

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.7.048.7

Разработка функциональных подсистем регулирования электрической системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета

Л.А. Гришина, А.Ю. Паневин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Design and development of the electrical air conditioning control system functional subsystems in a passenger aircraft

L.A. Grishina, A.Yu. Panevin

Moscow Aviation Institute (National Research University)

Рассмотрен вопрос проектирования функциональных подсистем регулирования параметров воздуха авиационных электрических систем кондиционирования с помощью математической модели, что позволит определять оптимальные условия реализации электрической системы в целом. В схеме математической модели осуществлена взаимосвязь подсистем регулирования температуры, расхода воздуха, а также электроприводного автономного компрессора, являющегося источником наддува гермокабины пассажирского самолета в авиационных электрических системах кондиционирования воздуха. Определены дифференциальное уравнение второго порядка и передаточная функция гермокабины самолета как регулируемого объекта по температуре воздуха.

EDN: IUBUTN, <https://elibrary/iubutn>

Ключевые слова: гермокабина самолета, система кондиционирования воздуха, электроприводной автономный компрессор, подсистема терморегулирования воздуха, подсистема регулирования подачи воздуха

The paper considers the problem of designing functional subsystems for regulating air parameters of the aircraft electric air conditioning systems using a mathematical model, which would make it possible to establish optimal conditions for implementing the electrical system as a whole. The mathematical model scheme introduces interconnection of the air temperature and air supply control subsystems, as well as of the electric-driven autonomous compressor being a source of pressurizing the passenger aircraft pressurized cabin in the aviation electric air conditioning systems. Differential equation of the second order and the transfer function of the aircraft pressurized cabin as a regulated object by the air temperature are determined.

EDN: IUBUTN, <https://elibrary/iubutn>

Keywords: aircraft pressurized cabin, air conditioning system, electric-driven autonomous compressor, air temperature control subsystem, air supply control subsystem

Основным источником сжатого воздуха для авиационных систем кондиционирования воздуха (СКВ) является компрессор двигательной установки (рис. 1) [1]. Основной недостаток, присущий СКВ с отбором воздуха от маршевой силовой установки (МСУ), заключается в том, что параметры отбора жестко связаны с режимом работы двигателя и согласованы с потребностями СКВ только при экстремальных режимах эксплуатации [2].

Поэтому для создания потребных параметров воздуха в подсистеме отбора устанавливают узлы регулирования давления и агрегаты предварительного охлаждения рабочего воздуха [3, 4]. Вследствие высокой температуры отбираемого воздуха используют высокотемпературные стальные трубопроводы, существенно увеличивающие установочную массу СКВ. Отбор рабочего воздуха от компрессора двигателя основан на дроссельном принципе регулирования параметров, который предполагает большие потери энергии сжатого воздуха. В связи с этим перспективным направлением развития авиационных СКВ является применение электрических систем.

Использование в качестве источника сжатого воздуха электроприводного автономного компрессора (АК) (рис. 2) позволяет создавать минимально допустимое давление воздуха для функционирования СКВ, предполагая меньшую работу, затрачиваемую на его сжатие.

В работах [5–7] оценено влияние электрической СКВ на установочную массу системы на борту пассажирского самолета. Выполнено сравнение возможных вариантов систем охлаждения воздуха: с воздушным и компрессионно-испарительным циклами [8].

Разработан и испытан воздушный АК для авиационной электрической СКВ с построением его напорной характеристики [9], возможный электропривод которого рассмотрен в статье [10].

В работах [11–17] оценено как энергопотребление электрической СКВ, так и ее влияние на топливную эффективность самолета.

Преимущество по энергетическим затратам на сжатие воздуха в электрической СКВ определяется разностью давления воздуха за соответствующей ступенью компрессора двигательной установки и давления воздуха за АК, которое достигает 0,2 МПа.

Обзор работ показал, что отечественные и зарубежные ученые рассматривают общие принципы проектирования авиационных электрических СКВ, не уделяя должного внимания регулированию перспективной системы.

Одним из решений проблемы создания энергоэффективной электрической СКВ является нахождение ее оптимальной конструктивной реализации, в частности, исследованием совместной работы системы регулирования параметров воздуха и источника наддува, что

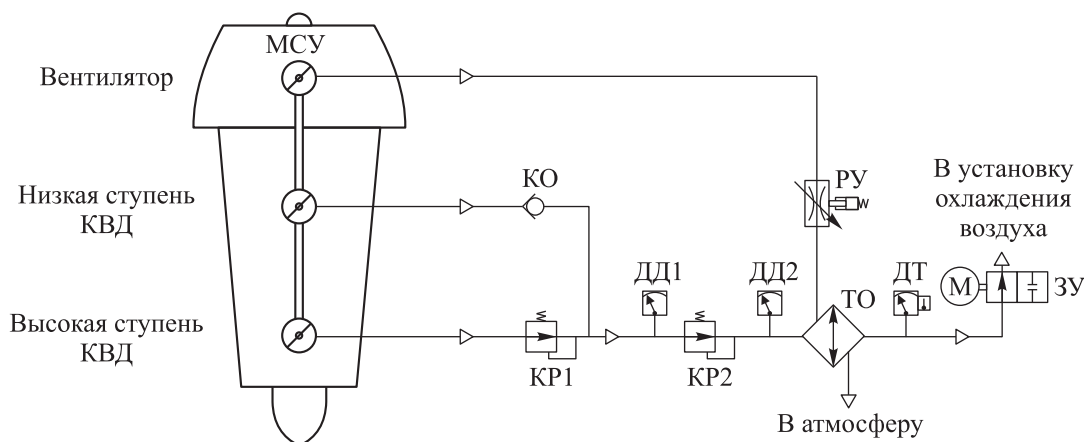


Рис. 1. Схема подсистемы отбора воздуха от МСУ:

КВД — компрессор высокого давления; КО — клапан обратный; КР1, КР2 — регуляторы давления; ДД1, ДД2 — датчики давления; РУ — регулятор расхода продувочного воздуха; ТО — теплообменный аппарат; ДТ — датчик температуры; М — электропривод; ЗУ — запорное устройство (перекрывной клапан)

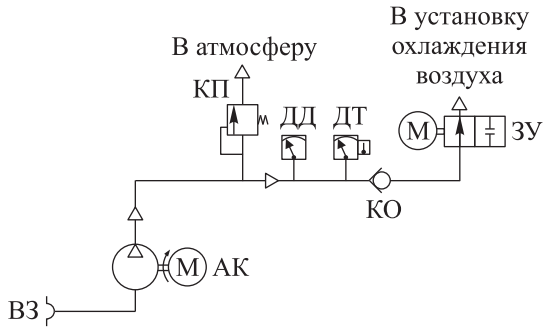


Рис. 2. Схема подсистемы отбора воздуха от АК: ВЗ — воздушозаборник; М — электропривод; КП — клапан предохранительный; ДД — датчик давления; ДТ — датчик температуры; КО — клапан обратный; ЗУ — запорное устройство (перекрывающий клапан)

можно сделать, опираясь на ее математическую модель.

Цель статьи — разработка системы регулирования электрической СКВ с помощью математической модели, учитывающей совместное действие АК, подсистем регулирования подачи и температуры воздуха.

Схема проектирования системы регулирования электрической СКВ с помощью математической модели. Работа АК основана на методе регулирования подачи воздуха путем изменения частоты вращения ротора, что позволяет изменять параметры воздуха под каждый эксплуатационный режим СКВ.

Рассмотрим блок-схему математической модели АК, приведенную на рис. 3. Здесь введены следующие обозначения: $G_{СКВ}$ — фактический массовый расход воздуха, поступающий в СКВ от АК; n_k — частота вращения АК; p_h — давление внешней среды; π_k — степень сжатия АК; $p_{компр}$ — давление воздуха за АК.

По значениям массового расхода воздуха $G_{СКВ}$, частоты вращения АК n_k и давления внешней среды p_h на соответствующей высоте полета определяется степень сжатия $\pi_k = f(G_{СКВ}, n_k, p_h)$ исходя из зависимости приведенного массового расхода воздуха через АК $\bar{G}_{пр}$ от степени его сжатия π_k , показанной на рис. 4.

Блок-схема математической модели подсистемы регулирования расхода воздуха приведе-

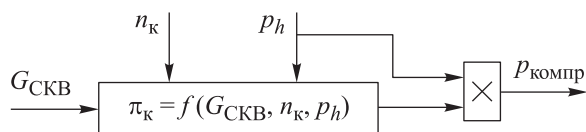


Рис. 3. Блок-схема математической модели АК

на на рис. 5, где введены следующие обозначения: $p_{каб}$ — давление воздуха в гермокабине (ГК) согласно программе регулирования давления; $g_{охл}$ и $g_{наг}$ — проводимости систем охлаждения и нагрева; $G_{зад}$ — заданный массовый расход воздуха; k — коэффициент усиления; $1/s$ — интегрирующее звено.

В этой блок-схеме определяется фактический массовый расход воздуха

$$G_{СКВ} = (p_{компр} - p_{каб})(g_{охл} + g_{наг}).$$

Вычисляется разница между заданным $G_{зад}$ и фактическим $G_{СКВ}$ массовыми расходами воздуха — погрешность, которая умножается на коэффициент усиления для парирования неустойчивой работы, интегрируется, после чего подается сигнал на изменение частоты вращения АК n_k , а следовательно, происходит процесс поддержания расхода воздуха.

Блок-схема математической модели подсистемы терморегулирования приведена на рис. 6. Здесь введены следующие обозначения: $T_{зад}$ и $T_{каб}$ — заданная и фактическая температуры

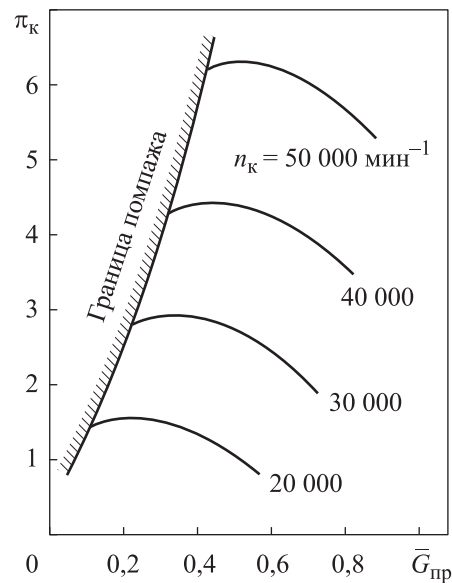


Рис. 4. Качественный вид напорной характеристики АК при различных значениях частоты вращения АК

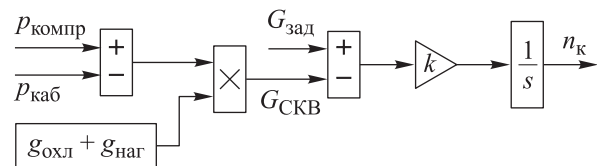


Рис. 5. Блок-схема математической модели подсистемы регулирования расхода воздуха, поступающего от АК

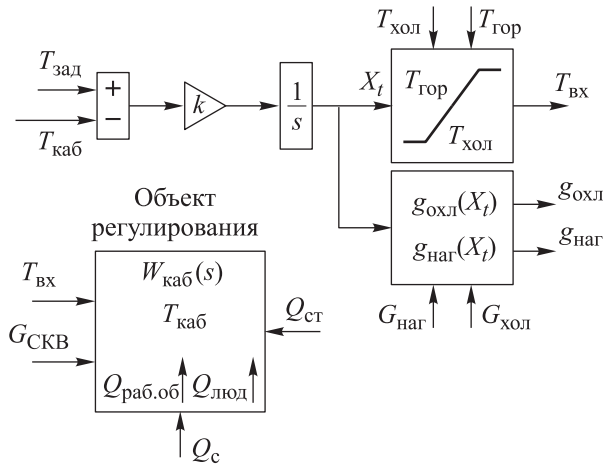


Рис. 6. Блок-схема математической модели подсистемы терморегулирования

воздуха в ГК; $T_{хол}$ и $T_{гор}$ — температуры холодного и горячего потоков воздуха; $T_{вх}$ — температура воздуха на входе в ГК от СКВ; $G_{охл}$ и $G_{наг}$ — массовые расходы воздуха через системы охлаждения и нагрева; $W_{каб}(s)$ — передаточная функция ГК; $Q_{раб.об}$, $Q_{люд}$, Q_c и $Q_{ст}$ — тепловой поток от работающего оборудования, людей, солнечной радиации и стенок фюзеляжа соответственно.

В блок-схеме математической модели подсистемы терморегулирования заслонка регулятора температуры изменяет промежуточное положение в зависимости от управляющего сигнала $X_t \in [0, 1]$, что обеспечивает смешение потоков холодного и горячего воздуха. При $X_t = 0$ заслонка полностью закрыта, а при $X_t = 1$ — полностью открыта. Температура воздуха на входе в ГК на входе в ГК от СКВ $T_{вх}$ зависит от управляющего сигнала X_t .

В ГК происходит процесс теплообмена, описываемый уравнением [18]

$$\sum Q = C_p M_b \frac{dT_{каб}}{dt},$$

где $\sum Q$ — алгебраическая сумма тепловых потоков, поступающих в ГК, Вт; C_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К); M_b — масса воздуха, заключенного в объеме ГК, кг; $T_{каб}$ — температура воздуха в ГК, К.

Разработка ГК самолета как объекта регулирования по температуре воздуха. Объектом регулирования является объем воздуха, заключенный в ГК [19]. Температурное поле ГК —

нестационарное, т. е. $\partial T / \partial t \neq 0$ (где t — время), и распределено неравномерно по ее объему. Математически это описывается уравнением [20]

$$T = f(x, y, z, t).$$

В общем случае приращение температуры воздуха в ГК определяется уравнением в частных производных

$$\Delta T(x, y, z, t) = \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \Delta t,$$

где Δx , Δy и Δz — изменение положения воздушных масс по длине, высоте и ширине фюзеляжа соответственно; Δt — приращение времени.

При неустановившемся тепловом режиме (когда температурное поле равномерно распределено по объему) уравнение теплового баланса запишется следующим образом [21]:

- для ГК

$$C_p \rho_{каб} W_{каб} \frac{dT_{каб}}{dt} = C_p G_{СКВ} (T_{вх} - T_{каб}) - k_{ст} F_{ст} (T_{каб} - T_{н.ст}) - \alpha_{об} F_{об} (T_{каб} - T_{об}) + Q_{люд} + Q_c + Q_{раб.об}, \quad (1)$$

- для оборудования ГК

$$C_{об} M_{об} \frac{dT_{об}}{dt} = \alpha_{об} F_{об} (T_{каб} - T_{об}), \quad (2)$$

где $\rho_{каб}$ — плотность воздуха в ГК, кг/м³; $W_{каб}$ — объем ГК, м³; $k_{ст}$ — коэффициент теплопередачи через стенку фюзеляжа с учетом теплоотдачи внутри ГК, Вт/(м²·К); $F_{ст}$ — площадь стенки фюзеляжа, м²; $T_{н.ст}$ — температура наружной стенки фюзеляжа, К; $\alpha_{об}$ — коэффициент теплоотдачи между элементами оборудования и воздухом в ГК, Вт/(м²·К); $F_{об}$ — площадь, занимаемая оборудованием ГК, м²; $T_{об}$ — температура оборудования ГК, К; $C_{об}$ — теплоемкость оборудования ГК, Дж/(кг·К); $M_{об}$ — масса оборудования ГК, кг.

Переходя к относительным величинам, приведем уравнения (1) и (2) к виду

$$\begin{cases} T_K \frac{dT_{\text{каб}}}{dt} = T_{\text{вх}} - T_{\text{каб}} - a(T_{\text{каб}} - T_{\text{н.ст}}) - \\ - b(T_{\text{каб}} - T_{\text{об}}) + f(t); \\ T_O \frac{dT_{\text{об}}}{dt} = T_{\text{каб}} - T_{\text{об}}, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$T_K = \frac{\rho_{\text{каб}} W_{\text{каб}}}{G_{\text{СКВ}}}, \text{ с}; \quad T_O = \frac{C_{\text{об}} M_{\text{об}}}{\alpha_{\text{об}} F_{\text{об}}}, \text{ с};$$

$$f(t) = \frac{Q_{\text{люд}} + Q_c + Q_{\text{раб.об}}}{C_p G_{\text{СКВ}}};$$

$$a = \frac{k_{\text{ст}} F_{\text{ст}}}{C_p G_{\text{СКВ}}}; \quad b = \frac{\alpha_{\text{об}} F_{\text{об}}}{C_p G_{\text{СКВ}}}.$$

Выражая из первого уравнения системы (3) температуру оборудования ГК $T_{\text{об}}$ и подставляя ее во второе уравнение, запишем дифференциальное уравнение второго порядка для ГМ как регулируемого объекта по температуре воздуха

$$\begin{aligned} T_K T_O \frac{d^2 T_{\text{каб}}}{dt^2} + (T_K + T_O) \frac{dT_{\text{каб}}}{dt} + \\ + (a + b) T_O \frac{dT_{\text{каб}}}{dt} + (1 + a) T_{\text{каб}} = \\ = T_O \frac{dT_{\text{вх}}}{dt} + T_{\text{вх}} + a \left(T_O \frac{dT_{\text{н.ст}}}{dt} + T_{\text{н.ст}} \right) + \\ + T_O \frac{df(t)}{dt} + f(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Выполнив преобразование Лапласа

$$\frac{d^n T(t)}{dt^n} \Rightarrow s^n T(s)$$

при нулевых начальных условиях и разделив уравнение (4) на $T_O s + 1$, получим передаточную функцию ГК

$$W_{\text{каб}}(s) = \frac{1}{T_K s + 1 + a + \frac{T_O s b}{T_O s + 1}},$$

где s — оператор Лапласа.

Передаточная функция определяет связь между выходной $T_{\text{каб}}$ и входной $T_{\text{вх}}$ величинами (их изображениями по Лапласу).

Использование передаточной функции позволяет определить реакцию электрической СКВ на воздействие входной величины.

Выводы

1. Разработаны функциональные подсистемы регулирования авиационных электрических СКВ с помощью математической модели, в которой реализована связь подсистем регулирования температуры, расхода воздуха и источника наддува ГК.

2. В отличие от схемы СКВ с отбором воздуха от МСУ, где регулирование подачи осуществляется дросселированием потока воздуха при изменении проходного сечения клапана регулятора расхода воздуха, в математической модели системы регулирования электрической СКВ подача регулируется изменением частоты вращения АК.

3. В целях дальнейшего исследования динамических характеристик системы регулирования и ее конструкции приведено математическое описание тепловых процессов, происходящих в ГК при изменяющихся возмущающих факторах, обусловленных условиями полета самолета.

Литература

- [1] Бондаренко Д.А., Равикович Ю.А. Обоснование применимости гибридных силовых установок на летательных аппаратах различного типа и назначения. *Вестник МАИ*, 2023, т. 30, № 2, с. 148–157.
- [2] Паневин А.Ю. Анализ и расчетная оценка применения электроприводного автономного компрессора для системы кондиционирования воздуха в концепции более электрического среднемагистрального пассажирского самолета. *XLIX Гагаринские чтения*. Москва, Перо, 2023, с. 46–47.
- [3] Faleiro L., Herzog J., Schievelbusch B. et al. Integrated equipment systems for a more electric aircraft hydraulics and pneumatics. *24th ICAS*, 2004, pp. 1–10.
- [4] Raghu C., Hemanth D., Soorya R. et al. Analytical design and estimation of conventional and electrical aircraft environmental control systems. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2022, vol. 1226, art. 012111, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1226/1/012111>
- [5] Каллиопин А.К., Савельев Р.С., Смагин Д.И. Основные тенденции развития систем кондиционирования воздуха перспективных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 6, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1627>

- [6] Смагин Д.И., Старостин К.И., Савельев Р.С. и др. Анализ конкурирующих вариантов систем кондиционирования воздуха без отбора воздуха от двигателей на этапе концептуального проектирования комплекса бортовых систем пассажирских самолетов. *Computational Nanotechnology*, 2019, т. 6, № 3, с. 86–91, doi: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-86-91>
- [7] Grishina L.A., Pronin D.V. Analysis of the work, efficiency, and possibilities of constructive improvement of electrical air conditioning systems. *E3S Web Conf.*, 2023, vol. 383, art. 04042, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304042>
- [8] Смагин Д.И., Старостин К.И., Савельев Р.С. и др. Методика определения проектных параметров центробежного воздушного компрессора на основе математической модели безотборной системы кондиционирования воздуха. *Информатика и вычислительная техника и управление. Сер. Естественные и технические науки*, 2020, № 10, с. 115–121, doi: <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2020.10.28>
- [9] Тищенко И.В., Чижиков В.Е., Царьков И.А. и др. Разработка воздушного электрокомпрессора для безотборной системы кондиционирования воздуха перспективного регионального самолета. *Холодильная техника*, 2022, т. 111, № 2, с. 115–122, doi: <https://doi.org/10.17816/RF110694>
- [10] Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л. и др. Электропривод компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрифицированного самолета. *Мехатронные системы, исполнительные устройства*, 2011, № 4, с. 39–44.
- [11] Parrilla J. Hybrid environmental control system integrated modeling trade study analysis for commercial aviation. *SAE Tech. Pap.*, 2014, no. 2014-01-2155, doi: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2155>
- [12] Herzog J. Electrification of the environmental control system. *25th Int. Congress of the Aeronautical Sciences*, 2006, pp. 1–4.
- [13] Diaz V. *Analysis of an electric environmental control system to reduce the energy consumption of fixed-wing and rotary-wing aircraft*. Cranfield University, 2011. 162 p.
- [14] Yang Y., Gao Z. Power optimization of the environmental control system for the civil more electric aircraft. *Energy*, 2019, vol. 172, pp. 196–206, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.115>
- [15] Fioriti M., Di Fede F. A design model for electric environmental control system in aircraft conceptual and preliminary design. *Int. Rev. Aerosp. Eng.*, 2023, vol. 16, no 2, pp. 58–72, doi: <https://doi.org/10.15866/irease.v16i2.23379>
- [16] Smith A., Childs T., Chen R. Study into electrically shaft driven air cycle machines. *1st Int. Conf. on Advances in Aerospace Structures, Systems and Technology*, 2018, pp. 1–9.
- [17] Yang H., Zhang X., Wang C. et al. Design analysis of power recovery systems for cabin exhaust air. *Procedia Eng.*, 2015, vol. 121, pp. 248–255, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1065>
- [18] Шустров Ю.М. *Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, Машиностроение, 2006. 384 с.
- [19] Щербаков А.В. *Автоматическое регулирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, Изд во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 290 с.
- [20] Быков Л.Т., Ивлентиев В.С., Кузнецов В.И. *Высотное оборудование пассажирских самолетов*. Москва, Машиностроение, 1972. 332 с.
- [21] Волков А.А. Нестационарные режимы работы системы терморегулирования гермокабины. *Вестник МАИ*, 2011, т. 18, № 3, с. 5–9.

References

- [1] Bondarenko D.A., Ravikovich Yu.A. Hybrid power plants applicability substantiation on various types and purpose aircraft. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 148–157. (In Russ.).
- [2] Panevin A.Yu. [Analysis and computational evaluation of the application of an electric-driven autonomous compressor for the air conditioning system in the concept of a more

- electric medium-haul passenger aircraft]. *XLIX Gagarinskie chteniya* [XLIX Gagarin Readings]. Moscow, Pero Publ., 2023, pp. 46–47. (In Russ.).
- [3] Faleiro L., Herzog J., Schievelbusch B. et al. Integrated equipment systems for a more electric aircraft hydraulics and pneumatics. *24th ICAS*, 2004, pp. 1–10.
- [4] Raghu C., Hemanth D., Soorya R. et al. Analytical design and estimation of conventional and electrical aircraft environmental control systems. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2022, vol. 1226, art. 012111, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1226/1/012111>
- [5] Kalliopin A.K., Savelyev R.S., Smagin D.I. Main trends in designing air conditioning systems for future-technology vehicles. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2017, no. 6, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1627> (in Russ.).
- [6] Smagin D.I., Starostin K.I., Savelyev R.S. et al. Analysis of competing variants of air conditioning systems without air extraction from engines at the stage of passenger aircraft onboard systems conceptual design. *Computational Nanotechnology*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 86–91, doi: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-3-86-91> (in Russ.).
- [7] Grishina L.A., Pronin D.V. Analysis of the work, efficiency, and possibilities of constructive improvement of electrical air conditioning systems. *E3S Web Conf.*, 2023, vol. 383, art. 04042, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304042>
- [8] Smagin D.I., Starostin K.I., Savelyev R.S. et al. Method for determining the design parameters of a centrifugal air compressor based on a mathematical model of a non-selective air conditioning system. *Informatika i vychislitel'naya tekhnika i upravlenie. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Ser. Natural and Technical Sciences], 2020, no. 10, pp. 115–121, doi: <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2020.10.28> (in Russ.).
- [9] Tishchenko I.V., Chizhikov V.E., Tsarkov I.A. et al. Development of an air electric compressor for a no-bleed environmental control system of an advanced regional aircraft. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration Technology], 2022, vol. 111, no. 2, pp. 115–122, doi: <https://doi.org/10.17816/RF110694> (in Russ.).
- [10] Volokitina E.V., Vlasov A.I., Kopchak A.L. et al. Compressor electric drive of air-conditioning system in the 'all electric aircraft' concept. *Mekhatronnye sistemy, ispolnitelnye ustroystva*, 2011, no. 4, pp. 39–44. (In Russ.).
- [11] Parrilla J. Hybrid environmental control system integrated modeling trade study analysis for commercial aviation. *SAE Tech. Pap.*, 2014, no. 2014-01-2155, doi: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2155>
- [12] Herzog J. Electrification of the environmental control system. *25th Int. Congress of the Aeronautical Sciences*, 2006, pp. 1–4.
- [13] Diaz V. *Analysis of an electric environmental control system to reduce the energy consumption of fixed-wing and rotary-wing aircraft*. Cranfield University, 2011. 162 p.
- [14] Yang Y., Gao Z. Power optimization of the environmental control system for the civil more electric aircraft. *Energy*, 2019, vol. 172, pp. 196–206, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.115>
- [15] Fioriti M., Di Fede F. A design model for electric environmental control system in aircraft conceptual and preliminary design. *Int. Rev. Aerosp. Eng.*, 2023, vol. 16, no 2, pp. 58–72, doi: <https://doi.org/10.15866/irease.v16i2.23379>
- [16] Smith A., Childs T., Chen R. Study into electrically shaft driven air cycle machines. *1st Int. Conf. on Advances in Aerospace Structures, Systems and Technology*, 2018, pp. 1–9.
- [17] Yang H., Zhang X., Wang C. et al. Design analysis of power recovery systems for cabin exhaust air. *Procedia Eng.*, 2015, vol. 121, pp. 248–255, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1065>
- [18] Shustrov Yu.M. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Design of aviation air conditioning systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 384 p. (In Russ.).
- [19] Shcherbakov A.V. *Avtomaticheskoe regulirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Automatic regulation of aviation air conditioning systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 290 p. (In Russ.).

- [20] Bykov L.T., Ivlentiev V.S., Kuznetsov V.I. *Vysotnoe oborudovanie passazhirsikh samoletov* [High-altitude equipment of passenger aircrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 332 p. (In Russ.).
- [21] Volkov A.A. Unsteady modes behaviour of cabin air temperature control system. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2011, vol. 18, no. 3, pp. 5–9. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 05.04.2024

Информация об авторах

ГРИШИНА Лариса Андреевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники». Московский авиационный институт (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: petrolar88@yandex.ru).

ПАНЕВИН Александр Юрьевич — аспирант кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: A.panev99@yandex.ru).

Information about the authors

GRISHINA Larisa Andreevna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design and Certification of the Aviation Equipment. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: petrolar88@yandex.ru).

PANEVIN Aleksandr Yur'evich — Postgraduate, Department of Design and Certification of Aviation Equipment. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: A.panev99@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гришина Л.А., Паневин А.Ю. Разработка функциональных подсистем регулирования электрической системы кондиционирования воздуха пассажирского самолета. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 12, с. 88–95.

Please cite this article in English as:

Grishina L.A., Panevin A.Yu. Design and development of the electrical air conditioning control system functional subsystems in a passenger aircraft. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 12, pp. 88–95.