

УДК 621.431, 621.313.13

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ПОРШНЕВОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ В АВИАЦИОННОЙ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМЫ

А. В. СЫЧЕВ¹, Ю. А. РАВИКОВИЧ², К. В. БАЛАСНЫЙ³

¹saavia@mail.ru, ²yurav@mail.ru, ³balyasnyi.k.v@gmail.com

ФГБОУ ВО «Московский авиационный университет» (национальный исследовательский университет), г. Москва

Поступила в редакцию 11.09.2023

Аннотация. В статье рассматривается синхронизация работы поршневого (ПД) и электрического двигателя (ЭД) в авиационной гибридной силовой установке (ГСУ) параллельной схемы. Приведены схемы параллельной и последовательной ГСУ на базе ПД и ЭД. Отмечены особенности ГСУ параллельной схемы. Проанализированы графики мощности и крутящего момента ПД, ЭД и ГСУ с воздушным винтом. Сделаны выводы о возможности синхронизации разнотипных двигателей в составе ГСУ с учетом потерь мощности.

Ключевые слова: авиационная гибридная силовая установка, поршневой двигатель, электрический двигатель, воздушный винт, синхронизация работы разнотипных двигателей.

ВВЕДЕНИЕ

Авиационные гибридные силовые установки (ГСУ) [11] на базе поршневого (ПД) [17,18] и электрического (ЭД) двигателей в настоящее время получают распространение для легких летательных аппаратов.

Это связано с ужесточением экологических норм и достигнутыми предельными характеристиками традиционных силовых установок (СУ) – газотурбинных двигателей (ГТД) и ПД, применяемых в авиации. Использование чисто электрических силовых установок ограничивается худшими по сравнению с традиционным топливом для ПД энергетическими характеристиками аккумуляторных батарей (АКБ).

Взлетная масса современных пилотируемых и беспилотных ЛА, использующих ГСУ на базе ПД и ЭД, обычно находится в диапазоне от 1 до 1000 кг с мощностью силовой установки от 1 до 300 кВт [13-14].

В совокупности использование ГСУ и ЭСУ на современном этапе развития позволяет создавать ЛА новых типов с перспективными компоновками ЛА и СУ.

Важной проблемой в ГСУ является синхронизация работы двух разнотипных двигателей (ПД и ЭД) и их согласование с воздушным винтом (ВВ).

В настоящее время мало практических работ, где теоретические исследования по ГСУ сочетаются с практическими экспериментальными работами на стенде ГСУ и летными испытаниями. Среди зарубежных компаний и организаций наибольший интерес к ГСУ проявляют NASA, Siemens, Airbus, Rolls-Royce и ряд европейских и американских университетов. В России исследованиями ГСУ занимаются ОДК и научно-исследовательские институты: МАИ [1-7], ЦИАМ [8-11], ЦАГИ, СибНИА [12] и др.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является исследование синхронизации работы двух разнотипных двигателей (ПД и ЭД) в ГСУ параллельного типа с учетом характеристик ВВ для легких ЛА.

Основными целевыми параметрами являются:

- мощность, крутящий момент, обороты ПД и ЭД;
- мощность, крутящий момент, обороты ГСУ;
- потери при синхронизации работы ПД и ЭД в ГСУ.

СХЕМА ГСУ

Существуют две основных схемы ГСУ на базе ПД и ЭД – последовательная и параллельная. В параллельной схеме ПД соединен с воздушным винтом через ЭД, буферный аккумулятор позволяет работать ЭД и повышать мощность всей ГСУ на разных режимах полета, ЭД может переходить в режим генератора для подзарядки буферной АКБ. В последовательной схеме ПД приводит в работу генератор, который заряжает буферную АКБ, и далее электричество из АКБ подается на ЭД, вращающий воздушный винт.

Последовательная схема (рис. 1) является более простой, т.к. она включает в себя отдельные агрегаты – генератор и ПД, не имеющий непосредственную механическую связь с ЭД и воздушным винтом (ВВ). ПД в последовательной схеме может работать постоянно на одном выгодном режиме, что влияет на увеличение ресурса ДВС и оптимизирует расход топлива на всех режимах работы ГСУ.

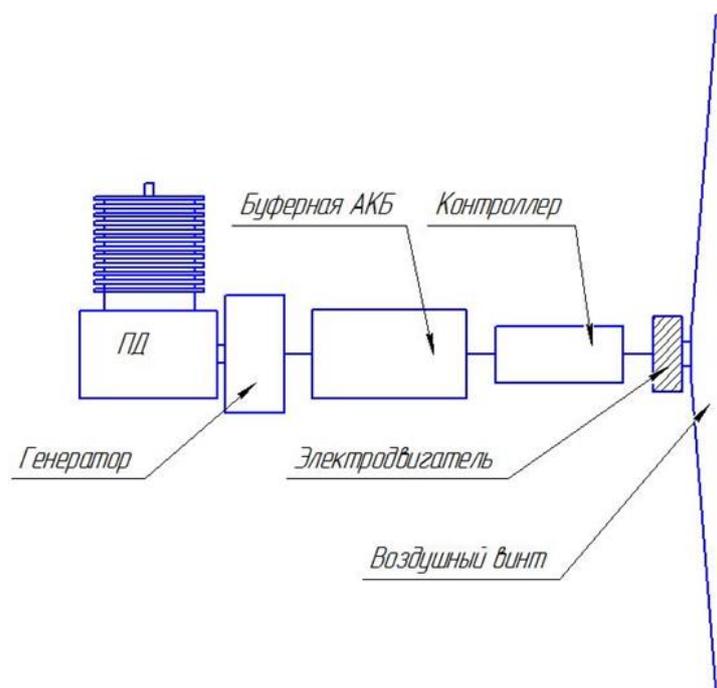


Рис. 1. Последовательная схема ГСУ.

Параллельная схема (рис. 2, 3) с использованием мотор-генератора на базе ЭД позволяет сделать ГСУ более компактной, что влияет на массогабаритные характеристики. Использование ЭД в качестве обратимой электрической машины позволяет использовать один агрегат в трех назначениях – повышение мощности ПД, подзарядка буферной АКБ, а также служить стартером для запуска ПД.

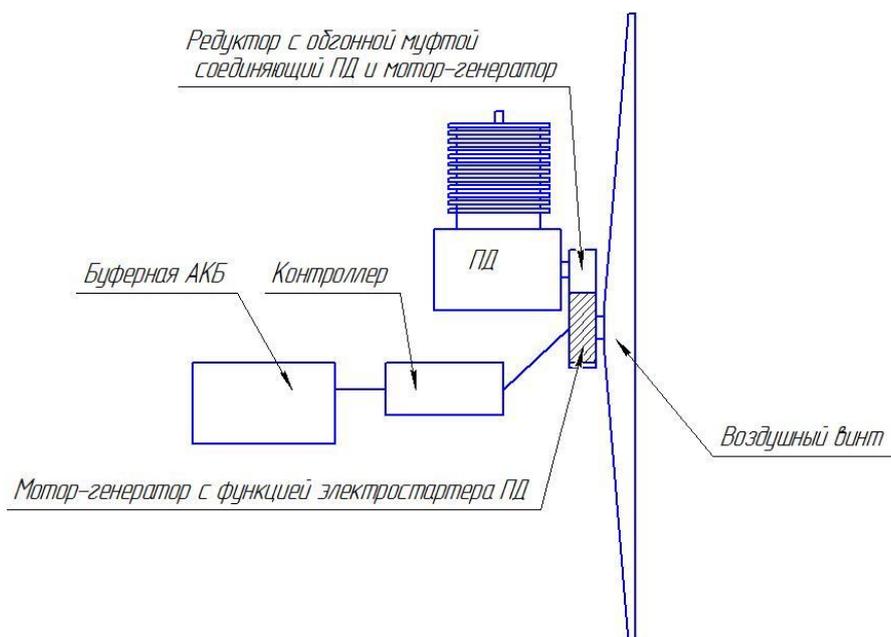


Рис. 2. Параллельная схема ГСУ.

ПОРШНЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ

Характеристики изолированного ПД приведены для *Rotax 503* [15], который является аналогом ПД РМЗ-500 (рис. 4). Характеристики по оборотам приведены с учетом редукции, принятой в разрабатываемой ГСУ, которая равна 1,98. В рассматриваемой конструкции ПД применяется ременный редуктор, понижающий обороты для увеличения КПД ВВ. Ременный редуктор позволяет сгладить колебания вала ПД при передаче вращения на ВВ (рис. 3).

Максимальный крутящий момент достигается при оборотах ПД, равных 3000 об/мин (5940 об/мин без редукции). Максимальная мощность достигается при 3232 об/мин (6400 об/мин без редукции).

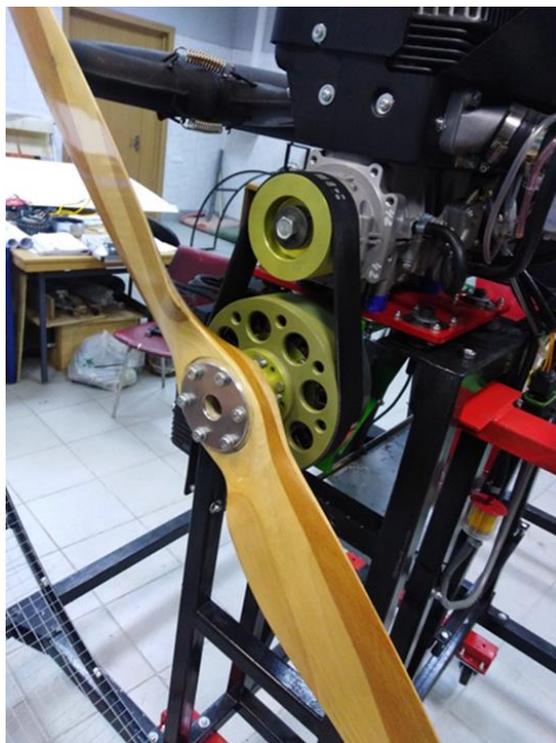


Рис. 3. Компоновка экспериментальной ГСУ с ПД (РМЗ-500), ЭД и ВВ.

При наложении характеристик ВВ (потребной мощности и крутящего момента для его вращения) на характеристики ПД можно найти точку предельных оборотов (из условия равенства крутящего момента или мощности) силовой установки ПД- ВВ (рис. 5).

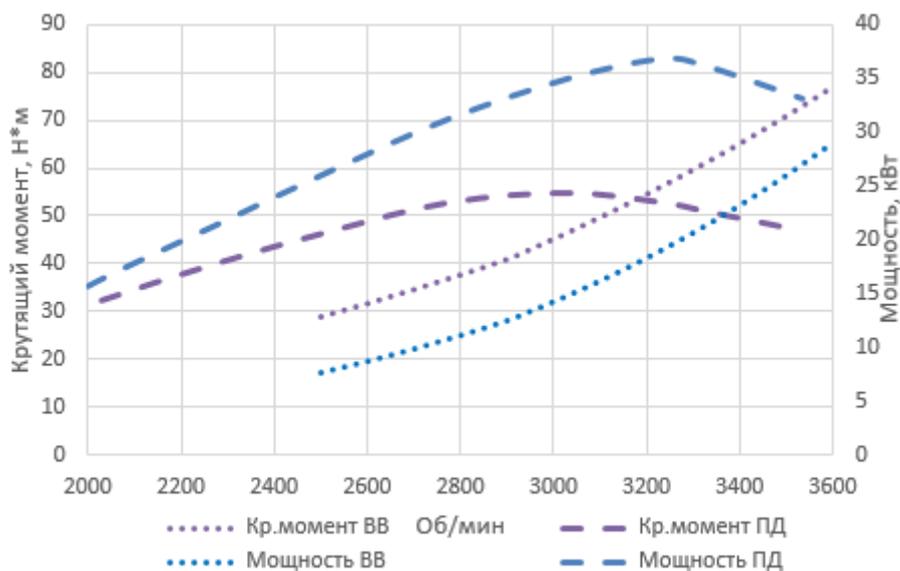


Рис. 4. Наложение характеристик ПД Rotax 503 (PM3-500) и ВВ.

Точки пересечения кривых крутящего момента ПД и потребного крутящего момента ВВ определяют предельные обороты СУ ПД-ВВ по условию крутящего момента и равны ~ 3200 об/мин.

Точки пересечения кривых мощности ПД и потребной мощности для ВВ определяют предельные обороты по условию мощности и равны ~ 3650 об/мин.

Таким образом, несмотря на высокую мощность ПД предельные обороты СУ ПД-ВВ будут равны 3200 об/мин, так как крутящего момента ПД не хватает для раскручивания ВВ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

На рис. 6 приведены характеристики ЭД, используемого в составе ГСУ [10]. Зависимость крутящего момента электродвигателя от оборотов обратная, чем у ПД. На малых оборотах момент больше, и с увеличением оборотов он снижается.

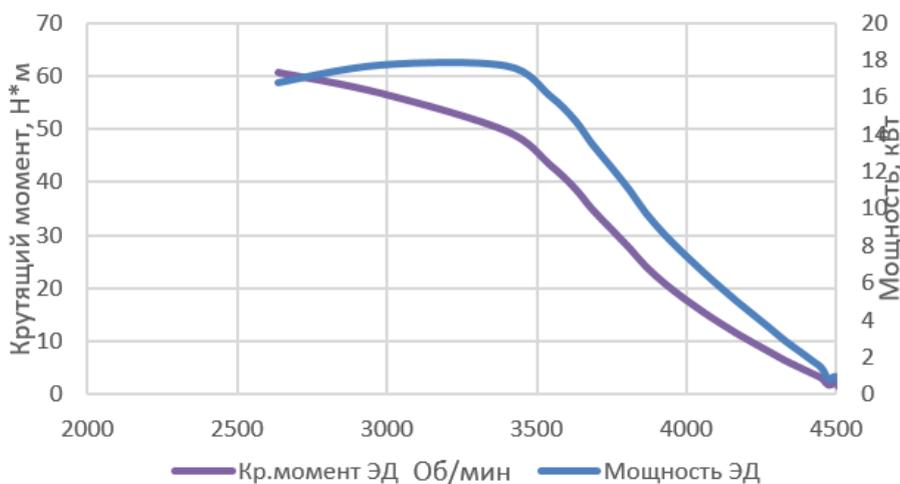


Рис. 5. Характеристики ЭД.

При наложении характеристик ВВ (потребной мощности и крутящего момента для его вращения) на характеристики ЭД можно найти точку предельных оборотов, развиваемых ЭД и ВВ совместно (рис. 7).

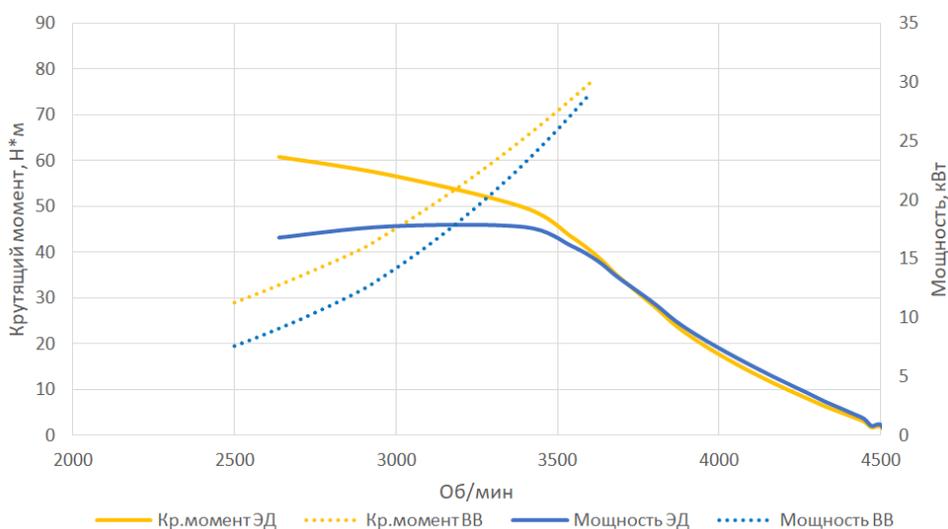


Рис. 6. Наложение характеристик ЭД и ВВ.

Точки пересечения кривых крутящего момента ЭД и потребного крутящего момента ВВ определяют предельные обороты СУ ВВ-ЭД по условию крутящего момента и равны ~3200 об/мин.

Точки пересечения кривых мощности ЭД и потребной мощности для ВВ определяют предельные обороты по условию мощности и равны ~3200 об/мин.

Таким образом, данные ЭД и ВВ сбалансированы по крутящему моменту и мощности.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭД И ПД В ГСУ

На рис. 8 приведены характеристики ПД и ЭД. В диапазоне рабочих оборотов 3100–3300 об/мин (обороты для ПД с учетом редукции 1,98) крутящий момент равен, а мощность ПД больше в 2,3 раза.

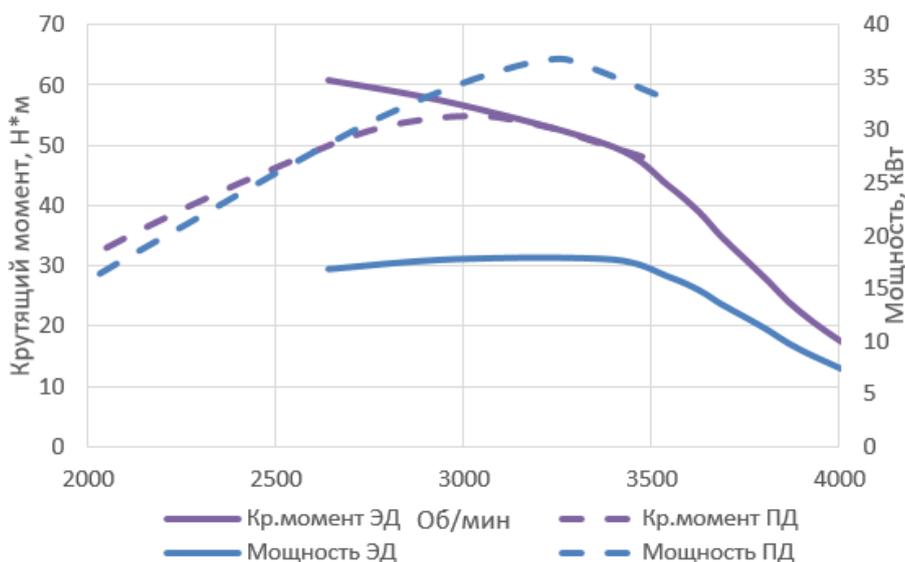


Рис. 7. Сравнение характеристик ЭД (экспериментальный) и ПД Rotax 503 (PM3-500).

Конструктивно ГСУ параллельной схемы выполнено таким образом, что крутящие моменты теоретически должны суммироваться, тогда заложив потери на редукторе и синхронизации около 10% получатся характеристики ГСУ, приведенные на рис. 9.

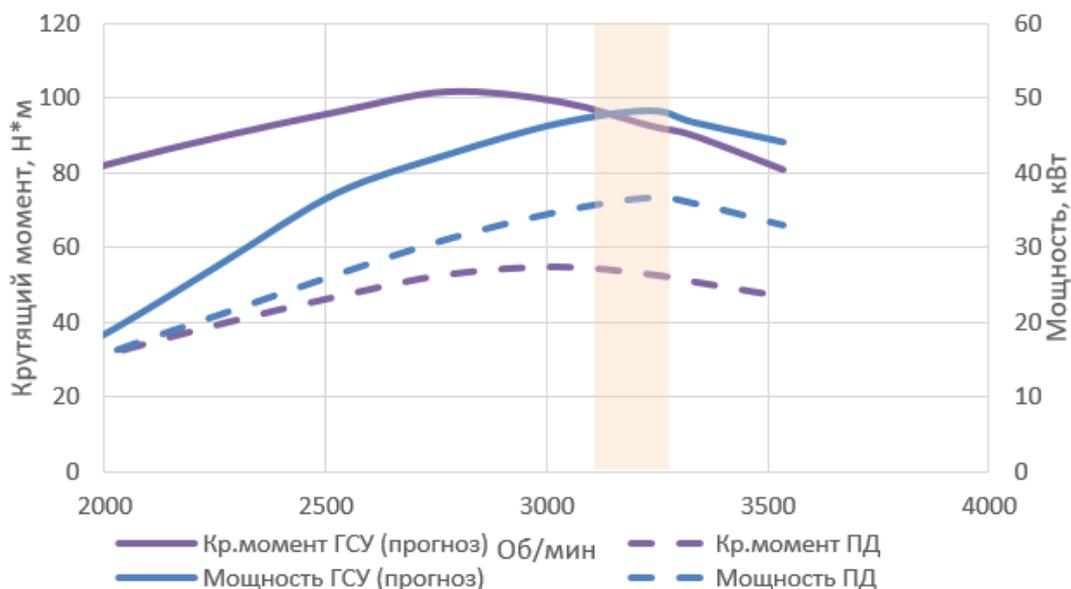


Рис. 8. Оценочные характеристики ГСУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретического исследования были получены графики с характеристиками синхронизации работы ПД, ДВС, ВВ в составе ГСУ. В анализе были учтены максимальные механические потери мощности при синхронизации и потери мощности при использовании редуктора. Был сделан вывод о работоспособности ГСУ описанной параллельной схемы. На основании теоретических исследований был создан экспериментальный стенд ГСУ [19, 20] (рис. 10).



Рис. 9. Экспериментальный стенд ГСУ.

Был создан экспериментальный стенд ЭСУ и получены характеристики ЭСУ (рис. 11).



Рис. 10. Экспериментальный стенд ЭСУ.

Запуск экспериментальной ГСУ показал, что видимых сбоев в совместной работе ПД и ЭД нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yu. Ravikovich, D. Holobtsev.** Design Analysis of the Optimal Hybrid Electric Propulsion Cryocooling System for New Aircraft and Disc Airship with High Temperature Superconductor Components, EASN 2020, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, January 2021. -8с.
2. **Yu. Ravikovich, L. Ponyaev, M. Kuprikov, R. Domjan.** 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. Т. 1024. 012078.
3. **W. Affoso Jr., R. Gandolfi, R.J.N. dos Reis, C.R.I. da Silva, N. Rodio, T. Kipouros, P. Laskaridis, A. Chekin, Yu. Ravikovich, N. Ivanov et al.** Thermal Management Challenges for HEA – FUTPRINT50 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1024. 012075.
4. **Yu. Ravikovich, N. Ivanov, D. Holobtsev.** FUTPRINT50 Consortium: Thermal Management System Concepts for Regional PAX Hybrid Electrical Aircraft Development. FUTPRINT50 Consortium: Thermal Management System Concepts for Regional PAX Hybrid Electrical Aircraft Development. -7с.
5. **Сычев 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. [Sychev A.V., Balyasnyi 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. Vol. 29. No. 4. P. 172–185 (in Russian).]
6. **Сычев А.В., Балясный К.В.** Небесный электролет // Моделист-конструктор. 2021. №7. [Sychev A.V., Balyasnyi K.V. Sky electric aircraft // 2021. No. 7 (in Russian).]
7. **Сычев А.В., Балясный К.В.** Вопросы применения электрического двигателя на сверхлегком самолете // Двигатель. 2020. № 4-6. С. 48-49. [Sychev A.V., Balyasnyi K.V. The issues of the application of an electric engine in an ultralight aircraft // Dvigatel'. 2020. No. 4–6. P. 48–49 (in Russian).]
8. **Рябов П. А., Каленский С. М.** Концепции перспективных гибридных маршевых двигателей летательных аппаратов на газовых и криогенных топливах // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22, № 1. С. 87-99. [Ryabov P.A., Kalenskii S.M. Concepts of perspective hybrid mid-flight engines on gas and cryogenic fuels for aircraft // Aerospace MAI Journal. 2015. Vol. 22. No. 1. P. 87–99 (in Russian).]
9. **А. В. Луковников, О. Д. Селиванов, Ю. А. Эзрохи, П. А. Рябов, С. М. Каленский,** Гибридные силовые установки перспективных летательных аппаратов различного назначения // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2010-2014 гг.) / под общ. ред. В. И. Бабкина, В. А. Скибина, М. Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2015 [Lukovnikov A.V., Selivanov O.D., Ezrohi Yu.A., Ryabov P.A., Kalenskiy S.M. Hybrid power plants of advanced aircrafts for different applications // Main results of the scientific and technical activity of the Central Institute of Aviation Motors (2010-2014) / Babkin V.I., Skibin V.A., Ivanov M.Ya. (eds.). Moscow: CIAM, 2015 (in Russian).]
10. **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 сверхлегкого пилотируемого самолета //

Авиационные двигатели. 2020. №3(8). С. 5-14 [Varyukhin A.V., 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 ultraflight manned airplane // Aviation Engines. 2020. No. 3(8). P. 5–14 (in Russian).]

11. **Варюхин А.Н., Захарченко В.С., Рахманкулов Д.Я., Сунцов П.С., Овдиенко М.А., Гелиев А.В., Киселев И.О., Власов А.В.** Традиционные, гибридные и электрические силовые установки самолетов местных воздушных линий // Авиационные двигатели. 2022. №1(14). С. 19-32 [Varyukhin A.N., Zakharchenko V.S., Rakhmankulov D.Ya., Suntsov P.S., Ovdienko M.A., Geliev A.V., Kiselev I.O., Vlasov A.V. Traditional, hybrid and electric propulsion systems of commuter aircrafts // Aviation Engines. 2022. No. 1(14). P. 19–32 (in Russian).]

12. **В России** продолжают испытания гибридной летающей лаборатории со сверхпроводящим электроавиодвигателем. СибНИА. 05.02.2021. URL: https://sibnia.ru/institut/news/detail.php?BLOCK_ID=4&ID=646 [Tests of a hybrid flying laboratory with a superconductive electric aircraft engine are under way in Russia. SibNIA. 05.02.2021. URL: https://sibnia.ru/institut/news/detail.php?BLOCK_ID=4&ID=646 (in Russian).]

13. **Проектирование** легких самолетов. Бадягин А.А., Мехамедов Ф.А. – Москва: Машиностроение, 1971. – 208 с. [Badyagin A.A., Mekhmedov F.A. Design of light airplanes. Moscow: Mashinostroenie, 1971. 208 p. (in Russian).]

14. **Ткаченко А. Ю., Кузьмичев В. С., Филинов Е. П., Авдеев С. В.** Влияние целевого назначения самолета на оптимальные параметры рабочего процесса и схемы силовой установки // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 112-122. DOI: 10.34759/vst-2020-2-112-122 [Tkachenko A.Yu., Kuz'michev V.S., Filinov E.P., Avdeev S.V. Aircraft target purpose impact on working process optimal parameters and power plant configuration // Aerospace MAI Journal. 2020. Vol. 27. No. 2. P. 112–122 (in Russian).]

15. **Сайт ООО «Авиagamма».** Габаритно-установочные чертежи двигателей и агрегатов ROTAX. Руководства по эксплуатации двигателей ROTAX. URL: <http://www.aviagamma.ru/drawings.html> [Web-site of Aviagamma Ltd. Outline and installation drawings of the ROTAX engines and plants. Operation manuals for ROTAX engines. URL: <http://www.aviagamma.ru/drawings.html> (in Russian).]

16. **Хронин Д.В.** Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов. – Москва: Машиностроение, 1970. – 413с. Ил. [Khronin D.V. Vibration theory and analysis in aircraft engines. Moscow: Mashinostroenie, 1970. 413 p. (in Russian).]

17. **Бортников М.Т., Владимиров В.Д.** Сборник справочных материалов «Авиационные двигатели». – Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1951. – 244 с. Ил. [Bortnikov M.T., Vladimirov V.D. Aircraft engines: a collection of reference materials. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature, 1951. 244 p. (in Russian).]

18. **Чайнов Н. Д., Мягков Л. Л., Краснокутский А. Н.** Конструирование и расчет поршневых двигателей. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 536 с. [Chaynov N.D., Myagkov L.L., Krasnokutskiy A.N. Design and calculation of piston engines. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2018. 536 p. (in Russian).]

19. **Лиханов В.А., Деветьяров Р.Р., Россохин А.В.** Стендовые испытания поршневых двигателей и топливной аппаратуры: Учебное пособие. – Киров: Вятская ГСХА, 2019. – 105 с. [Likhonov V.A., Devet'yarov R.R., Rossokhin A.V. Bench tests of piston engines and fuel equipment: a study guide. Kirov: Vyatka State Agricultural Academy. 2019. 105 p. (in Russian).]

20. **Калимуллин, Р.Ф.** Стендовые испытания автомобильных двигателей: методические указания к лабораторным работам / Р.Ф. Калимуллин, С.Ю. Коваленко; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2012. –103 с. [Kalimullin R.F., Kovalenko S.Yu. Bench tests of automotive engines: guidelines for laboratory works. Orenburg: Orenburg State University, 2012. 103 p. (in Russian).]

ОБ АВТОРАХ

СЫЧЁВ Алексей Вячеславович, ведущий инженер, передовая инженерная школа МАИ, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

РАВИКОВИЧ Юрий Александрович, д.т.н., профессор МАИ, проректор по научной работе МАИ, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

БАЛАСНЫЙ Кирилл Вячеславович, инженер, передовая инженерная школа МАИ, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

METADATA

Title: Synchronization of the operation of a piston and electric engine in an aircraft hybrid power plant of a parallel circuit.

Authors: A.V. Sychev¹, Y.A. Ravikovich², K.V. Balyasny³

Affiliation:

Moscow Aviation University, Russia.

Email: ¹saavia@mail.ru, ²yrav@mail.ru, ³balyasnyi.k.v@gmail.com

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 3 (101), pp. 99-107, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The article discusses the synchronization of the operation of a piston and electric engine in an aviation hybrid power plant in a parallel circuit. Diagrams of a parallel and series hybrid power plant based on a piston engine and an electric motor are presented. The features of the parallel circuit hybrid power plant are noted. The power and torque graphs of a piston engine, an

electric motor and a hybrid propulsion system with a propeller are analyzed. Conclusions are drawn about the possibility of synchronizing different types of engines as part of a hybrid power plant, taking into account power losses.

Key words: aircraft hybrid power plant, piston engine, electric motor, propeller, synchronization of different types of engines

About authors:

SYCHEV, Aleksey Vyacheslavovich, Leading Engineer, MAI Advanced Engineering School, Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia.

RAVIKOVICH, Yury Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of MAI, Vice-Rector for Scientific Work of MAI, Moscow Aviation Institute (national research university), Russia.

BALYASNY, Kirill Vyacheslavovich, engineer, MAI advanced engineering school, Moscow Aviation Institute (national research university), Russia.