

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ: ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ

Л. И. Левченко¹, И. И. Ямалов²

¹levchenko.li@ugatu.su, ²yamalov.ii@ugatu.su

^{1,2}ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. Рассматриваются ключевые аспекты и современные подходы к созданию надежных и эффективных систем электроснабжения (СЭС) для летательных аппаратов (ЛА). Основные требования к СЭС для ЛА включают надежность, отказоустойчивость, энергоэффективность, минимальные массогабаритные характеристики и электромагнитную совместимость (ЭМС). Работа подчеркивает важность комплексного подхода к проектированию СЭС для ЛА, включающего использование передовых технологий и методов моделирования для создания надежных, эффективных и безопасных систем электроснабжения.

Ключевые слова: системы электроснабжения летательных аппаратов; электромагнитная совместимость; силовые преобразователи; электромагнитные помехи.

ВВЕДЕНИЕ

История развития систем электроснабжения (СЭС) для летательных аппаратов (ЛА) начинается в начале прошлого века. Первые ЛА использовали простые электрические системы для питания базовых приборов. С развитием авиации и космонавтики требования к СЭС многократно возросли. Современные ЛА, включая самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и космические аппараты, требуют комплексных и многофункциональных СЭС, способных работать в экстремальных условиях. Проектирование данных систем является сложной и многогранной задачей, требующей учета множества факторов, таких как надежность, эффективность, безопасность и массогабаритные характеристики. По этой причине при создании СЭС для ЛА существуют большое количество проблем, с которыми необходимо разобраться для создания работоспособной и надежной системы. На сегодняшний день основными требованиями к СЭС для ЛА являются [1]:

- надежность и отказоустойчивость;
- энергоэффективность;
- минимально возможные массогабаритные характеристики;
- электромагнитная совместимость (ЭМС).

Для соответствия данным требованиям необходимо использовать современные технологии. К примеру, для более стабильной работы СЭС нужно закладывать более эффективные системы охлаждения [2]. Принудительное жидкостное охлаждение является предпочтительным решением для обеспечения надежной работы силовой электроники, а аддитивные технологии могут положительно сказаться на разработке конструкций радиаторов [3]. Также исследуются возможности внедрения криогенных систем охлаждения для достижения более высоких температурных диапазонов. Научные труды [4, 5] показывают

перспективность данных систем исходя из того, что оба типа потерь демонстрируют снижение с уменьшением температуры кристалла.

ТОПОЛОГИИ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Также при обсуждении силовой электроники для СЭС ЛА следует проанализировать новые топологии, такие как активные изолированные преобразователи AC/DC и многоуровневые инверторы, которые обещают улучшенную производительность и плотность мощности. Схема четырехкратного изолированного силового преобразователя представлена на рис. 1. Управление также играет ключевую роль в оптимизации производительности системы. В научной литературе [6, 7] большое внимание уделяется коммутация нулевого напряжения, что является включением или выключением питания нагрузки, когда выходное напряжение равно нулю. При таком алгоритме переключения силовых ключей потери при переключении снижаются, что приводит к повышению энергоэффективности и снижению тепловыделения. Тем не менее реализация данного алгоритма требует тщательного проектирования, включая выбор подходящих компонентов, методов управления и топологий схем.

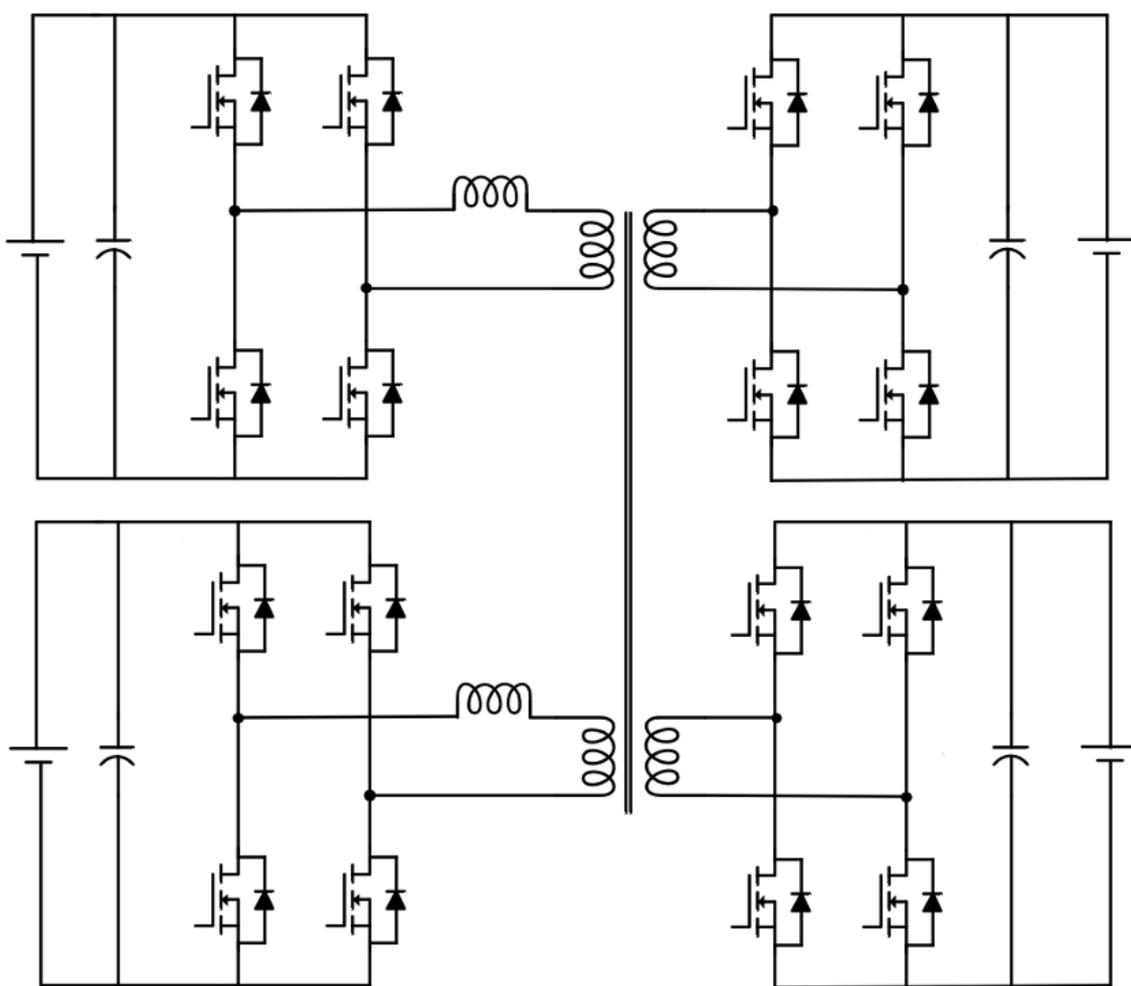


Рис. 1. Схема четырехкратного изолированного силового преобразователя

Вопросы, связанные с ЭМС, также являются критически важными для обеспечения безопасности ЛА. ЭМС включает в себя анализ и управление электромагнитными помехами, которые могут возникать как из внешних, так и из внутренних источников. Несоблюдение требований ЭМС может привести к сбоям в работе критически важных систем, таких как навигационные приборы, системы управления и связи, что, в свою очередь, может поставить

под угрозой безопасность полета. Рассматривая силовые преобразователи, основным источником электромагнитных помех является инвертор, управляемый с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), особенно – на высоких частотах ШИМ. Для их подавления используются пассивные фильтры, которые состоят из индуктивности и ёмкости. Данные фильтры эффективны в диапазоне рабочих частот ШИМ, обеспечивая лучшую ЭМС. Однако он не влияет на перенапряжение двигателя и не снижает токи общего режима, циркулирующие в двигателе [8].

РЕАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

Для наиболее точного предсказания электромагнитных помех необходимо учитывать переходные процессы переключения полупроводниковых устройств и паразитные параметры электронных компонентов. Традиционные методы моделирования, такие как использование идеальных ключей или линейных моделей, не позволяют учитывать высокочастотные составляющие. По этой причине необходимо использовать физически обоснованную модель [9] ключей для точного моделирования системы. Выходные характеристики области среза, линейности и насыщения MOSFET транзистора:

$$I_{mos} = \begin{cases} 0, & V_{gs} < V_p \\ I_{sat} \cdot (1 + K_{LM} \cdot V_{ds}) \cdot \left(2 - \frac{V_{ds}}{V_{sat}}\right) \cdot \frac{V_{ds}}{V_{sat}}, & V_{ds} < V_{sat}, \\ I_{sat} \cdot (1 + K_{LM} \cdot V_{ds}), & V_{ds} \geq V_{sat} \end{cases}$$

где V_{ds} и V_{gs} – напряжение сток–исток и затвор–исток соответственно; I_{sat} и V_{sat} – ток и напряжение насыщения; V_p – напряжение срабатывания ключа; K_{LM} – коэффициент транзистора, для MOSFET обычно равен 0,001.

Типичная схема инвертора представлена на рис. 2. Данная схема была загружена в ПО Matlab, однако модели ключей были обновлены согласно характеристике, описанной выше. Результаты моделирования данного инвертора представлены на рис. 3.

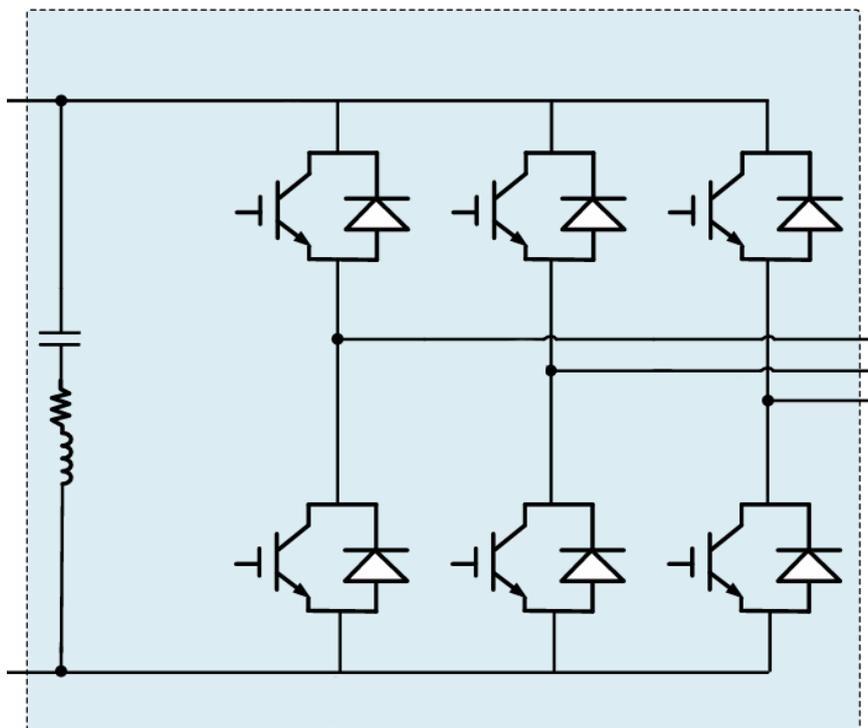


Рис. 2. Схема инвертора

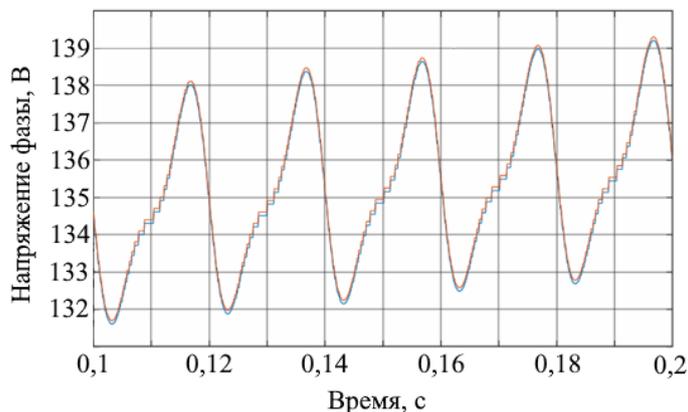


Рис. 3. Моделирование напряжения фазы инвертора

Искажение синусоиды обуславливается именно внутренними характеристиками транзистора, что является доказательством того, что идеальные модели не подходят для решения задач, связанных с прогнозированием и обеспечением ЭМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены ключевые аспекты и современные подходы к созданию надежных и эффективных систем электроснабжения летательных аппаратов. Были определены основные требования к СЭС для ЛА, включающие надежность, отказоустойчивость, энергоэффективность, минимальные массогабаритные характеристики и электромагнитную совместимость. Для удовлетворения данных требований в статье анализируются новые топологии силовой электроники, такие как активные изолированные преобразователи AC/DC и многоуровневые инверторы, которые обещают улучшенную производительность и плотность мощности. Особое внимание уделяется управлению коммутацией нулевого напряжения для повышения энергоэффективности и снижения тепловыделения, с учётом электромагнитной совместимости при данном режиме работы. Результаты моделирования инверторов в программном обеспечении Matlab подтверждают необходимость использования физически обоснованных моделей ключей для точного предсказания электромагнитных помех. Статья подчеркивает важность комплексного подхода к проектированию системы электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cano T. C. et al.** Future of Electrical Aircraft Energy Power Systems: An Architecture Review // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. Т. 7. № 3. С. 1915–1929.
2. **Coutinho M. et al.** A review on the recent developments in thermal management systems for hybrid-electric aircraft // Applied Thermal Engineering. 2023. Т. 227. С. 120427.
3. **Wu T. et al.** Thermal response of additive manufactured aluminum // 2016 International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM). IEEE. 2016. С. 1–15.
4. **Алексеев А. О.** Трехфазный корректор коэффициента мощности с криогенным охлаждением для перспективных авиационных систем электроснабжения / А. О. Алексеев, Д. М. Шишов, П. А. Трошин, Д. А. Шевцов // Электричество. 2024. № 1. С. 10–17. DOI 10.24160/0013-5380-2024-1-10-17. EDN ВР0КСЕ.
5. **Ostapchuk M., Shishov D., Shevtsov D., Zanegin S.** Research of Static and Dynamic Properties of Power Semiconductor Diodes at Low and Cryogenic Temperatures // Inventions. 2022. Т. 7. № 4. С. 96. DOI: 10.3390/inventions7040096.
6. **Wu J., Zhang W., Sun X., Su X.** Research on Reactive Power Optimization Control of a Series-Resonant Dual-Active-Bridge Converter // Energies. 2022. Т. 15. № 11. С. 3856. DOI: 10.3390/en15113856.
7. **Yan Y., Gui H., Bai H.** Complete ZVS analysis in dual active bridge // IEEE Transactions on Power Electronics. 2020. Т. 36. №. 2. С. 1247–1252.
8. **Miloudi H. et al.** Optimization of EMC Filter for a Variable Speed Drive System in Electric Aircraft // The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. 2023. Т. 26. С. 60–66.
9. **Zhu R., Huang Z., Dinavahi V.** A universal wideband device-level parallel simulation method and conducted EMI analysis for more electric aircraft microgrid // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics. 2020. Т. 1. №. 2. С. 162–171.

ОБ АВТОРАХ

Левченко Лев Игоревич, аспирант каф. ЭМ ПИШ «Моторы будущего».

Ямалов Ильнар Илдарович, к.т.н, доц. каф. ЭМ ПИШ «Моторы будущего».

METADATA

Title: Power supply systems design for aircraft: challenges and solutions.

Author: L.I. Levchenko¹, I.I. Yamalov²

Affiliation:

^{1,2} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ levchenko.li@ugatu.su, ² yamalov.ii@ugatu.su

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 66-70, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: Key aspects and modern approaches to the creation of reliable and efficient power supply systems (SPS) for aircraft are considered. The main requirements for solar power plants for aircraft include reliability, fault tolerance, energy efficiency, minimum weight and size characteristics and electromagnetic compatibility (EMC). The work emphasizes the importance of an integrated approach to the design of solar power plants for aircraft, including the use of advanced technologies and modeling methods to create reliable, efficient and safe power supply systems.

Keywords: aircraft power supply systems, electromagnetic compatibility, power converters, electromagnetic interference.

About authors:

Levchenko Lev Igorevich, postgraduate student, Dept. of ELECTROMECHANICS (UUST).

Yamalov Ilnar Ildarovich, assistant professor, Dept. of ELECTROMECHANICS (UUST).