлекторного двигателя

Результирующий коэффициент тяги

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_{\text{опт}} + \alpha_2 \lambda_{\text{опт}}^2.$$

Результирующий коэффициент мощности

$$\beta(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \lambda_{\text{опт}} + \beta_2 \lambda_{\text{опт}}^2.$$

Тяга одного лопастного механизма

$$T = \alpha(\lambda) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^3,$$

где ρ – плотность воздуха; n – частота вращения, оборотов в секунду,

$$n = \sqrt{\frac{M \cdot g}{z \rho D^4 [\alpha(\lambda) - R_y \lambda_{\text{опт}}^2]}}$$

Мощность, затрачиваемая на вращение,

$$P = \beta(\lambda) \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D^5.$$

Мощность электродвигателя

$$P_2 = \frac{P}{\eta_{\text{лоп}} \cdot \eta_{\text{дв}}}.$$

Расчётная мощность электродвигателя

$$P_a = \frac{1 + 2\eta}{3\eta} P_2.$$

Обращаясь к теории электромагнитного преобразования энергии [8] и зная мощность электродвигателя, можно найти его конструктивные размеры. Уравнение Арнольда позволяет предварительно определить длину и диаметр сердечника статора:

$$C_A = \frac{D_a^2 \cdot l_\delta \cdot n}{P_2} = \frac{1}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot A_\delta \cdot B_\delta}, \quad (2)$$

где A_δ – линейная нагрузка; B_δ – индукция в воздушном зазоре; α_δ – коэффициент полюсного перекрытия, $\alpha_\delta = 0,75$.

Произведение квадрата диаметра сердечника статора на его длину в соответствии с (2) можно представить в виде

$$D_a^2 \cdot l_\delta = \frac{P_2}{n \cdot \pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot A_\delta \cdot B_\delta}. \quad (3)$$

В электродвигателях постоянного тока малой мощности отношение длины l_δ пакета якоря к его диаметру D_a обычно находится в пределах

$$\xi = \frac{l_\delta}{D_a} = 0,4 \dots 1,4.$$

Принимая значение $\xi = 0,6$, можно получить

$$l_\delta = 0,6 D_a. \quad (4)$$

Диаметр якоря D_a находится из уравнения (3), и с учётом (4) полученное значение диаметра определяет длину l_δ .

После нахождения основных размерных соотношений выполняется электромагнитный расчёт. Связь между намагничивающей силой (Iw) и электромагнитной мощностью ($P_{\text{эм}}$) позволяет вычислить необходимое количество витков обмотки сердечника якоря.

Электромагнитная сила, с которой взаимодействуют постоянный магнит и токовая обмотка,

$$F = (Iw) \cdot B_n \cdot l_\delta. \quad (5)$$

Электромагнитный момент

$$M_2 = F \cdot R_2,$$

где R_2 – расстояние от втулки до конца сердечника полюса (см. рис. 5),

$$R_2 = \frac{D_a - d_B}{2},$$

здесь d_B – внешний диаметр втулки.

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = M_2 \cdot \omega_2; \quad P_{\text{эм}} = P_a,$$

где ω_2 – угловая скорость, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$,

$$\omega_2 = \frac{\pi n}{30}.$$

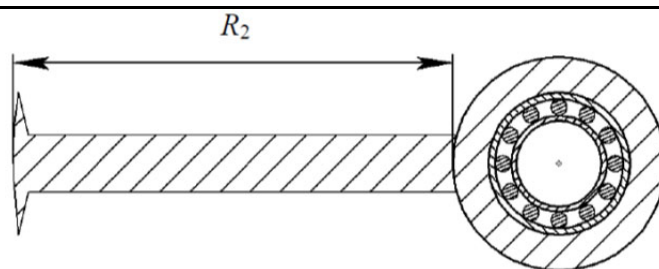


Рис. 5. К определению R_2

Подстановка в (5) l_δ и B_n определяет намагничивающую силу:

$$Iw = \frac{F}{B_n \cdot l_\delta}.$$

Потребляемый двигателем ток

$$I = \frac{P_a}{U}.$$

Количество витков обмотки сердечника

$$w = \frac{Iw}{I}.$$

Предварительная плотность тока j'_2 , выбранная по величине вращающего момента M_2 , определяет сечение провода:

$$q'_2 = \frac{I}{2 \cdot j'_2}.$$

Окончательная плотность тока в проводнике обмотки якоря

$$j_2 = \frac{I}{2 \cdot q_2},$$

где q_2 – нормированное сечение провода.

После определения обмоточных данных находятся геометрические размеры зубцовой зоны статора: высота сердечника h_c , высота $h_{ш}$ и ширина шлица $b_{ш}$, средняя длина витка обмотки l_{cp} .

Величина воздушного зазора между статором и ротором принимается из технологических рекомендаций $\delta = 0,5$ мм.

Нормализованные размеры статора определяют размеры ротора: толщину b_p , внутренний диаметр втулки r_2 , по которому выбирается подшипник электродвигателя, внутренний диаметр ротора D_1 :

$$D_1 = D_a + 2\delta + 2b_m,$$

толщину b_m и длину магнита $l_m = l_\delta$.

Внешний диаметр ротора D_H

$$D_H = D_1 + 2b_p.$$

Длина ротора l_p выбирается больше длины сердечника ротора:

$$l_p = l_\delta + 0,005.$$

Длина вала

$$l_b = l_p + 0,025.$$

На рис. 6 представлена 3D-модель двигателя, спроектированного по рассмотренной методике, выполненная в T-Flex CAD.

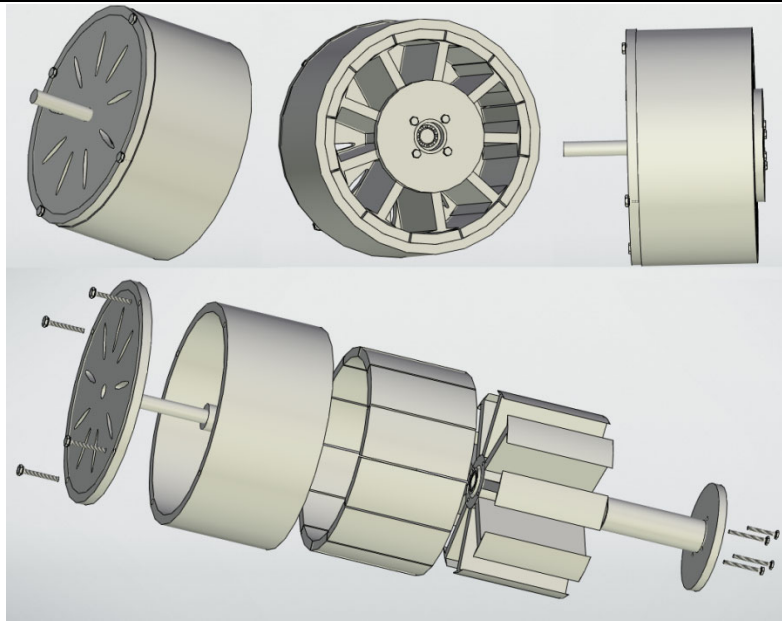


Рис. 6. 3D-модель двигателя

Для оценки эффективности привода рассчитываются рабочие характеристики двигателя в диапазоне частот $0,7 \dots 1,18 n_{\text{ном}}$ [9].

Электрические потери в обмотке якоря:

$$P_{\text{эл}} = I_2^2 \cdot r,$$

где r – сопротивление обмотки возбуждения,

$$r = k_{\theta} \frac{2 \cdot p \cdot w \cdot l_{\text{ср}}}{57 \cdot q_2},$$

здесь k_{θ} – температурный коэффициент.

Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи

$$P_{\text{с2}} = p_{\text{с2}} \cdot B_{\text{с2}}^2 G_{\text{с2}},$$

где $G_{\text{с2}}$ – масса сердечника; $p_{\text{с2}}$ – удельные потери в стали:

$$G_{\text{с2}} = 5,5(D_a - 2h_c)^2 \cdot l_{\delta}, \quad p_{\text{с2}} = 2\varepsilon \left(\frac{f}{100} \right) + 2,5\rho \left(\frac{f}{100} \right)^2,$$

здесь f – частота перемагничивания стали якоря,

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Механические потери в электродвигателе (без учёта лопастной системы):

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{т.п}} + P_{\text{т.в}},$$

где $P_{\text{т.п}}$ – потери на трение в подшипнике; $P_{\text{т.в}}$ – потери на трение якоря о воздух.

Потери на трение в подшипнике приближённо определяются по формуле

$$P_{\text{т.п}} \approx k_m G_{\text{с2}} n \cdot 10^{-3},$$

где k_m – коэффициент для малых машин с шарикоподшипниками, равный $1 \dots 3$.

Потери на трение якоря о воздух можно определить приближённо по формуле

$$P_{\text{т.в}} \approx 2D_a^3 \cdot n^3 \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-14}.$$

Добавочные потери

$$P_d = 0,01 \cdot (P_{эл} + P_{мех} + P_{с2}).$$

Суммарные потери

$$\sum P = P_d + P_{эл} + P_{мех} + P_{с2}.$$

Полная мощность электродвигателя

$$P_2 = I_2 \cdot U.$$

Полезная мощность электродвигателя

$$P_1 = P_2 - \sum P.$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}.$$

Вращающий момент электродвигателя

$$M_2 = 955 \frac{P_2}{n}.$$

В табл. 1 приведены рабочие характеристики двигателя мощностью 500 Вт, 10 000 мин⁻¹.

Таблица 1

Рабочие характеристики

<i>n</i>	о. е.	1,18 <i>n</i>	1,11 <i>n</i>	1,08 <i>n</i>	1,05 <i>n</i>	1 <i>n</i>	0,7 <i>n</i>
	мин ⁻¹	11 800	11 000	10 800	10 050	10 000	8000
<i>U</i>	В	24	24	24	24	24	24
<i>I</i> ₂	А	16,07	18,75	18,77	19,19	21,09	23,4
<i>P</i> _{эл}	Вт	46,28	54,1	54,201	56,028	60,9	66,99
<i>P</i> _{с2}	Вт	28,726	23,406	22,515	21,44	20,23	14,767
<i>P</i> _{мех}	Вт	1,274	1,199	1,167	1,135	1,08	0,76
<i>P</i> _д	Вт	0,076	0,078	0,077	0,078	0,09	0,082
$\sum P$	Вт	76,356	78,783	77,759	78,681	82,3	82,599
<i>P</i> ₁	Вт	309,324	371,217	372,721	381,879	423,867	479,001
<i>P</i> ₂	Вт	385,68	450	450,48	460,56	506,167	561,6
η	%	82	82,7	82,4	82,9	83,74	85,29
<i>M</i> ₂	Н·м	0,265	0,439 44	0,447 58	0,460 37	0,483 39	0,644 24

Заключение. В статье проведён анализ приводов, используемых в БПЛА. Показаны преимущества применения электродвигателей. Предложена упрощённая методика определения размерных соотношений, электромагнитных нагрузок бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами. Приведены рабочие характеристики и компьютерная модель в программе T-Flex CAD одного из вариантов двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 2791914 Российская Федерация, МПК В64С 39/02 (2006.01), G01R 31/08 (2006.01). Беспилотный летательный аппарат для диагностики высоковольтных электроустановок: № 2022129097: заявлено 08.11.2022; опубликовано 14.03.2023 / Ким К. К., Панычев А. Ю.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2 с.
2. Костышин, В. С. Моделирование режимов центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / В. С. Костышин. – Иваново-Франковск : ИФГТУНГ, 2000. – 163 с.

3. Шафиков, И. Н. Повышение энергоэффективности электроприводов погружных электроцентробежных насосов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шафиков Игорь Наилевич; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2020. – 176 с.
4. Иванов, С. Н. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
6. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1 / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
7. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 2 / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
8. David C. White, Herbert H. Woodson. Electromechanical Energy Conversion, New York, John Wiley and Sons, Inc. 1959. – 528 p.
9. Иванов, С. Н. Разработка электромеханической системы для привода беспилотного летательного аппарата / С. Н. Иванов, К. К. Ким, М. А. Ефремов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 5-11 декабря 2022 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2023. – Ч. 1. – С. 193-196.
10. К вопросу проектирования энергетической установки на основе водородных топливных элементов для малых беспилотных летательных аппаратов / А. В. Павленко [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. – № 1. – С. 5-13.
11. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Известия вузов. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
12. Krishna K. R. Unmanned aerial vehicle systems in crop production / K. R. Krishna. – Apple academic press, 2019. – 710 p.
13. Ram Avtar. Unmanned aerial vehicle: applications in agriculture and environment / Ram Avtar, Teiji Watanabe. – Springer, 2020. – 202 p.
13. Колесник, М. Б. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия вузов. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.
14. Колесник, М. Б. Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 43-47.
15. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов / А. А. Анучин. – М.: Издательский дом «МЭИ», 2015. – 373 с.
16. Мелешин, В. И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В. И. Мелешин, Д. А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2015. – 576 с.
17. Гаврилов, С. В. Управление электроприводом на основе бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами / С. В. Гаврилов, Д. Т. Занг, Н. Д. Тхань // Известия Санкт-Петербургского гос. электротехнического университета ЛЭТИ. – 2016. – Т. 8. – С. 53-62.