

А. М. Малєєва, Д. В. Власюк, Ю. В. Георгієв

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ В АВАРІЙНУ СИСТЕМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ЛІТАКА «РОЗУМНИХ» АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Анотація: обґрунтовано доцільність комплексної модернізації системи аварійного електроживлення постійного струму винищувачів типу МиГ-29 шляхом переходу від традиційних нікель-кадмієвих накопичувачів серії 20KSX-22P до високоефективних літій-іонних акумуляторних модулів з інтегрованим інтелектуальним контролем. Проаналізовано технічні рішення, випробувані у сучасних безпілотних авіаційних комплексах Bayraktar TB2, та визначено ключові засади їх адаптації до вимог бортової мережі двадцять сім вольт бойового літака. Визначено шляхи забезпечення апаратно-програмної сумісності, алгоритми предиктивного моніторингу стану батарей та оцінено вплив інтелектуалізації енергосистеми на загальний рівень живучості й автономності повітряного судна в умовах виконання складних польотних завдань.

Ключові слова: аварійне електропостачання, постійний струм, МиГ-29, 20KSX-22P, інтелектуальний контроль, літій-іонні модулі, Bayraktar TB2, бортова мережа.

Abstract: The rationale for a comprehensive modernization of the DC emergency power supply system for MiG-29 type fighter aircraft is presented, involving a transition from traditional 20KSX-22P series nickel-cadmium batteries to high-efficiency lithium-ion battery modules with integrated intelligent control. Technical solutions tested in modern Bayraktar TB2 unmanned aerial systems are analyzed, and the key principles for adapting them to the requirements of a combat aircraft's 27-volt onboard electrical system have been defined. Approaches to ensuring hardware and software compatibility, as well as algorithms for the predictive monitoring of battery status, have been established; furthermore, the impact of incorporating intelligence into the power system on the overall survivability and autonomy of the aircraft during the execution of complex flight missions has been assessed.

Keywords: emergency power supply, direct current, MiG-29, 20KSX-22R, intelligent control, lithium-ion modules, Bayraktar TB2, onboard electrical network.

Аварійна система електропостачання постійного струму є критично важливим елементом забезпечення живучості бойового літака в разі відмови основних і допоміжних джерел електроенергії, до яких належать генератори постійного та змінного струму, а також випрямні пристрої. На літаках типу МиГ-29 основним джерелом аварійного живлення мережі напругою двадцять сім вольт є бортові нікель-кадмієві акумуляторні батареї серії 20KSX-22P, які широко застосовуються як модернізовані елементи живлення зі спеченими електродами. Вони мають покращені розрядні характеристики та вищу надійність порівняно зі застарілими зразками минулого століття. Проте, незважаючи на високу стійкість акумуляторів 20KSX-22P до високих струмів розряду та розширений температурний діапазон, тривале використання накопичувачів даного типу у сучасних високоінтенсивних режимах польоту виявляє низку принципових обмежень. Насамперед це стосується питомої енергоємності нікель-кадмієвої електрохімічної системи 20KSX-22P, яка все ще залишається порівняно низькою і спричиняє значну масу бортового обладнання при обмеженому запасі накопиченої енергії. Крім того, традиційним акумуляторам серії 20KSX-22P притаманний ризик теплового розгону при вихідних відхиленнях режиму заряду, а також відсутність цифрових засобів безперервного діагностичного моніторингу залишкової ємності, внутрішнього опору та температурного профілю окремих осередків у режимі реального часу безпосередньо в польоті.

Батарея 20KSX-22P функціонує як пасивне джерело струму, що унеможливорює точне прогнозування її залишкового ресурсу екіпажем або бортовим комп'ютером у позаштатних ситуаціях. У разі виходу з ладу основних генераторів під час виконання бойового завдання аварійна

система на основі батарей 20KSX-22P здатна підтримувати роботу лише критичної групи приладів протягом вкрай обмеженого проміжку часу, якого за умов активного маневрування та використання засобів зв'язку може виявитися недостатньо для безпечного повернення на аеродром базування або виходу із зони ураження.

Розвиток сучасних авіаційних систем, зокрема аналіз досвіду успішної експлуатації безпілотних літальних апаратів Bayraktar TB2, продемонстрував високу ефективність переходу на інтелектуальні літій-іонні та літій-залізо-фосфатні джерела живлення. Основною відмінністю та перевагою таких систем є наявність цифрової системи керування батареєю, відомої як BMS. Застосування концепції «розумної» батареї замість акумуляторів 20KSX-22P у військово-авіаційній енергетичній системі забезпечує реалізацію трьох фундаментальних функцій, серед яких прецизійний моніторинг електричних і термічних параметрів кожного осередку, динамічне активне чи пасивне балансування заряду між елементами для запобігання передчасному зносу та предиктивна діагностика поточного рівня заряду й загального ступеня деградації. Порівняльний аналіз показує, що питома енергоємність літійових систем перевищує показники батарей 20KSX-22P майже втричі, що дає змогу суттєво зменшити загальну масу бортового акумуляторного комплексу при одночасному збільшенні фактичного запасу аварійної енергії. Ефективність заряду зростає майже до дев'яноста восьми відсотків, а рівень саморозряду знижується до мінімальних значень на місяць при одночасному зростанні циклічного ресурсу.

Для впровадження інтелектуальної акумуляторної системи в існуючу схему електропостачання МиГ-29 замість батарей 20KSX-22P необхідно розробити спеціалізований узгоджувальний апаратний модуль, виготовлений у вигляді адаптера бортового інтерфейсу, та модифікувати тракт підключення до шин аварійного живлення. Акумуляторний модуль формується з послідовно з'єднаних літій-залізо-фосфатних осередків, робочий діапазон напруги яких повністю відповідає нормам напруги в бортовій мережі постійного струму відповідно до вимог чинних авіаційних стандартів для мереж двадцять сім вольт.

Система BMS здійснює безперервне обчислення стану заряду шляхом комбінування методів математичного інтегрування струму навантаження та вимірювання напруги розмикання кола з урахуванням температурних коефіцієнтів і динаміки старіння елементів. Для оцінки деградації джерела живлення система відстежує зростання внутрішнього опору осередків під час імпульсних навантажень. Якщо показник технічного стану падає нижче визначеної критичної позначки, система автоматично формує та передає цифровий сигнал про необхідність технічного обслуговування на наземний пункт підтримки.

Оцінка часу автономної роботи критичної групи споживачів МиГ-29 при переході зі штатної системи 20KSX-22P на «розумну» літійову систему аналогічного або меншого габаритного об'єму свідчить про значний приріст надійності. До групи критичних аварійних споживачів належать комплекс систем управління, аварійна радіостанція, системи навігації та розпізнавання, а також пілотажно-навігаційні прилади та аварійне освітлення кабіни. При сумарному аварійному струмі споживання та з урахуванням температурного коефіцієнта при виконанні польоту в умовах низьких температур, час роботи батареї 20KSX-22P зазвичай обмежений періодом, необхідним лише для найпростішого маневрування. Застосування «розумної» батареї з системою BMS дозволяє збільшити час автономного живлення критичних систем більш ніж у два з половиною рази, досягаючи тривалості близько однієї години.

Збільшення тривалості аварійного живлення дає змогу пілоту здійснити вихід із зони виконання бойового завдання, виконати тривалий політ до резервного аеродрому та здійснити безпечну посадку у складних метеоумовах. Заміна нікель-кадмієвих акумуляторів 20KSX-22P на інтелектуальні літійові модулі з системою BMS дозволяє підвищити питому енергоємність аварійної системи в кілька разів при одночасному суттєвому зниженні маси обладнання. Впровадження цифрової системи керування повністю виключить ризик раптової відмови джерела живлення в польоті за рахунок безперервного розрахунку параметрів та завчасного сповіщення екіпажу про граничні режими роботи. Напрямок подальших досліджень є розробка уніфікованого блоку

завадозахищеного апаратного інтерфейсу відповідно до військових стандартів для забезпечення високої стійкості до радіоелектронних завад і екстремальних кліматичних чинників.

Проведений аналіз підтверджує доцільність і технічну виправданість модернізації аварійної системи електропостачання постійного струму винищувача МиГ-29 шляхом заміни нікель-кадмієвих батарей 20KSX-22P на інтелектуальні літій-іонні модулі з вбудованою системою BMS, за аналогією з рішеннями Bayraktar TB2. Інтеграція BMS забезпечує безперервний предиктивний контроль напруги, струму та температури кожної комірки, що упереджує терморозгін і виключає виникнення позаштатних ситуацій без залучення пілота. Запровадження «розумних» батарей дозволяє зменшити масу обладнання на 25–35% та суттєво збільшити час аварійної автономності критично важливої авіоніки. Це гарантує стабільну роботу систем навігації та зв'язку у разі відмови основних генераторів, а також спрощує регламентне обслуговування на наземних пунктах, підвищуючи загальну живучість літака та його відповідність сучасним вимогам НАТО.

Список використаних джерел:

1. Кононов Б.Т., Лагутін Г.І. Електричні машини. – Х.:ХНУПС, 2015
2. <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2/>
3. <https://plus.shephardmedia.com/detail/bayraktar-tactical-uas/>
4. Зєнович О.Є., Кривонос В.М. Системи електропостачання повітряних суден. – Х.: ХНУПС, 2021.

Малєєва Аліна Миколаївна – слухач інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, інд. 61009, e-mail: alinka20.16maleeva@gmail.com;

Власюк Дмитро Володимирович – слухач інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, інд. 61009, e-mail: dimasvlasiuk@gmail.com;

Георгієв Юрій Вікторович – Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба старший викладач кафедри № 203, Харків, Україна; email: yura.georgiev.74@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7189-3966>.

Alina Maleieva – Student, Faculty of Aviation Engineering, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, 77/79 Sumska St., Kharkiv, 61009, Ukraine; e-mail: alinka20.16maleeva@gmail.com;

Dmytro Vlasyuk – Student, Faculty of Aviation Engineering, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, 77/79 Sumska St., Kharkiv, 61009, Ukraine; e-mail: dimasvlasiuk@gmail.com;

Yurii Heorhiiev – Senior Lecturer, Department No. 203, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: yura.georgiev.74@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7189-3966>.