

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ КАК ПЕРВЫЙ ЭТАП В СОЗДАНИИ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

© 2023

А. В. Сычёв ведущий инженер, Передовая инженерная школа МАИ;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
saavia@mail.ru

Ю. А. Равикович доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
yugav@mai.ru

Д. А. Борисов инженер, Передовая инженерная школа МАИ;
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет);
dimaavia98@mail.ru

Рассматривается стенд для испытания электрической винтомоторной группы и входящие в него компоненты. Испытательный стенд разработан для первого этапа практических исследований создания гибридной силовой установки параллельной схемы на базе поршневого и электрического двигателей. Винтомоторная группа создана для лёгких летательных аппаратов с мощностью двигателя 10...20 кВт. В статье сделаны выводы о проведённых стендовых испытаниях и работе стенда. Показаны дальнейшие разработки электрического мотор-генератора для гибридной силовой установки, которые были сделаны на базе проведённых стендовых экспериментов электрической винтомоторной группы.

Электрическая винтомоторная группа; экспериментальный стенд; гибридная силовая установка

Цитирование: Сычёв А.В., Равикович Ю.А., Борисов Д.А. Стендовые испытания электрической винтомоторной группы как первый этап в создании гибридной силовой установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 3. С. 99-107. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-99-107

Введение

В настоящее время в связи с развитием новых авиационных технологий ведутся разработки электрических и гибридных силовых установок. Применение подобных силовых установок связано с ужесточением экологических норм и достижением предела развития традиционных газотурбинных и поршневых двигателей в авиации. Важной частью разработок являются экспериментальные стенды. Создание стендов для электрической винтомоторной группы (ЭВМГ) позволяет собрать необходимую информацию о силовых установках (СУ) и их компонентах. Получение практического опыта эксплуатации СУ на стенде в дальнейшем позволяет устанавливать СУ на экспериментальные летательные аппараты (ЛА).

Примерами таких стендов может служить стенд проекта гибридной силовой установки (ГСУ) для самолёта e-Genius (Германия) [1], представленный на рис. 1. Этот стенд рассчитан для испытаний электрических силовых установок (ЭСУ) и ГСУ мощностью до 80 кВт.



Рис. 1. Экспериментальный стенд гибридной силовой установки самолёта e-Genius

Также производятся стенды для тестирования ЭВМГ малых мощностей от 10 до 500 Вт. Такой стенд создан в научно-производственной компании «Мета-технологии» (Россия) [2].

Подобными разработками стендов в России занимаются АО «Объединённая двигателестроительная корпорация» (ОДК), Московский авиационный институт (МАИ), Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ЦИАМ) [3 – 8]. За рубежом подобными стендами занимаются NASA, Siemens, Airbus, RollsRoyce и ряд Европейских и Американских университетов, в том числе итальянский Università di Napoli «Federico II» [9] и компания e-Genius [10].

Цели и задачи

Целями и задачами разработки стенда является отработка и испытание ЭВМГ для лёгких ЛА после теоретических расчётов, а также подтверждение параметров, заявленных в техническом задании на ЭВМГ. На базе разработанной и испытанной ЭВМГ был создан экспериментальный мотор-генератор, который применяется в ГСУ параллельного типа на базе поршневого (ПД) и электрического (ЭД) двигателей.

Описание стенда

Стенд для тестирования ЭВМГ используется при проведении различных испытаний и проверок работоспособности, надёжности и производительности ЭВМГ. Стенд позволяет проводить тесты на производительность ЭВМГ, включая измерение напряжения аккумуляторной батареи, потребляемого батарейного тока, электрической мощности, крутящего момента электродвигателя, числа оборотов электродвигателя, механической мощности, эффективности, температур основных агрегатов и других характеристик.

Стенд может использоваться для анализа работы ЭВМГ при различных режимах нагрузки. Это помогает определить предельные нагрузки, которые ЭВМГ может выдержать, и оценить её долговечность и стабильность в экстремальных условиях. Стенд может использоваться для настройки параметров и конструкции ЭВМГ с целью достижения максимальной эффективности и оптимального соотношения мощности и расхода заряда аккумуляторной батареи. В целом стенд для тестирования ЭВМГ позволяет проводить всестороннюю оценку её производительности, надёжности и соответствия предъявляемым требованиям, что является важным этапом в разработке и производстве подобных систем.

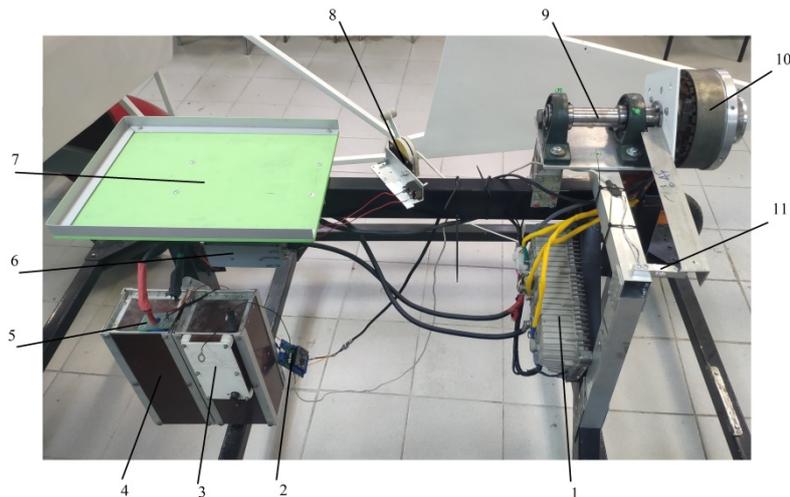


Рис. 2. Стенд для измерения параметров электрической винтомоторной группы:
 1 – векторный контроллер электродвигателя; 2 – преобразователь электрических сигналов;
 3 – плата управления аккумуляторной батареей; 4 – аккумуляторная батарея; 5 – датчик тока и напряжения; 6 – блок предохранителей и коммутации; 7 – площадка для установки ноутбука с измерительным программным обеспечением; 8 – тумблер включения и ручка управления мощностью электродвигателя; 9 – подвижная моторама электродвигателя; 10 – электродвигатель со встроенными датчиками температуры и оборотов; 11 – тензометрический датчик измерения момента

На рис. 2 представлен стенд для тестирования ЭВМГ. Силовая рама стенда выполнена из стальных профильных труб, скреплённых болтовым соединением. Опорный вал моторама электродвигателя и поворотный-измерительный механизм крутящего момента установлен в подшипниковые опоры, размещённые на алюминиевом основании. Ограниченная подвижность моторама с помощью рычага и тензодатчика позволяет измерять крутящий момент электродвигателя.

Векторный контроллер

В качестве векторного контроллера на стенде установлен Kelly KLS7275H [11]. Векторный контроллер предназначен для управления электрическими приводами и позволяет достичь точного и эффективного контроля над их работой. Он основан на представлении электромотора в виде математической модели, где используются векторные операции для управления током и напряжением в статоре и роторе мотора.

Векторные контроллеры применяются для управления переменными скоростными приводами, такими как асинхронные (индукционные) и синхронные электромоторы. Векторный контроллер позволяет достичь высокой точности контроля скорости, крутящего момента и позиции ротора электромотора путём управления амплитудой и фазой входящих сигналов. Преимуществом векторного контроллера является высокая точность и динамический отклик, эффективное использование энергии, широкий диапазон скоростей и возможность контроля над различными параметрами мотора.

Использованный контроллер предназначен для работы с синхронными электродвигателями с постоянными магнитами. Для реализации векторного управления контроллер имеет входы для подключения трёх датчиков, работающих на эффекте Холла – для определения текущего положения ротора, и вход для датчика температуры статорных обмоток.

Контроллер работает на напряжении 24...84 вольт и токе 500 ампер кратковременно и 200 ампер – длительно. Для управления выходной мощностью используется входной аналоговый сигнал 0...5 вольт или сигнал широтно-импульсной модуляции с частотой более 1 кГц.

Преобразователь электрических сигналов

Преобразователь электрических сигналов предназначен для считывания сигналов с датчиков температуры, напряжения, тока, оборотов, крутящего момента и преобразования их в цифровой сигнал для передачи на персональный компьютер, где они могут быть визуализированы (рис. 3) и записаны для последующего анализа.

Преобразователь выполнен на микроконтроллере Atmega 2560, который преобразует аналоговые и цифровые сигналы с датчиков в сигналы эмулируемого com port шины usb.

Плата управления аккумуляторными батареями

Для правильной работы литий-полимерных аккумуляторов необходимо соблюдать требования производителя ячеек. Чтобы продлить срок службы аккумуляторов, нужно чётко соблюдать рекомендации по их эксплуатации. Аккумуляторные ячейки не рекомендуется как полностью заряжать, так и доводить до полного разряда. Также не следует нагружать элементы сверхтоками и использовать для зарядки специализированные зарядные устройства с особыми алгоритмами заряда. Следует соблюдать температурные условия эксплуатации, так как при низких температурах ячейки теряют часть ёмкости, а при высоких есть риск деградации и выхода ячеек из строя.

Для защиты литий-полимерных аккумуляторов применяют специализированные устройства – BMS (Battery Management System) контроллеры. Система управления батареей призвана защитить её от различных негативных факторов и максимально продлить срок службы батареи.

Основная функция BMS – не давать выходить за пределы рабочих напряжений как всей аккумуляторной батарее в целом, так и каждой отдельной ячейке. Также платы BMS призваны решать ещё ряд важных задач: ограничение тока, защита от короткого замыкания (КЗ), контроль токов заряда и разряда. В случае, если сила тока выходит за определённые значения, BMS на некоторое время разрывает электрическую цепь. Служит это для защиты батареи от КЗ и чрезмерно высокой силы тока, поскольку каждая аккумуляторная батарея рассчитана на определённые нагрузки.



Рис. 3. Интерфейс визуализации измеренных параметров

На многих BMS установлены температурные датчики, они следят за температурой аккумуляторной батареи, при превышении пороговых значений плата размыкает электрическую цепь до тех пор, пока аккумуляторная батарея не остынет.

Исходя из параметров электродвигателя и аккумуляторной батареи, был выбран конфигурируемый BMS контроллер ANT 20s 400A [11], который может работать с Li-po, Li-ion, Li-Fe ячейками в количестве от 10 до 20 штук. Контроллер имеет на борту Bluetooth модуль для подключения к смартфону. С помощью установленного приложения можно выполнять настройку параметров работы BMS. Имеются обширные настройки по конфигурированию параметров работы. Кроме того, имеется uart интерфейс. Данный интерфейс служит для подключения дисплея для отображения параметров, а также может быть использован для подключения к сторонним контроллерам с целью получения информации.

Аккумуляторная батарея

Аккумуляторная батарея [12] служит для накопления электрической энергии и предназначена для питания векторного контроллера. Батарея состоит из 20-ти последовательно соединенных Li NMC (Литий-никель-марганцево-кобальтовые) ячеек напряжением 4,2 вольт, емкостью 50 Ач и номинальным током 200 ампер. Li NMC аккумуляторы являются типом литий-ионных аккумуляторов, которые состоят из комбинации никеля (Ni), марганца (Mn), кобальта (Co) и лития (Li) в катодах. Этот тип аккумуляторов обладает рядом преимуществ, включая высокую энергетическую плотность, хорошую стабильность работы и длительный срок службы. Высокая энергетическая плотность означает, что они могут хранить больше энергии на единицу массы по сравнению с другими типами аккумуляторов. Это делает их привлекательными для применения по следующим причинам:

- компактность и длительное время работы;
- высокое рабочее напряжение, они могут обеспечить стабильное напряжение в течение большей части разрядного цикла;
- обладают длительным сроком службы, они могут выдерживать большое количество циклов зарядки и разрядки, прежде чем их ёмкость начнёт существенно снижаться;
- могут работать в широком диапазоне температур, что делает их подходящими для применения в различных условиях.

Электродвигатель

В качестве электропривода используется вентильный ЭД на постоянных магнитах с внешним ротором. Данный тип двигателя обладает высоким КПД и обладает наилучшими удельными характеристиками мощности по отношению к массе. Использование конструкции с внешним ротором позволяет крепить воздушный винт непосредственно к ЭД без дополнительных промежуточных механических звеньев (редуктора и т.п.).

Конструктивно ЭД состоит из ротора с 9 парами магнитных полюсов, статора с 27 катушками, вала и двух подшипников.

В ЭД применена 3-базовая сосредоточенная обмотка, каждая фаза состоит из 9 катушечных групп. Намотка выполнена обмоточным проводом диаметром 1 мм. Каждая фаза обмотки набрана из 12 жил и последовательно намотана на 9 катушечных групп, по 2 витка на каждый зуб. Фазы соединены по схеме «звезда».

Результаты

Результаты тестирования ЭВМГ на стенде представлены на рис. 4. Обороты ЭД, полученные при положении РУД 85%, составили 2900 об/мин, что соответствует расчётным параметрам воздушного винта (ВВ). Погрешность расчётной статической тяги ВВ и практической полученной на стенде составила не более 5%. Полученные данные статической тяги ВВ и безотказной работы ЭВМГ в течение 5 часов наработки позволили принять решение о последующей установке ЭВМГ на экспериментальный ЛА.

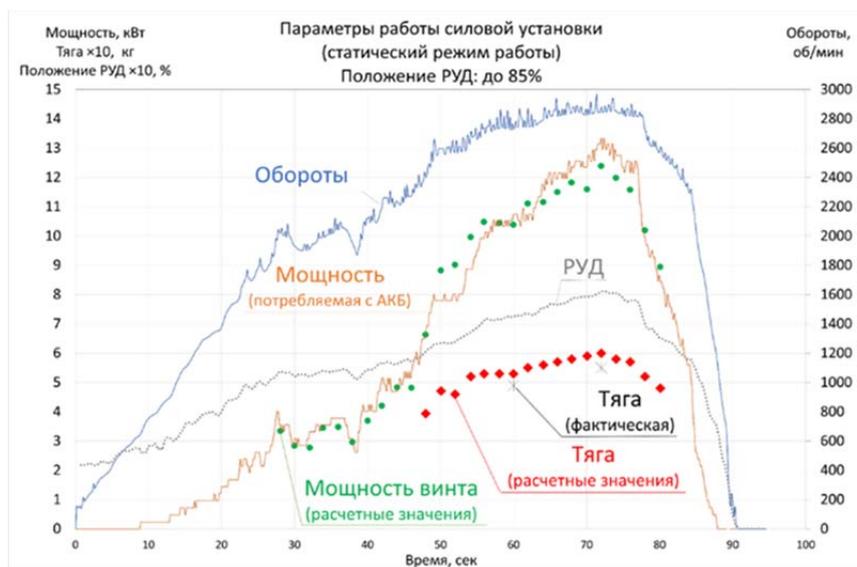


Рис. 4. Параметры работы электрической винтомоторной группы



Рис. 5. Мотор-генератор для гибридной силовой установки



Рис. 6. Компоновка электрического мотор-генератора в гибридной силовой установке на базе поршневого двигателя

Результаты экспериментальных исследований позволили в дальнейшем создать на базе ЭВМГ мотор-генератор для экспериментальной ГСУ. На рис. 5 представлен разработанный электрический мотор-генератор ГСУ, основным отличием которого от ЭВМГ является венец ротора, выполненный в виде ведомого шкива. На рис. 6 показана компоновка электрического мотор-генератора. Также стенд позволяет снять характеристики воздушного винта в статическом режиме при скорости движения 0 км/ч [13; 14].

Библиографический список

1. Website des elektroflugzeugs «e-Genius». <https://www.ifb.uni-stuttgart.de/forschung/flugzeugentwurf/flugzeugprojekte/e-genius-00001/>
2. Сайт компании «Мета технологии». <https://www.meta-technology.ru/>
3. Ravikovich Yu., Ponyaev L., Kuprikov M., Domjan R. Innovation design analysis of the optimal aerodynamic adaptive smart structures for disc-body solar hybrid electric aircraft and airship concepts // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. V. 1024. DOI: 10.1088/1757-899x/1024/1/012078
4. Affoso W., Gandolfi R., Nunes dos Reis R.J., Ilário da Silva C.R., Rodio N., Kipouros T., Laskaridis P., Chekin A., Ravikovich Yu., Ivanov N., Ponyaev L., Holobtsev D. Thermal management challenges for HEA – FUTPRINT50 // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2021. V. 1024. DOI: 10.1088/1757-899x/1024/1/012075
5. Сычёв А.В., Балясный К.В., Борисов Д.А. Гибридная силовая установка с использованием электрического двигателя и двигателя внутреннего сгорания с общим приводом на воздушный винт // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29, № 4. С. 172-185. DOI: 10.34759/vst-2022-4-172-185
6. Сычёв А.В., Балясный К.В. Небесный электролёт // Моделист конструктор. 2021. № 7.
7. Сычёв А.В., Балясный К.В. Вопросы применения электрического двигателя на сверхлёгком самолёте // Двигатель. 2020. № 4-6 (130-132). С. 48-49.
8. Варюхин А.Н., Захарченко В.С., Гелиев А.В., Гордин М.В., Киселев И.О., Журавлев Д.И., Загуменнов Ф.А., Казаков А.В., Вавилов В.Е. Формирование обликов электрической силовой установки для сверхлёгкого пилотируемого самолёта // Авиационные двигатели. 2020. № 3 (8). С. 5-14. DOI: 10.54349/26586061_2020_3_5
9. Marciello V., Orefice F., Nicolosi F., Cusati V., Corcione S. State of the art of hybrid aircraft design projects. https://www.elica-cleansky-project.eu/docs/ELICA_D4.1%20-%20State%20of%20the%20Art%20of%20Hybrid%20Aircraft%20Design%20Projects.pdf
10. Bergmann D.P., Denzel J., Baden A., Lucas Kugler L., Strohmayer A. Innovative scaled test platform e-Genius-Mod – scaling methods and systems design // Aerospace. 2019. V. 6, Iss. 2. DOI: 10.3390/aerospace6020020
11. Сайт компании Kelly. <https://kellycontroller.ru/>
12. Кириллов А.В., Ковалёв М.А., Соловьёв В.И. Авиационные аккумуляторные батареи: учеб. пособие. Самара: Издательство Самарского университета, 2020. 80 с.
13. Александров В.Л. Воздушные винты: учеб. пособие. М.: Оборонгиз, 1951. 476 с.
14. Кравец А.С. Характеристики воздушных винтов: учеб. пособие. М.: Оборонгиз, 1941. 264 с.

BENCH TESTS OF AN ELECTRIC ENGINE-PROPELLER GROUP, AS THE FIRST STAGE IN THE CREATION OF A HYBRID POWER PLANT

© 2023

A. V. Sychev Leading Engineer, MAI Advanced Engineering School;
Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation;
saavia@mail.ru

Yu. A. Ravikovich Doctor of Science (Engineering), Professor, Vice-Rector for Research;
Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation;
yurav@mai.ru

D. A. Borisov Engineer, MAI Advanced Engineering School;
Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation;
dimaavia98@mail.ru

The article discusses a stand for testing an electric propulsion system and its components. The test bench was developed for the first stage of practical research on the creation of a hybrid parallel-circuit power plant based on a piston and electric motors. The engine-propeller group was created for light aircraft with an engine power of 10...20 kW. The article presents conclusions about the conducted bench tests and the operation of the stand. Further developments of an electric motor-generator set for a hybrid power plant made on the basis of bench experiments of the electric engine-propeller combination are shown.

Electric engine-propeller group; test stand; hybrid power plant

Citation: Sychev A.V., Ravikovich Yu.A., Borisov D.A. Bench tests of an electric engine-propeller group, as the first stage in the creation of a hybrid power plant. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 3. P. 99-107. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-3-99-107

References

1. Website des elektroflugzeugs «e-Genius». Available at: <https://www.ifb.uni-stuttgart.de/forschung/flugzeugentwurf/flugzeugprojekte/e-genius-00001/>
2. *Sayt kompanii «Meta tekhnologii»* [Website of the company «Meta Technology»]. Available at: <https://www.meta-technology.ru/>
3. Ravikovich Yu., Ponyaev L., Kuprikov M., Domjan R. Innovation design analysis of the optimal aerodynamic adaptive smart structures for disc-body solar hybrid electric aircraft and airship concepts. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1024. DOI: 10.1088/1757-899x/1024/1/012078
4. Affoso W., Gandolfi R., Nunes dos Reis R.J., Ilário da Silva C.R., Rodio N., Kipouros T., Laskaridis P., Chekin A., Ravikovich Yu., Ivanov N., Ponyaev L., Holobtsev D. Thermal management challenges for HEA – FUTPRINT50. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1024. DOI: 10.1088/1757-899x/1024/1/012075
5. Sychev A.V., Balyasny K.V., Borisov D.A. Hybrid power plant employing electric motor and an internal combustion engine with a common drive to the propeller. *Aerospace MAI Journal*. 2022. V. 29, no. 4. P. 172-185. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2022-4-172-185
6. Sychev A.V., Balyasny K.V. Sky electric flyer. *Modelist Constructor*. 2021 No. 7. (In Russ.)
7. Sychev A.V., Balyasny K.V. Issues of the use of an electric engine on an ultralight aircraft. *Dvigatel'*. 2020. No. 4-6 (130-132). P. 48-49. (In Russ.)
8. Varyukhin A.N., Zakharchenko V.S., Geliev A.V., Gordin M.V., Kiselev I.O., Zhuravlev D.I., Zagumennov F.A., Kazakov A.V., Vavilov V.E. Conceptual design of electric

propulsion systems for ultralight manned airplane. *Aviation Engines*. 2020. No. 3 (8). P. 5-14. (In Russ.). DOI: 10.54349/26586061_2020_3_5

9. Marciello V., Orefice F., Nicolosi F., Cusati V., Corcione S. State of the art of hybrid aircraft design projects. Available at: https://www.elica-cleansky-project.eu/docs/ELICA_D4.1%20-%20State%20of%20the%20Art%20of%20Hybrid%20Aircraft%20Design%20Projects.pdf

10. Bergmann D.P., Denzel J., Baden A., Lucas Kugler L., Strohmayer A. Innovative scaled test platform e-Genius-Mod – scaling methods and systems design. *Aerospace*. 2019. V. 6, Iss. 2. DOI: 10.3390/aerospace6020020

11. *Sayt kompanii Kelly* [Site of the company Kelly]. Available at: <https://kellycontroller.ru/>

12. Kirillov A.V., Kovalev M.A., Solov'ev V.I. *Aviatsionnye akkumulyatornye batarei: ucheb. posobie* [Aviation storage batteries: textbook]. Samara: Samara University Publ., 2020. 80 p.

13. Aleksandrov V.L. *Vozdushnye vinty: ucheb. posobie* [Airscrews: study guide]. Moscow: Oborongiz Publ., 1951. 476 p.

14. Kravets A.S. *Kharakteristiki vozdushnykh vintov: ucheb. posobie* [Characteristics of propellers: study guide]. Moscow: Oborongiz Publ., 1941. 264 p.