

## РОЛЬ ПАКЕТА MATLAB/SIMULINK В ДИПЛОМНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

**Валерий Иосифович Курир**

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), ст. преп., к.т.н., РФ, Казань  
kurir\_valerian@mail.ru

*Аннотация. Приведен обзор работ, посвященных задачам проектирования и численного моделирования системы электроснабжения летательных аппаратов – СЭС ЛА в пакете Matlab/Simulink, проведенных российскими и зарубежными исследователями.*

*Ключевые слова: системы электроснабжения летательных аппаратов, моделирование работы систем электроснабжения летательных аппаратов в пакете Matlab/Simulink.*

В работе представлен обзор работ, посвященных численному моделированию СЭС ЛА, представляющий интерес для специалистов, занимающихся данной тематикой. В качестве отправных пособий по проведению численных расчетов систем силовой электроники, а также электропривода электромеханических систем в пакете Matlab/Simulink примем монографии [1 – 3].

В настоящее время в авиации находит применение система переменного трехфазного тока 115/200 В постоянной частоты 400 Гц с полупроводниковым преобразователем (ПП или ПЧ). Перспективной является система постоянного тока высокого напряжения  $\pm 270$  В [4].

Авторами работы [4] в качестве перспективной рассматривается система генерирования постоянного тока низкого напряжения, где функции ПП (полупроводникового преобразователя) выполняет выпрямитель напряжения, выполненный по модульному принципу на транзисторах MOSFET (рис. 1).

Перспективной системой переменного тока для СЭС ЛА авторами [4] принята система генерирования тока стабильной частоты 400 Гц и напряжением 115 В (рис. 2).

Самолет с повышенной электрофикацией оборудования (СПЭО) – это ЛА, в котором тяга создается традиционными двигателями, а большая масса оборудования получает энергию от централизованной СЭС ЛА. Схема СЭС ЛА, в которой реализована данная концепция, представлена авторами [5] на (рис. 3). ЛА, тяга в котором создается с помощью электрической силовой установки, назван полностью электрическим самолетом (ПЭС) [6]. Гибридным ЛА назван самолет со смешанной тягой [7].

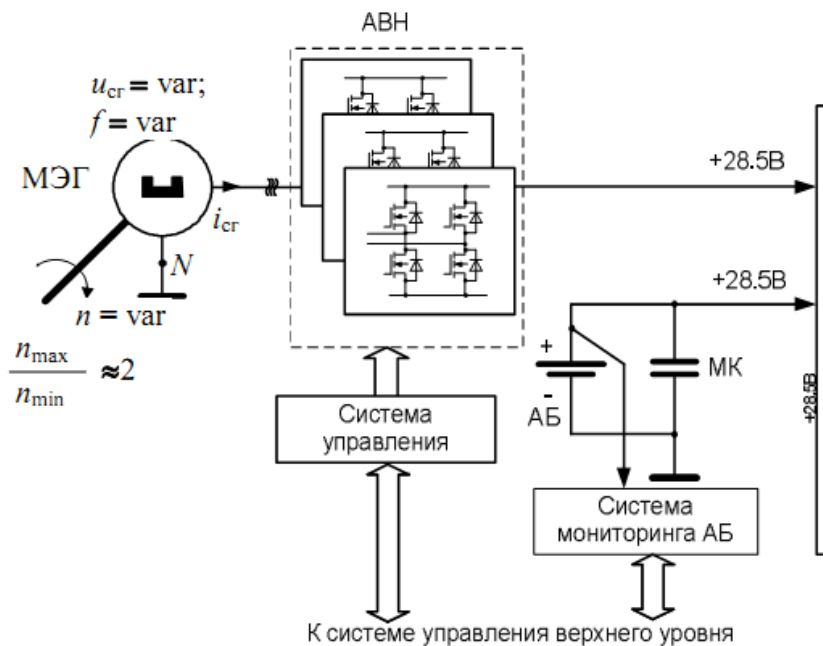


Рисунок 1 – Система генерирования постоянного тока с АВН

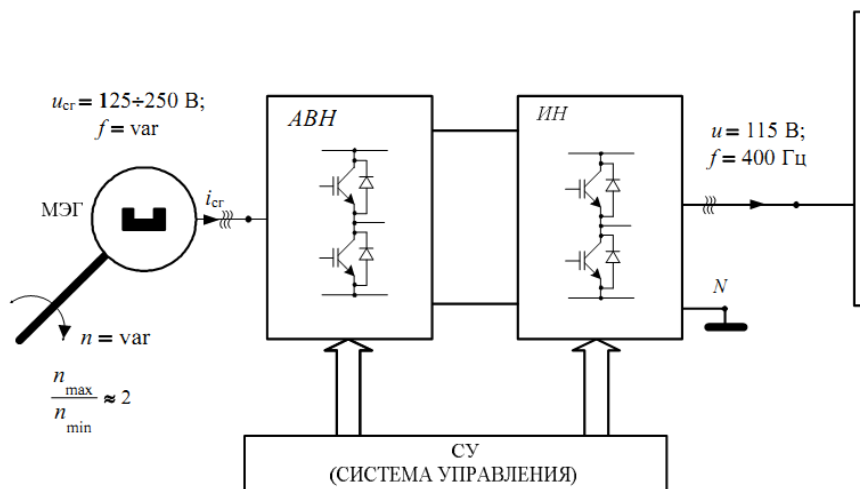


Рисунок 2 – Система генерирования переменного тока стабильной частоты 400 Гц напряжения 115 В

Обратимся к работам, проведенными российскими и зарубежными исследователями в направлении к самолету с повышенной электрификацией, использовавших в своей работе пакет имитационного моделирования Matlab.

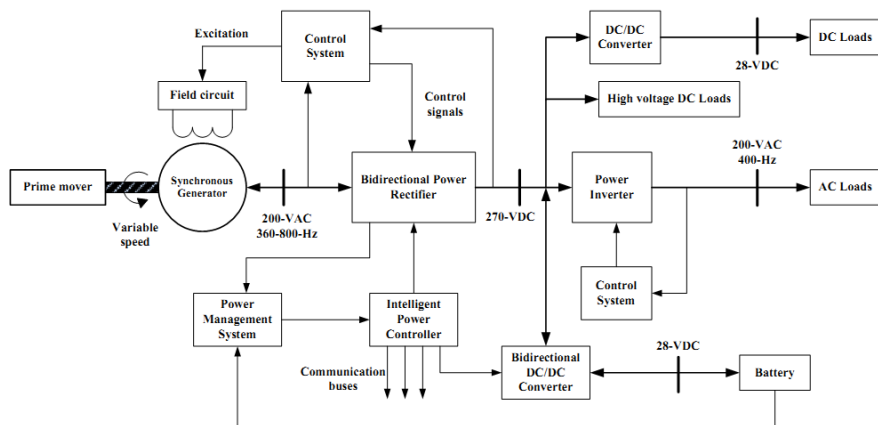


Рисунок 3 – Система распределения электроэнергии ЛА с повышенной электрификацией

В работе [8] проведена закономерная замена электроприводом ЭППЗ–334 аналогового гидропривода системы перемещения механизации крыла – СПМК–9 самолета. Автором [9] разработан магнитоэлектрический синхронный генератор МЭГ мощностью не менее 200 кВ·А и более переменного тока, выполняющий функцию стартер-генератора СГ. В работе [10] разработан электрогенератор постоянного тока повышенного напряжения мощностью до нескольких сотен киловатт с непосредственным приводом от авиадвигателя, работающего в системе с электронным преобразователем. Автором [11] разработана и численно смоделирована резервная система генерирования электрической энергии на базе магнитоэлектрического генератора и инвертора напряжения, построенных с использованием модульного принципа.

Основы имитационного моделирования СЭС ЛА в пакете Matlab представлены в монографии [12]. В работе [13] представлена модель синхронной машины – СМ с демпферной обмоткой, далее рассчитанная в пакете Matlab. Исследована модель синхронного включения генераторов в единую сеть. Авторами [14] разработана уточненная модель синхронного генератора – СГ, представленная в виде трех машин: подвозбудителя, возбудителя и самого генератора. Приведены результаты моделирования в пакете Matlab. В работе [15] модель СГ представлена системой матричных уравнений. Приведены структурные схемы регулятора напряжения и привода постоянной частоты вращения. Модель СЭС ЛА реализована в пакете Matlab/Simulink.

Авторами [16] приведены результаты имитационного моделирования энергоузла СЭС ЛА ПЭС в пакете Matlab/Simulink. Авторами [17] проведено моделирование СЭС самолета Ил – 76 в пакете Simulink. Приведены модели СЭС переменного и постоянного токов, их элементов, результаты моделирования. В работе [18] проведено имитационное моделирование в пакете Matlab/Simulink СЭС постоянного тока самолета Су–30СМ в нормальных и аварийных режимах работы. Авторами [19] разработана имитационная модель СЭС самолета Су–27 в пакете Matlab/Simulink. Она позволяет исследовать СЭС ЛА как в нормальном, так и аварийном режимах работы. Автором [20] проведено имитационное моделирование работы систем переменного и постоянного токов СЭС ЛА Ил–76 в пакете Matlab/Simulink. В работе [21] рассмотрена модель системы электроснабжения перспективного дальнемагистрального самолета в программном комплексе SimInTech. Приведены результаты моделирования четырехканальной системы генерирования и распределения электроэнергии переменного тока при нормальном режиме работы.

В статье [22] проведено моделирование работы двигательного режима стартер-генераторной установки для авиационного газотурбинного двигателя в пакете Matlab/Simulink. В качестве электрической машины используется синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Автором [23] представлена система регулирования частоты выходного напряжения синхронного генератора, разработанного на основе нечеткой логики с помощью генетического алгоритма, позволяющего оптимизировать характеристики регулятора частоты.

В работе [24] представлена методика проектирования СЭС воздушного судна. Перечислены задачи, необходимые для реализации автоматизации процесса проектирования СЭС ЛА. Авторами [25] представлено моделирование СЭС ЛА воздушных судов Bombardier Global Express в пакете Simulink (автономная модель реализации) и решателе OPAL-RT (для моделирования в реальном времени). Авторами [26] представлена кроссплатформенная методология проектирования СЭС ЛА. Пакеты, используемые для моделирования рабочих режимов СЭС ЛА – Matlab/Simulink и Modelica.

### Список литературы

1. Герман–Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебн. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
2. Герман–Галкин С.Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА–Век, 2008. – 368 с.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SymPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 288 с.
4. Гаргансеев А.С., Харитонов С.А. Перспективные системы электроснабжения с полностью электрофицированным оборудованием // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2 (20). – С. 185 – 192.
5. Бочаров В.В., Постников В.А., Резников С.Б., Харченко А.И. Энергоэкономичная комбинированная система с высоким качеством электроэнергии

для концепции «полностью электрофицированного самолета» // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 58. – 19 с.

6. Халютин С.П. Электрический самолет: прошлое, настоящее, будущее // Авиапанорама. – 2016. – № 6. – С. 42–51.

7. Халютин С.П., Давидов О.А., Жмуров Б.В. Электрические и гибридные самолеты: перспективы создания // Электричество. – 2017. – № 9. – С. 4–16.

8. Волокитина Е.В. Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / Чуваш. гос. ун-т. - Чебоксары, 2006. – 197 с.

9. Власов А.И. Магнитоэлектрический стартер–генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения: дисс. канд. техн. наук: 05.09.01 / Чуваш. гос. ун-т. – Чебоксары, 2010. – 260 с.

10. Кузьмичев Р.В. Генератор в системе электроснабжения перспективного самолета с повышенным уровнем электрофикации: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / МАИ – Москва, 2012. – 193 с.

11. Машинский В.В. Резервная система генерирования электрической энергии для летательных аппаратов: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2014. – 134 с.

12. Халютин С.П., Тюляев М.Л., Жмуров Б.В., Старостин И.Е. Моделирование сложных электроэнергетических систем летательных аппаратов / М.: ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, 2010. – 188 с.

13. Демченко А.Г., Артёменко Ю.П. Моделирование параллельной работы бортовой системы электроснабжения переменного тока в пакете Matlab // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 185. – С. 55–60.

14. Артеменко Ю.П., Шарапов С.С. Применение Matlab в моделировании бортовой системы электроснабжения переменного тока // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 185. – С. 77–84.

15. Артеменко Ю.П., Демченко С.С. Совершенствование модели бортовой системы электроснабжения переменного тока // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 213. – С. 34–42.

16. Жмуров Б.В., Матюшина А.В., Соколов П.А. Моделирование режимов работы центров силового питания электроприводов полностью электрофицированного самолета МГТУ ГА. – 2012. – № 185. – С. 99–103.

17. Бочаров А.С., Губанов К.А., Евдокимов Я.А. Имитационная модель электроэнергетического комплекса самолета Ил–76 в среде моделирования Simulink / Актуальные проблемы и перспективные направления развития комплексов авиационного оборудования: сб. науч. ст. по матер. IV Всероссийской науч. – практич. конф. «Академические Жуковские чтения» (23–24 ноября 2016 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 32–39.

18. Аббясов И.В., Бочаров А.С., Шаров И.В. Имитационная модель системы электроснабжения постоянного тока самолета с возможностью исследования в нормальных и аварийных режимах функционирования в среде моделирования Simulink / Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. науч. ст. по материалам докл. V Международной НПК «АВИАТОР» (15–16 февраля 2018 г.): – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – С. 3–7.

19. Бочаров А.С., Губанов К.А., Шпилов А.А. Автоматизированное рабочее место для изучения и исследования системы электроснабжения истребителя Су-27 / Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки:

сб. науч. ст. по материалам докл. V Международной НПК «АВИАТОР» (15-16 февраля 2018 г.): – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – С. 13 – 18.

20. Альчин Ю.Ю. Разработка имитационной модели системы электропитания тяжелого самолёта: дисс. магистра технич. наук: 13.04.02 / НТПУ, Томск, 2018. – 103 с.

21. Смагин Д.И., Старостин К.И., Савельев Р.С., Сатин А.А., Притулкин Т.Д., Маковская Т.Д. Методика создания динамической математической модели системы электроснабжения (СЭС) переменного тока перспективного дальнемагистрального пассажирского самолета в программном комплексе SimInTech // Comp. nanotechnol. – 2019. – Вып. 2. – С. 57 – 62.

22. Королев Е.В., Лисковская Е.В., Павлов Д.А. Расчет и моделирование стартер-генератора авиационного газотурбинного двигателя // Междунар. конференция по мягким вычислениям. – 2020. – Т. 1. – С. 296 – 298.

23. Каримов В.Г. Комбинированные системы регулирования частоты выходного напряжения с элементами искусственного интеллекта для бесконтактных синхронных генераторов: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03 / Уфимский гос. авиац. техн. университет. – Уфа, 2012. – 146 с.

24. Жмуров Б.В. Процесс проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объект оптимизации // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. – № 01. – С. 88–103.

25. Montealegre Lobo L., Dufour Ch., Mahseredjian J. Real-time Simulation of More-Electric Aircraft Power Systems // Paper presented at the EPE'13 ECCE Europe conference, September 3 – 5, 2013, Lille, France. – 11 P.

26. Nuzzo P., Finn J., Mozumdar M., Sangiovanni-Vincentelli. A. Platform-Based Design Methodology and Modeling for Aircraft Electric Power Systems// Paper presented at the Green Energy and System Conference, 25 Nov. 2013 Long-Beach, Ca., USA – 7 p.

UDC 629.7.064.5

## THE ROLE OF THE MATLAB/SIMULINK PACKAGE IN DIPLOMA DESIGN

**Valery I. Kurir**

KNITU-KAI, senior lecturer, cand. of tech. sciences  
RF, Kazan, kurir\_valerian@mail.ru

*Abstract. An overview of works devoted to the problems of design and numerical modeling of the power supply system of aircraft – aircraft PSS in the Matlab / Simulink package, carried out by Russian and foreign researchers, is given.*

*Keywords: aircraft power supply systems, modeling the operation of aircraft power supply systems in the Matlab / Simulink package.*

The paper presents an overview of the works devoted to the numerical modeling of the aircraft PSS, which is of interest to specialists dealing with this topic. Monographs [1 – 3] will be used as starting guides for carrying out numerical calculations of power electronics systems, as well as the electric drive of electromechanical systems in the Matlab / Simulink package.

Currently, in aviation, a three-phase AC 115/200 V system with a constant frequency of 400 Hz with a semiconductor converter (PP or FC) is used. A promising high voltage constant current system is  $\pm 270$  V [4].

The authors of [4] consider a system for generating low voltage direct current as promising, where the functions of a PCB (semiconductor converter) are performed by a voltage rectifier made on a modular basis on MOSFET transistors (Fig. 1).

The authors of [4] adopted a system for generating a current of a stable frequency of 400 Hz and a voltage of 115 V as a promising alternating current system for PSS aircraft (Fig. 2).

An aircraft with enhanced equipment electrification (EEC) is an aircraft in which thrust is created by traditional engines, and a large mass of equipment receives energy from a centralized PSS of the aircraft. The scheme of the PSS of the aircraft, in which this concept is implemented, is presented by the authors of [5] in (Fig. 3). The aircraft, the thrust in which is created using an electric power plant, is called a fully electric aircraft (FEA) [6]. An aircraft with a mixed thrust is called a hybrid aircraft [7].

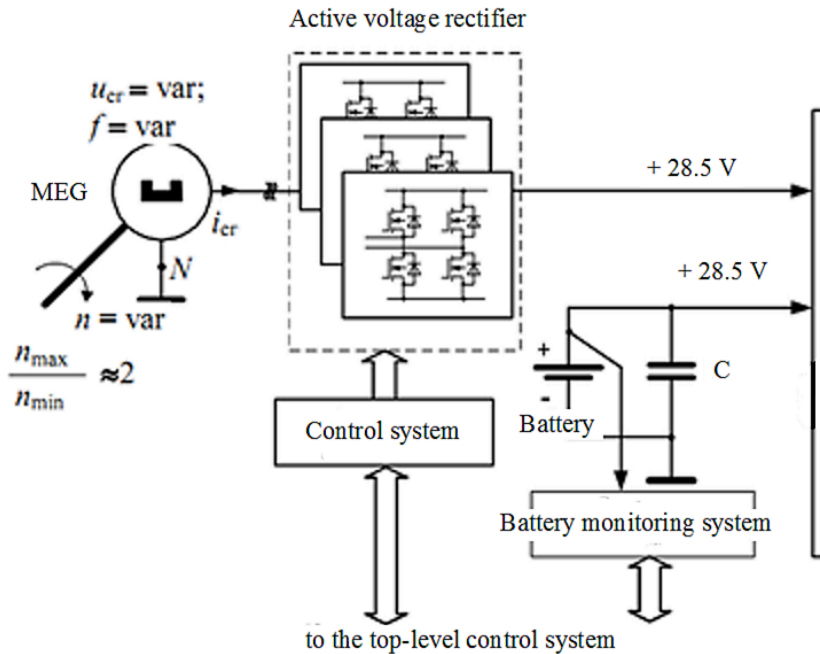


Figure 1 – DC generation system with AVR

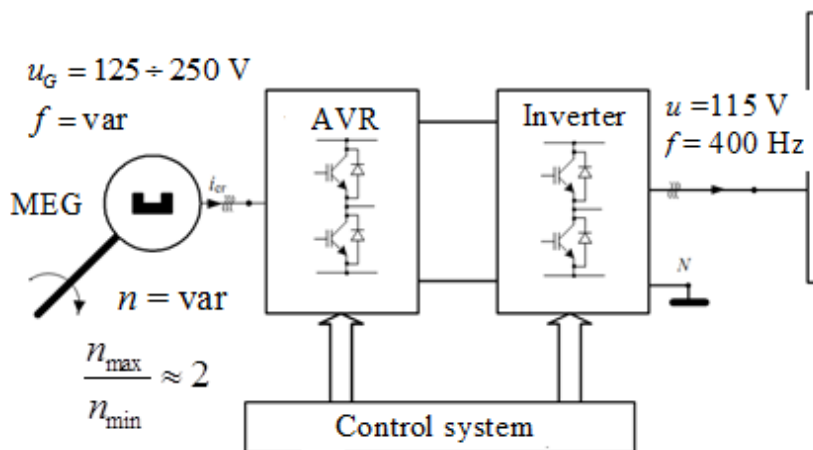


Figure 2 – The system for generating alternating current of a stable frequency of 400 Hz and a voltage of 115 V

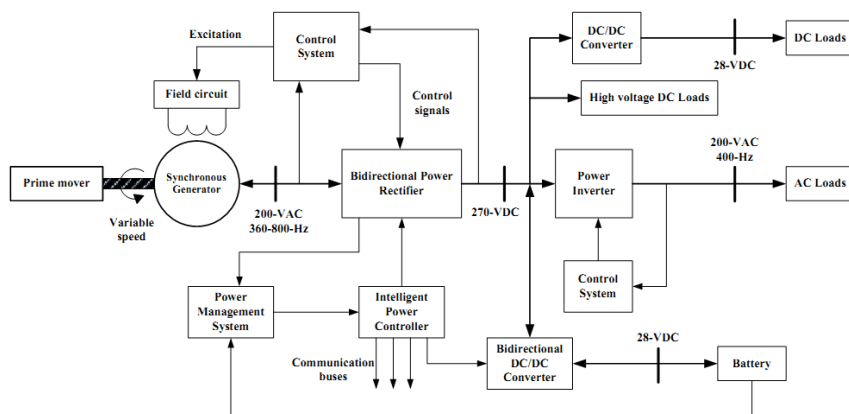


Figure 3 – Electricity distribution system of aircraft with increased electrification

Let us turn to the work carried out by Russian and foreign researchers towards an aircraft with increased electrification, who used the Matlab simulation package in their work.

In work [8], a regular replacement of an electric drive EPPZ–334 of a similar hydraulic drive of the wing mechanization movement system – SPMK–9 of an aircraft was carried out. The author of [9] has developed a magneto-electric synchronous MEG generator with a capacity of at least 200 kVA and more alternating current, which serves as an SG starter-generator. In [10], a high-voltage



direct current electric generator with a capacity of up to several hundred kilowatts was developed with a direct drive from an aircraft engine operating in a system with an electronic converter. The author [11] has developed and numerically modeled a backup system for generating electrical energy based on a magnetoelectric generator and a voltage inverter, built using a modular principle.

The basics of simulation modeling of PSS aircraft in the Matlab package are presented in the monograph [12]. The work [13] presents a model of a synchronous machine – SM with a damper winding, further calculated in the Matlab package. A model of synchronous connection of generators to a single network has been investigated. The authors of [14] developed a refined model of a synchronous generator – SG, presented in the form of three machines: the exciter, the exciter and the generator itself. The results of modeling in the Matlab package are presented. In [15], the SG model is presented by a system of matrix equations. The block diagrams of the voltage regulator and constant speed drive are given. The PSS aircraft model is implemented in the Matlab / Simulink package.

The authors of [16] presented the results of simulation modeling of the power unit of the PSS of fully electric aircraft in the Matlab / Simulink package. The authors of [17] simulated the PSS of the Il – 76 aircraft in the Simulink package. Models of PSS of alternating and direct currents, their elements, simulation results are presented. In [18], simulation modeling was carried out in the Matlab / Simulink package for DC PSS of the Su-30SM aircraft in normal and emergency operating modes. The authors of [19] developed a simulation model of the PSS of the Su-27 aircraft in the Matlab / Simulink package. It allows you to explore the PSS of the aircraft both in normal and emergency operating modes. The author of [20] carried out a simulation of the operation of AC and DC systems of the PSS of IL-76 aircraft in the Matlab / Simulink package. In [21], a model of a power supply system for a promising long-range aircraft in the SimInTech software package is considered. The results of modeling a four-channel system for generating and distributing AC power during normal operation are presented.

In the article [22], the simulation of the propulsion mode of a starter-generator set for an aircraft gas turbine engine in the Matlab / Simulink package was carried out. A permanent magnet synchronous motor is used as an electrical machine.

The author of [23] presents a system for regulating the frequency of the output voltage of a synchronous generator, developed on the basis of fuzzy logic using a genetic algorithm that allows optimizing the characteristics of the frequency regulator.

The work [24] presents a methodology for designing of an aircraft PSS. The tasks required for the implementation of automation of the design process of the aircraft PSS are listed. The authors of [25] presented the modeling of the PSS for aircraft of Bombardier Global Express aircraft in the Simulink package (an autonomous implementation model) and the OPAL-RT solver (for real-time modeling). The authors of [26] presented a cross-platform methodology for designing an aircraft solar power plant. The packages used to simulate the operating modes of the PSS aircraft – Matlab / Simulink and Modelica.

## References

1. Herman-Galkin S. G. Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0: Textbook. – SPb: KORONA print, 2001. – 320 p (in Russian).
2. German – Galkin S.G. *MATLAB & Simulink*. MATLAB & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC. – SPb.: KORONA–Vek, – 2008. – 368 p (in Russian).
3. Chernykh I.V. Simulation of electrical devices in MATLAB SymPowerSystems and Simulink. – Moscow: DMK Press, 2012. – 288 p (in Russian).
4. Garganeyev A.S., Kharitonov S.A. Promising power supply systems with fully electrified equipment // Reports of TUSUR. - 2009. – No. 2 (20). – p. 185 – 192 (in Russian).
5. Bocharov V.V., Postnikov V.A., Reznikov S.B., Kharchenko A.I. Energyeconomical combined system with high power quality for the concept of "fully electrified aircraft" // Electronic the journal «Proceedings of the MAI». – 2012. – No 58. – 19 p (in Russian).
6. Khalyutin S.P. Electric plane: past, present, future // Aviapanorama. – 2016. – No 6. – pp. 42 – 51 (in Russian).
7. Khalyutin S.P., Davidov O.A., Zhmurov B.V. Electric and Hybrid Aircraft: Prospects for Creation // Electricity. – 2017. – No 9. – pp. 4 –16 (in Russian).
8. Volokitina Ye.V. Research and development of a high-speed valve electric drive for controls of new aircraft. Diss. Cand. tech. Sciences / Chuvash. state un-t. – Cheboksary, 2006. – 197 p (in Russian).
9. Vlasov A.I. Magnetolectric starter – generator in the power supply system of new generation aircraft. Diss. Cand. tech. Sciences / Chuvash. state un-t. – Cheboksary, 2010. – 260 p (in Russian).
10. Kuz'michev R.V. Generator in the power supply system of a promising aircraft with an increased level of electrification. Diss. Cand. tech. Sciences / Moscow Aviation Institute – Moscow, 2012.– 193 p (in Russian).
11. Mashinskiy V.V. Backup system for generating electrical energy for aircraft. Diss. Cand. tech. Sciences / Novosib. state tech. university. – Novosibirsk, 2014. – 134 p (in Russian).
12. Khalyutin S.P., Tyulyayev M.L., Zhmurov B.V., Starostin I.Ye. Simulation of complex electric power systems of aircraft / Military Air Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin. Moscow – 2010. – 188 p (in Russian).
13. Demchenko A.G., Artomenko YU.P. Simulation of parallel operation of the on-board AC power supply system in the Matlab package // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No 185. – pp. 55 –60 (in Russian).
14. Artemenko YU.P., Sharapov S.S. Application of Matlab in modeling an on-board AC power supply system // Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No 185. – pp. 77 – 84 (in Russian).
15. Artemenko YU.P., Demchenko S.S. Improving the model of the on-board AC power supply system // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2015 – No 213. – pp. 34 – 42 (in Russian).
16. Zhmurov B.V., Matyushina A.V., Sokolov P.A. Modeling the operating modes of power supply centers for electric drives of a fully electrified aircraft // Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No 185. – pp. 99 – 103 (in Russian).
17. Bocharov A.S., Gubanov K.A., Yevdokimov YA.A. Simulation model of the electric power complex of the Il–76 aircraft in the Simulink simulation environment / Coll. scientific. Art. based on the materials of the IV All-Russian Scientific – practical conf. "Academic Zhukovsky Readings" (November 23-24, 2016), Voronezh: VUNC VVS "VVA", 2017. – pp. 32 – 39 (in Russian).

18. Abbyasov I.V., Bocharov A.S., Sharov I.V. A simulation model of an aircraft DC power supply system with the ability to study in normal and emergency modes of operation in the Simulink simulation environment / Actual problems and perspective directions of development of aviation equipment complexes / Coll. scientific. Art. based on the materials of the V All-Russian Scientific – practical conf. "Academic Zhukovsky Readings" (February 15–16, 2018): – Voronezh: VUNC VVS "VVA", 2018. – pp. 3 – 7 (in Russian).

19. Bocharov A.S., Gubanov K.A., Shipilov A.A. Automated workstation for studying and researching the power supply system of the Su–27 fighter / Actual problems and perspective directions of development of aviation equipment complexes / Coll. scientific. Art. based on the materials of the V All-Russian Scientific – practical conf. "Academic Zhukovsky Readings" (February 15–16, 2018): – Voronezh: VUNC VVS "VVA", 2017. – P. 13 – 18 (in Russian).

20. Al'chin YU.YU. Development of a simulation model of a power supply system for a heavy aircraft. Master Thesis, NTPU, Tomsk, 2018. – 103 p (in Russian).

21. Smagin D.I., Starostin K.I., Savel'yev R.S., Satin A.A., Pritulkin T.D., Methods of creating a dynamic mathematical model of an AC power supply system (PSS) of a promising long-haul passenger aircraft in the SimInTech software package // Comp. nanotechnol. – 2019. – No. 2. – pp. 57 – 62 (in Russian).

22. Korolev Ye.V., Liskovskaya Ye.V., Pavlov D.A. Calculation and modeling of a starter generator aircraft gas turbine engine // International Conference on Soft Computing, – 2020. – V.1. – pp. 296 –298 (in Russian).

23. Karimov V.G. Combined systems for regulating the frequency of the output voltage with elements of artificial intelligence for contactless synchronous generators. diss. Cand. tech. Science / Ufa State Aviation Technical University. – Ufa, 2012.– 146 p (in Russian).

24. *Zhmurov B.V.* The process of designing power supply systems for aircraft as an object of optimization // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2018. – No. 01. – pp. 88 – 103 (in Russian).

25. Montealegre Lobo L., Dufour Ch., Mahseredjian J. Real-time Simulation of More-Electric Aircraft Power Systems // Paper presented at the EPE'13 ECCE Europe conference, September 3 – 5, 2013, Lille, France. – 11 p.

26. Nuzzo P., Finn J., Mozumdar M., Sangiovanni-Vincentelli A. Platform-Based Design Methodology and Modeling for Aircraft Electric Power Systems // Paper presented at the Green Energy and System Conference, 25 Nov. 2013 Long–Beach, Ca., USA. – 7 p.

*Материал принят к публикации 06.10.21.*