

Применительно к процессу исполнения задания следует отметить следующее. Переход из наведения на точку в режим захода на маршрут происходит условно при достаточном сближении с отрезком наведения, но переход из режима захода в режим проводки по заданной линии произойдет только в том случае, если будут выполнены условия по качеству предварительного сближения с точкой наведения. В случае, если при проходе траверса входной точки отрезка наведения условия вхождения оказываются не выполненными, решение о том, что система должна делать дальше, может быть принято дополнительно, однако если переключения не произойдет, система будет продолжать заводить летательный аппарат на отрезок наведения так, как будто получила команду захода на маршрут заново.

**Заключение.** Многочисленные эксперименты на модели показали, что данная система параметров обеспечивает надежное выполнение проводки летательного аппарата в широком диапазоне полетных заданий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Управление проводкой атмосферного летательного аппарата // Вопросы оборонной техники. Серия 9. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. – 2012. – Вып. 5 (257). – С. 49-56.
2. Каршаков Е.В. Особенности управления летательным аппаратом при выполнении аэросъемки // Проблемы управления. – 2012. – № 3. – С. 71-76.
3. O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998–2002: a survey // Proceedings of the American Control Conference. – Denver, Colorado, 2003. – P. 1494-1499.
4. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Афанасьев.

**Волковицкий Андрей Кириллович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; e-mail: avolkovitsky@yandex.ru; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: 84953349080; к.т.н.; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; ведущий инженер.

**Каршаков Евгений Владимирович** – e-mail: karshak@mail.ru; к.ф.-м.н.; лаборатория динамических информационно-управляющих систем, с.н.с.

**Павлов Борис Викторович** – e-mail: pavlov@ipu.ru; тел.: 84953349351; д.т.н.; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; гл.н.с.

**Volkovitsky Andrey Kirillovich** – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS; e-mail: avolkovitsky@yandex.ru; 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +74953349080; cand. of eng. sc.; dynamic information-control systems laboratory; leading engineer.

**Karshakov Evgeny Vladimirovich** – e-mail: karshak@mail.ru; cand. of phys.-math. sc.; dynamic information-control systems laboratory; senior researcher.

**Pavlov Boris Viktorovich** – e-mail: pavlov@ipu.ru; phone: +7495334-9351; dr. of eng. sc.; dynamic information-control systems laboratory; chief researcher.

УДК 621.314.5, 621.438

**П.Ю. Грачев, Е.В. Ежова, Е.Е. Горбачев, Д.В. Макаров**

#### **УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

*Задача снижения массы электрооборудования летательных аппаратов и повышения энергоэффективности этого оборудования является одной из актуальных задач разработки и проектирования таких аппаратов. Статья посвящена одному из вариантов решения*

*этой задачи, перспективному для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрен управляемый электродвигатель специальной конструкции, являющийся основным звеном силовой установки малоразмерного летательного аппарата. Достаточно подробно описана конструкция якоря электродвигателя, ротор которого совмещен с винтом летательного аппарата. Показана возможность существенного уменьшения массы и объема лобовых частей обмотки якоря. Система управления включает вентильные элементы и расположена на сердечнике якоря электродвигателя – около выводов обмотки. Рассмотрен один из вариантов структурной схемы системы управления частотой вращения электродвигателя. Описаны законы изменения частоты и напряжения якоря двигателя в режимах запуска и регулирования частоты вращения винта. Приведены результаты оценки энергоэффективности.*

*Электродвигатель; летательный аппарат; силовая установка; система управления; вентильный элемент; обмотка якоря; энергоэффективность.*

**P.J. Grachev, E.V. Ezhova, E.E. Gorbachev, D.V. Makarov**

### **THE OPERATED ELECTRIC MOTOR FOR A POWER-PLANT OF THE FLYING MACHINE**

*The problem of decrease in weight of an electric equipment of flying machines and increase of energy-efficiency this equipment is one of actual problems of exploitation and designing of such devices. Article is devoted one of variants of the decision of this problem, which is perspective for the small size pilotless flying machines. The operated electric motor of a special design, which are the basic block of a power-plant of a small size flying machine, is considered. The design of an anchor of the electric motor, which rotor is combined with the flying machine screw, is in detail enough described. Possibility of essential reduction of weight and volume of front parts of a winding of an anchor is shown. The control system includes elements of power electronic and is located on the core of an anchor of the electric motor – about winding conclusions. One of variants of the block diagram's of a control system for frequency of rotation of the electric motor is considered. Laws of change of frequency and pressure of an anchor of the motor in modes of start and regulation of frequency of rotation of the screw are described. Results of an estimation of energy-efficiency are resulted.*

*Electric motor; flying machine; power-plant; control system; elements of power electronic; winding of anchor; high energy-efficiency.*

**Введение.** При разработке, проектировании и расчетах силовых установок летательных аппаратов (ЛА), которые входят в класс подвижных объектов [1], решаются задачи снижения массообъемных показателей электрических и электромеханических систем таких энергетических установок и снижения их энергопотребления [2]. В летательных аппаратах, снабженных электрическим приводом, например малоразмерных беспилотных аппаратах, увеличение потерь приводит к снижению дальности полета. Основные потери электроэнергии, источником которой могут быть аккумуляторы и буферные накопители (например, емкостные накопители), наблюдаются в электромеханических преобразователях (основных силовых звеньях систем). Поэтому для малоразмерных беспилотных аппаратов актуальной задачей является снижение электрических и механических потерь при преобразовании электроэнергии в механическую энергию вращения винта ЛА. В работе [3] проведено сравнение предложенной авторами мехатронной системы с применяемыми в наземной технике ЕС-двигателями [4, 5]. Показана возможность снижения объема меди электрических машин и аппаратуры управления путем значительного уменьшения вылета лобовых частей обмоток машин [6], а также за счет уменьшения длины соединительных проводов. В статье рассматриваются особенности выполнения и перспективы применения подобного технического решения в малоразмерных беспилотных аппаратах с электрическим приводом.

**Особенности конструкции управляемого электродвигателя.** В патенте [6] предложена обмотка статора многополюсной машины переменного тока, например, для стартер-генераторной системы гибридного автомобиля. В [3] рассмотрена конструкция статора энергоэффективной машины переменного тока с четырьмя полюсами, блоки управления и защиты которой встроены в корпус машины.

Для силовой установки ЛА необходим электродвигатель с числом пар полюсов, большим двух. Покажем возможность применения двенадцатиполюсного электродвигателя в системе электропривода ЛА.

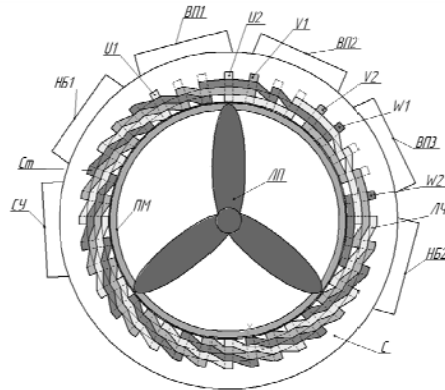


Рис. 1. Эскизная компоновка управляемого электродвигателя (вид 1)

На рис. 1 показана эскизная компоновка энергоблока силовой установки ЛА (вид 1), включающего источник электропитания, в виде буферного накопителя (НБ), вентильный преобразователь (ВП), синхронный электродвигатель (С) с индуктором из постоянных магнитов (ПМ), а также систему управления (СУ). Обмотка якоря двигателя коммутируется электронными модулями ВП, обозначенными на рисунке ВП1, ВП2, ВП3. Буферный накопитель выполнен в виде двух блоков – НБ1, НБ2. Синхронный двигатель с вентильным преобразователем (коммутатором) и СУ может работать как вентильный двигатель.

Кольцеобразный индуктор с постоянными магнитами ПМ жестко скреплен с лопастями (ЛП) винта ЛА. Он имеет вал, вращающийся в подшипниках, неподвижная часть которых крепится к якорю вентильного двигателя или к корпусу силовой установки. В тридцати шести пазах якоря С прямоугольного сечения расположены стержни двухслойной волновой обмотки.

На рис.1 показаны также лобовые части (ЛЧ) обмотки якоря двигателя, которые состоят из витковых лобовых перемычек (соединяют стержни нижнего и верхнего слоев обмотки), лобовых перемычек, соединяющих витковые группы обмотки (соединяют стержни верхнего слоев обмотки) и выводов фаз обмотки. Выводы фаз обмотки на рис.1 имеют следующее обозначения: начало и конец первой фазы –  $U1, U2$ , второй фазы –  $V1, V2$ , третьей фазы –  $W1, W2$ . Перемычки разных фаз выделены оттенками серого цвета. Лобовые перемычки фазы U – самый светлый оттенок, лобовые перемычки фазы V – более темный оттенок и лобовые перемычки фазы W – самый темный оттенок. Они расположены над торцевой поверхностью зубцовой зоны сердечника. Площади сечения стержней с лобовыми перемычками в местах их соединения в два раза меньше площадей поперечных сечений соединяемых стержней. Места соединений этих витковых лобовых перемычек с проводниками верхнего слоя обмотки расположены со стороны зубцовой поверхности сердечника, частично над лобовыми перемычками, соединяющими

витковые группы обмотки, а места соединений витковых лобовых перемычек с проводниками нижнего слоя обмотки расположены со стороны спинки сердечника. Площади сечения лобовых перемычек в местах их соединения с активными проводниками, так же как на рис. 3, в два раза меньше площадей поперечных сечений соединяемых проводников.

Схема трехфазной волновой стержневой обмотки якоря с диаметральной шагом приведена на рис. 2. Обозначения на схеме соответствуют [7].

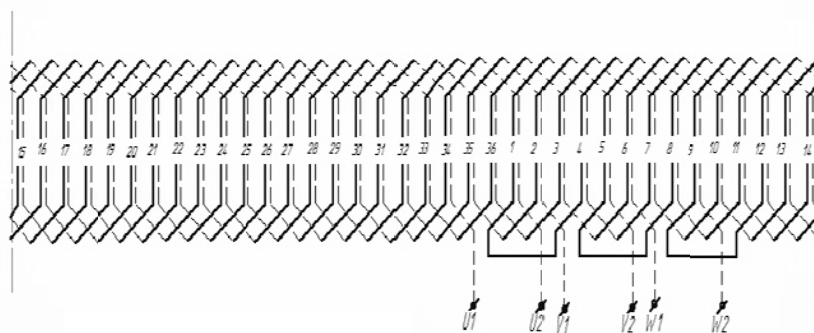


Рис. 2. Схема обмотки якоря управляемого электродвигателя

Как видно, сердечник статора имеет тридцать шесть пазов, которые пронумерованы в центре рисунка в направлении чередования фаз. Сплошными линиями в пазах обозначены активные проводники верхнего слоя обмотки, а пунктиром – активные проводники нижнего слоя. Показаны также витковые лобовые перемычки, соединяющие стержни витков, лобовые перемычки, соединяющие витковые группы и выводы фаз (в нижней части схемы), а также показаны витковые лобовые перемычки с другой стороны сердечника (в верхней части схемы). Обозначения выводов фаз обмотки электродвигателя соответствуют конструктивному выполнению частей этой обмотки, изображенному на рис. 1.

На рис. 3 показана эскизная компоновка энергоблока силовой установки ЛА (вид 2). Здесь показаны лобовые витковые перемычки обмотки, расположенные с другой стороны сердечника статора – вентильного двигателя. Они изображены в верхней части схемы обмотки (рис. 2). Обозначения на этом рисунке соответствуют рис. 1. Латинскими буквами  $U1, U2; V1, V2; W1, W2$  обозначены стержни обмотки, соединенные с соответствующими выводами фаз.

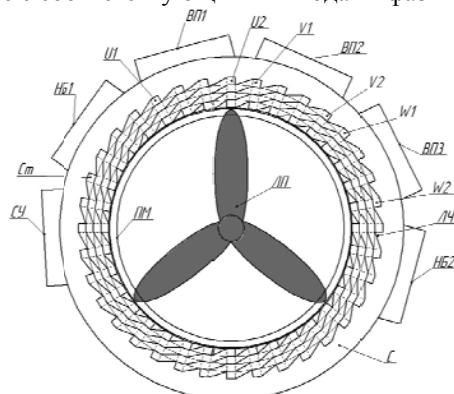


Рис. 3. Эскизная компоновка управляемого электродвигателя (вид 2)

Вентильный преобразователь выполнен по схеме автономного инвертора напряжения. Конструктивно силовая часть преобразователя состоит из трех транзисторных модулей ВП1, ВП2, ВП3, соединенных с выводами обмотки якоря двигателя и блоками НБ1, НБ2, включающими электрохимические и (или) емкостные накопители энергии, а также элементы для циркуляции реактивных токов. Транзисторные модули ВП1, ВП2, ВП3 расположены над выводами  $U1, U2, V1, V2, W1, W2$  фаз обмотки якоря так, чтобы обеспечить минимальную длину соединений.

Система управления энергоблоком силовой установки ЛА, расположенная в блоке СУ, включает систему управления вентильным преобразователем и систему регулирования частоты вращения винтов для управления полетом ЛА.

**Работа системы управления.** Система управления энергоблоком силовой установки ЛА выполняет функции управления запуском винтов ЛА, а также регулирования вращения вала электродвигателей силовой установки ЛА (включает, например, два энергоблока) и, соответственно, винтов малоразмерного беспилотного аппарата. Может применяться частотное регулирование синхронного двигателя с постоянными магнитами или традиционная система «вентильный двигатель» с датчиками положения ротора.

На рис. 4 показана структурная схема одного из вариантов СУ энергоблоком силовой установки ЛА с управляемым электродвигателем.

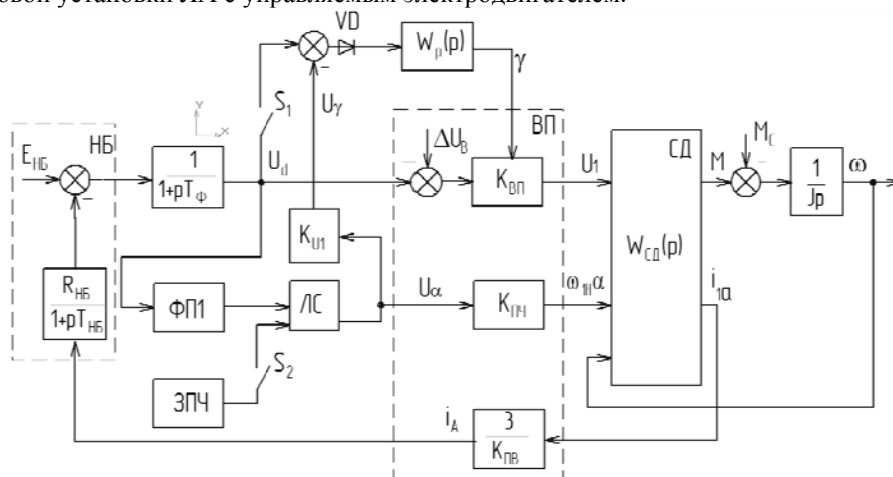


Рис. 4. Структурная схема СУ

Структурная схема учитывает внутреннее сопротивление  $R_{НБ}$  и постоянную времени  $T_{НБ}$  буферного накопителя, постоянную времени фильтра  $T_{Ф}$  и падения напряжения на вентильях  $\Delta U_{В}$  преобразователя, изменения момента сопротивления воздушного потока  $M_{С}$  и момент инерции  $J$  вращающихся масс  $J$  ротора с винтом. Входными сигналами звена  $W_{сд}(p)$  синхронного двигателя СД приняты: фазное напряжение  $U_1$ , частота тока якоря  $\omega_{1H}\alpha$  и частота вращения ротора  $\omega$ , а выходными – электромагнитный момент  $M$  и активная составляющая тока якоря  $i_{1a}$ .

Вентильный преобразователь представлен безынерционным звеном с коэффициентом передачи по напряжению  $K_{ВП}$ , по току  $K_{У1}$  и по частоте  $K_{ПЧ}$ . Выход логической схемы ЛС через безынерционное звено ( $K_{У1}$ ) подключен на устройство сравнения, выход которого через диод и регулятор с передаточной функцией  $W_{п}(p)$  включен на вход широтно-импульсного регулирования (ШИР) вентильного преобразователя ВП.

Запуск происходит следующим образом. После замыкания ключей S1, S2 и включения ВП, он начинает плавно увеличивать частоту, регулируемую задатчиком пусковой частоты ЗПЧ. Скважность  $\gamma$  импульсов фазного напряжения ВП устанавливается регулятором  $W_p(p)$  такой, чтобы поддерживался требуемый коэффициент форсировки потока якоря при пусковых частотах. По мере уменьшения напряжения  $U_d$  скважность увеличивается, при  $U_d \leq U_\gamma$  она равна единице, – ШИР выключается.

Когда выходной сигнал функционального преобразователя ФП1 станет меньше выходного сигнала ЗПЧ, логическая схема ЛС подключает ФП1 на вход  $U_\alpha$  регулирования частоты ВП, – начинается рабочий процесс частотного регулирования СД, с изменением напряжения якоря СД путем ШИР или ШИМ.

**Оценка энергоэффективности.** Энергоэффективность электродвигателя силовой установки летательного аппарата с частотным управлением, описанного в статье, определяется в основном снижением электрических потерь в цепи статора, низкими потерями в индукторе с постоянными магнитами, а также увеличением развиваемого им момента.

Увеличение момента рассмотренного двигателя, по сравнению с двигателем [3, 6], с одной стороны, связано со снижением индуктивности рассеяния лобовых частей обмотки якоря за счет увеличения воздушных зазоров между лобовыми перемычками. Эта индуктивность

$$L_{л1} = \frac{2\pi w^2 q \cdot l_{ЛВ}}{h_l} (2\Delta + b_l) \left[ 1 - \frac{1 - e^{-\frac{2\pi h_l}{\tau}}}{\frac{2\pi h_l}{\tau}} \left\{ 1 - \frac{\mu - 1}{2(\mu + 1)} e^{-\frac{2\pi \delta_l}{\tau}} \left( 1 - e^{-\frac{2\pi h_l}{\tau}} \right) \right\} \right] 10^{-10}, (1)$$

где  $l_{ЛВ}$  – длина лобовых частей одного витка обмотки статора (мм);  $h, b, \delta, \Delta$  – размеры перемычек и размеры зазоров (мм);  $\mu$  – усредненная магнитная проницаемость зубцовой зоны сердечника, над которой расположены витковые перемычки;  $w$  – число витков ветви фазы обмотки;  $q$  – число ветвей в фазе.

С другой стороны, – за счет постоянных магнитов индуктора.

Сравнивая предложенный вариант с установкой при использовании редуктора, следует отметить снижение уровня шума и механических потерь.

Объем меди может быть снижен за счет уменьшения сечения лобовых проводников и соединений блоков, при их охлаждении струей забортного воздуха.

Ориентировочно, при 1 кВт экономия меди составляет около 35 %, а повышение коэффициента полезного действия – около 1,5 %, что приведет к снижению энергопотребления и увеличению дальности полета ЛА.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 20011. – 350 с.
2. *Костырев М.Л., Грачев П.Ю.* Асинхронные вентильные генераторы и стартер-генераторы для автономных энергоустановок. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 199 с.
3. *Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е.* Энергоэффективная электрическая машина переменного тока со встроенной системой управления и защиты Перспективные системы и задачи управления // Материалы Седьмой Всероссийской науч.-практ. конф. – Таганрог, 2012. – С. 191-196.
4. The synergy of EC motors and FCUs // Modern Building Services. 2006, August.
5. *Вишневецкий Е.П., Малков Г.В.* ЕС-двигатели: что, где, почему и зачем // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2011. – № 8. <http://www.abok.ru>.

6. Пат. 2275729 РФ. Обмотка электрической машины / П.Ю. Грачев, Ф.Н. Сарапулов, Е.В. Ежова. Бюл. №12, 2006.
7. *Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф.* Электрические машины: Учебное пособие для вузов. – М.: Academia, 2010. – 320 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Дубинин.

**Грачев Павел Юрьевич** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет»; e-mail: pgrachov@mail.ru; 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244; тел.: 88463348069; кафедра теоретической и общей электротехники; д.т.н.; доцент.

**Ежова Елена Владимировна** – e-mail: a-ezhova@yandex.ru; тел.: 88463370937; кафедра теоретической и общей электротехники; к.т.н.; ст. преподаватель.

**Горбачев Евгений Евгеньевич** – e-mail: egorbachev@mail.ru; тел.: 88463370937; кафедра теоретической и общей электротехники; аспирант.

**Макаров Дмитрий Викторович** – e-mail: amen07@ yandex.ru; тел.: 88463370937; кафедра теоретической и общей электротехники; магистрант.

**Grachev Pavel Jurevich** – Federal State-Owned Budgetary Educational Establishment of Higher Vocational Education «Samara State Technical University»; e-mail: pgrachov@mail.ru; 244, Molodogvardejsky street, Samara, 443100, Russia; phone: +78463348069; the department of theoretical and general electrical engineers; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Ezhova Elena Vladimirovna** – e-mail: a-ezhova@yandex.ru; phone: +78463370937; the department of theoretical and general electrical engineers; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

**Gorbachev Evgeny Evgenevich** – e-mail: egorbachev@mail.ru; phone: +78463370937; the department of theoretical and general electrical engineers; postgraduate student.

**Makarov Dmitry Viktorovich** – e-mail: amen07@ yandex.ru; phone: +78463370937; the department of theoretical and general electrical engineers; graduate student.