

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-286-6-174-181>

УДК 629.05

АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АКУМУЛЯТОРНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

Надточий А.В., Гордєєв Б.М.

AUTOMATION OF CONTROL OF THE BATTERY-BASED ELECTRIC POWER SYSTEM OF AN UNCREWED SURFACE VESSEL

Nadtochy A.V., Gordieev B.M.

У результаті аналізу сучасного стану та актуальних напрямків досліджень у сфері безекіпажних надводних суден (БНС) продемонстровано значну перспективність їх створення та практичного застосування для вирішення широкого спектра завдань вітчизняних організацій у галузі морського господарства, оборони, екологічного моніторингу та гуманітарних місій. Встановлено, що актуальність дослідження зумовлена зростаючою потребою у підвищенні ефективності, автономності, надійності та безпеки експлуатації таких суден, особливо в умовах складного та агресивного морського середовища. Особливу увагу приділено необхідності вдосконалення автоматичних систем контролю технічного стану акумуляторних електроенергетичних систем, які є ключовим елементом забезпечення надійності функціонування БНС під час тривалих автономних місій та операцій. Проведено детальний аналіз типових технічних дефектів літій-іонних акумуляторів, що застосовуються для живлення електроенергетичних систем БНС. Серед визначених дефектів були: високий внутрішній опір елементів акумуляторів, дефекти паралельних з'єднань, глибокий розряд акумуляторних елементів, порушення роботи балансувальних схем систем управління батареями (BMS), а також численні проблеми, пов'язані з експлуатацією зарядних станцій та перетворювачів. Додатково виявлено несправності в роботі зарядних пристроїв, зокрема відсутність або некоректну роботу систем захисту від зворотної полярності, дефекти у роботі LLC драйверів, а також проблеми з керуванням системою охолодження перетворювачів. Встановлено, що значна кількість дефектів може бути пов'язана з недостатнім рівнем контролю

якості при виробництві, некоректною експлуатацією та відсутністю належного діагностичного забезпечення. Запропоновано комплексне рішення у вигляді спеціалізованих автоматичних систем контролю, які дозволяють здійснювати безперервний моніторинг ключових параметрів роботи акумуляторних батарей: напруги, струму, температури, стану заряду, а також реалізовувати функції оперативної діагностики, виявлення дефектів та аварійного відключення обладнання у разі критичних відхилень від норми. В рамках дослідження було розроблено узагальнену структуру системи автоматичного контролю технічного стану акумуляторної електроенергетичної системи БНС, що інтегрується в загальну систему управління судном. Запропоновані технічні рішення дозволяють значно підвищити надійність та автономність функціонування БНС, мінімізуючи ризики виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації.

Ключові слова: безекіпажне надводне судно, електроенергетична система, акумуляторна батарея, автоматизація, контроль технічного стану.

Вступ. Безекіпажні надводні судна (БНС, в англомовній літературі – Unmanned Surface Vessel, USV) належать до засобів морської робототехніки, які останнім часом отримали значний розвиток у багатьох напрямках морської діяльності [1-3]. Для України розробка і створення БНС на цей час має особливу актуальність, виходячи з необхідності відновлювати судноплавство на внутрішніх водних шляхах та, у перспективі, на морських

транспортних шляхах. Ще одним напрямком застосування БНС є впровадження роботизованих технологій гуманітарного розмінування морських та річкових акваторій держави, оскільки це напряму впливає на ефективність морегосподарського комплексу України [4, 5].

Однією з основних задач створення вітчизняного флоту БНС є задача розробки високоефективних систем бортової електроенергетики для таких суден. Успішний розв'язок цієї задачі має забезпечити вітчизняним БНС конкурентні переваги на міжнародному ринку засобів морської робототехніки по основним показникам – автономності роботи, дальності ходу та надійності функціонування.

Очевидно, що магістральним шляхом досягнення таких переваг є автоматизація бортових акумуляторних електроенергетичних систем як складова завдання повної автоматизації БНС у цілому.

Слід зазначити, що питання автоматизації вказаного типу джерел енергії БНС знаходиться у центрі уваги вітчизняних і зарубіжних науковців.

Так, у роботі [6] описано новий проект фірми «Damen Shipyards Group» що базується на сучасних вимогах оборони та безпеки. Цей корабель призначений для все більшого використання технології безпілотних літальних апаратів в оборонних морських операціях та для виконання широкого спектру додаткових завдань, включаючи розвідку та ін.. Однак питання електроенергетики у роботі не розглядаються.

У роботі [7] об'єктом дослідження є безпілотний надводний корабель з вітрильною установкою. Автори розглядають питання автоматичного керування нетрадиційним джерелом енергії для БНС – жорстке вітрило-крило. У дослідженні представлені відносно прості алгоритми керування таким об'єктом, які можливі при використанні симетричних аеродинамічних профілів для жорстких вітрил. Проте питання керування електрохімічними бортовими джерелами енергії у роботі не розглядаються.

У роботах [8, 9] описані системи автоматичного керування БНС як твердим тілом, яке рухається у рідині, однак керування бортовим джерелом енергії судна залишилось поза увагою авторів цих робіт.

Таким чином, можна констатувати, що на цей час зусилля дослідників та розробників

систем автоматизації БНС, в основному, зосереджені на синтезі систем керування просторовим рухом таких суден, а питання автоматичного керування їх енергетичними установками і, зокрема, питання автоматичного керування акумуляторною електроенергетичною системою БНС у науково-технічній літературі не розглядається.

Метою роботи є узагальнення практичного досвіду розробки акумуляторної електроенергетичної системи безекіпажного надводного судна та розробка узагальненої структури системи автоматичного контролю її технічного стану.

Для досягнення поставленої мети у роботі виконано аналіз технічних дефектів типових літій-іонних акумуляторів, які застосовуються у якості основних для живлення споживачів енергії безекіпажних надводних суден, обґрунтовано основні функції системи автоматичного контролю технічного стану акумуляторної батареї такого судна та синтезовано її узагальнену структуру.

Актуальність роботи. Виробництво БНС вимагає особливого підходу при виборі електроенергетичного обладнання та синтезі систем автоматичного керування ним, зважаючи на необхідність забезпечити високу надійність та керованість в екстремальних умовах експлуатації. Вибір типу акумуляторів і систем автоматики для підтримки їх працездатності в процесі експлуатації (зарядні станції, генератори, апарати комутації, контрольно-вимірювальні прилади, кабельні з'єднання) обумовлюють успішність всього проекту розробки БНС у цілому. Зважаючи на те, що виробники акумуляторів, зазвичай, використовують акумуляторні елементи інших виробників [10-12], зростає ймовірність виникнення виробничих дефектів і браків в окремих акумуляторах. Теж саме стосується іншого стороннього обладнання [13, 14]. Не зважаючи на високі гарантійні обов'язки виробників, замінити дефектне обладнання в морі для БНС не представляється можливим.

Таким чином, важливим етапом створення електроенергетичної системи БНС є вхідний і поточний контроль та діагностика комплектного обладнання [15, 16]. Це в свою чергу вимагає наявності відповідного інструментального, приладного і діагностичного забезпечення а також кваліфікованого персоналу і витрат часу. В умовах експлуатації такий контроль необхідно здійснювати автоматичними системами.

Матеріал і результати досліджень. Згідно власного досвіду розглянемо побудову

електроенергетичної систем БНС на основі акумуляторних Li-Ion батарей типу CrTitan-7263 (GreenTECH, Україна) номінальною напругою 72 В і ємністю 63 А·г (рис. 1).

Кожен акумулятор зібраний на 60 елементах Carbon Titanate CrbTi-3721: 3.7V, 21Ah, 78Wh з номінальним струмом 50А і внутрішнім опором $<2\text{m}\Omega$ (AC test 1 kHz). Були виявлені проблеми, пов'язані з дефектами внутрішніх з'єднань і роботою системи керування акумуляторними батареями (в англомовній літературі – Battery Management System, BMS) (табл. 1).

Крім того, є негативний досвід стосовно зарядних станцій типу KP5000DR-90L (виробник невідомий, Китай) вихідною потужністю $P_{\text{out}}=4,2\text{ кВт}$ для цих акумуляторів.

Зарядні станції представляють собою AC/DC ізолювані повно-мостові LLC перетворювачі 220/84В, 26/50А які згідно з заявленими характеристиками виробника

мають: двох-стадійний CC-CV режим заряду, можливість роботи «в паралель», повний перелік захисних функцій. Несправності перетворювачів представлені в табл. 1.

Стосовно дефектів в акумуляторах. Аналіз показує, що дефекти №1 і №2 акумуляторних елементів виникли по причині поганої зборки акумулятора, де їх не приєднали до силових ланцюгів (дефект №3). З часом, без підзарядки, вони повністю виснажились і деградували. Дефект №4, ймовірно, пов'язаний з некоректною роботою балансирів BMS в акумуляторах.

При живленні різних акумуляторів від одного перетворювача зарядний струм в кінці заряду одних не спадає поступово і нагадує імпульсну модуляцію. (рис. 2). Причина порушень режиму заряду акумуляторів точно не встановлена. З загального числа акумуляторів в партії, приблизно 1/3 проявляла даний дефект.

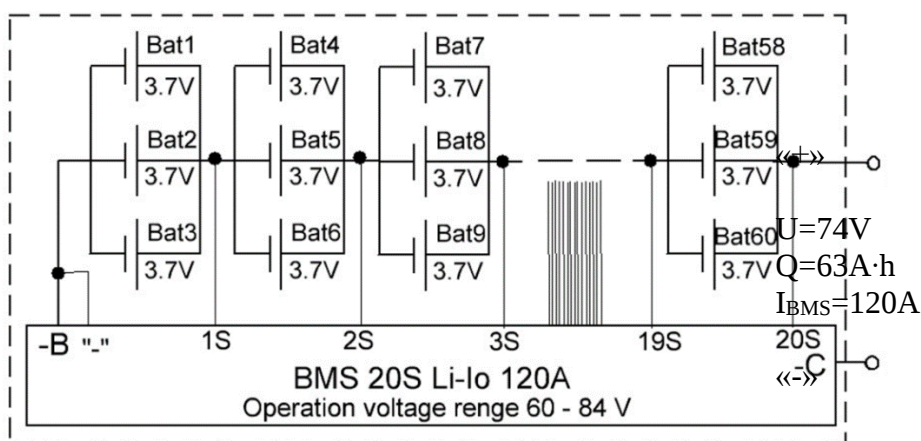


Рис. 1. Принципова схема з'єднань елементів акумулятора CrTitan-7263 по схемі 20S3P

Таблиця 1

Несправності акумуляторів (на партію з 36 од.) та зарядних станцій (7 од.)

Несправність		Кількість
В акумуляторах		
Акумуляторні елементи	1) Високий внутрішній опір	2
	2) Глибокий розряд ($<0,1\text{В}$)	
Акумулятори	3) Дефект паралельних з'єднань акумуляторних елементів (2 з 3 не приєднані до схеми)	1
	4) Несправності BMS – порушення в роботі схеми балансування.	8*
В перетворювачах		
Непрацездатність захисту від зворотної полярності, Повне КЗ вихідного моста, КЗ BMS.		2 (1)
Пробій транзисторів одного плеча Hot-side моста		1 (1)
Дефект пов'язаний з роботою драйвера при відключенні живлення		7
Відмова при паралельній роботі (причина не встановлена).		3
Відсутність регуляції в системі охолодження		3

* - не точні дані

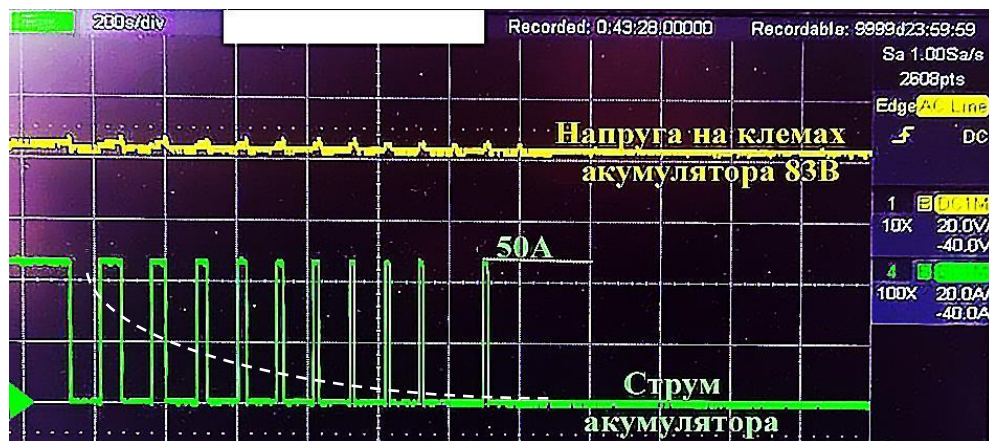


Рис. 2. Осцилограми фінального етапу зарядки акумулятора. Зарядний струму у вигляді імпульсів 50 А в дефектних схемах балансування та експоненціальний струм справних схем – біла пунктирна лінія. Масштаб по горизонталі 200 s/div

Стосовно дефектів в перетворювачах. Дефект №1 пов'язаний з «людським фактором», коли полярність підключення перетворювачів до акумулятора було змінено. В двох випадках, захист від зміни полярності підключення не спрацював. В результаті вийшли з ладу як самі перетворювачі, так і BMS акумуляторів. Після ремонту при паралельній роботі під навантаженням один з акумуляторів повторно вийшов з ладу по невідомій причині.

Дефект №2 ймовірно пов'язаний з некоректною роботою LLC драйвера. Після ремонту при паралельній роботі під навантаженням, даний перетворювач повторно вийшов з ладу по невстановленій причині.

Дефект №3 пов'язаний з некоректною роботою LLC драйвера що проявляється у численних повторних запусках перетворення при вимиканні напруги живлення. Цей процес відбувається з поступовим зниженням амплітуди імпульсів керування (рис. 3) з 12 В до 3 В і до моменту розряду конденсаторів DC шини 311 В. Такий дефект може ввести транзистори (F60U60DN) в лінійний режим роботи і викликати їх перегрів з відповідними наслідками. Цей дефект має короткочасний характер (тривалістю до 4 с) при вимиканні перетворювачів. Проте зайві перехідні процеси можуть спровокувати інші проблеми.

Дефект перетворювачів №4 виник при їх паралельній роботі під навантаженням (по схемі 1S3P). Два з них трьох перетворювачів вже були в ремонті по описаним вище причинам №1 і №2. Причинами відмови не з'ясовані.

Дефект перетворювачів №5 полягає у відсутності керування обертами вентиляторів системи охолодження в залежності від температури радіатора.

Обмеженість виробничого процесу в часі, відсутність тестового і діагностичного обладнання, як і вичерпної технічної документації та service manuals, утруднюють діагностику і випробування бортового електроустаткування перед монтажем і при подальших налаштуваннях. Описані дефекти в роботі акумуляторів і перетворювачів пов'язані як з помилками при складанні (експлуатації обладнання) так і з технічними проблемами, що можуть утворюватися процесами на фізичному і програмному рівнях. Це вимагає прийняття відповідних організаційних та технічних рішень і додаткових витрат. Кожен з перелічених дефектів може призвести до значно вагоміших негативних наслідків, тому вважається за доцільне введення системи контролю якості і діагностики бортового устаткування (енергетичного в особливості), на всіх етапах виробництва а також в процесі експлуатації енергосистеми БНС.

Автоматичний контроль стану акумуляторної батареї БНС є важливою частиною забезпечення надійності та безпеки судна під час його експлуатації. В таких умовах, для контролю параметрів бортової акумуляторної батареї на борту БНС доцільно застосувати спеціалізовану систему автоматичного контролю (рис. 4).

Основні функції системи автоматичного контролю технічного стану акумуляторної батареї:

1) Контроль напруги та струму: Вимірювання напруги та струму акумулятора дозволяє оцінити його заряд та стан. Напруга батареї може дати уявлення про рівень заряду, а струм — про споживану потужність і стан зарядного процесу.

Амплітуда керуючих імпульсів
до вимикання напруги
живлення

Амплітуда керуючих імпульсів
після вимикання живлення.
Момент одного з перезапусків
LLC драйвера



Рис. 3. Осцилограми імпульсів керування транзисторами Hot-side моста.



Рис. 4. Узагальнена структура системи автоматичного контролю технічного стану акумуляторної електроенергетичної системи БНС

2) Температурний контроль: Температура акумуляторів може суттєво вплинути на їх ефективність та довговічність. Висока температура може призвести до перегріву та пошкодження батареї, а низька — до зниження її ємності.

3) Ємність та стан заряду: Контроль рівня заряду дозволяє судну оцінити, скільки часу воно може працювати без підзарядки. Для цього використовуються різні алгоритми, зокрема, методи оцінки залишкового ресурсу акумулятора.

4) Виявлення несправностей: Системи контролю можуть виявляти аномалії у роботі батареї, такі як коротке замикання,

перевантаження чи поганий контакт, що може допомогти уникнути аварій.

5) Комунікація з береговою станцією: Інформація про стан акумулятора повинна передаватися в реальному часі на берегову станцію для контролю та вжиття заходів у разі потреби.

6) Система аварійного відключення: У разі виявлення критичних проблем, таких як значне зниження напруги або температури, система має автоматично відключити акумулятор або увімкнути резервне джерело живлення. Реалізація інших алгоритмів захисту (скидання аварійних секцій, ліквідація пожежі в секції).

Для БНС важливо також забезпечити автономне відновлення заряду через сонячні

панелі чи інші джерела відновлюваної енергії. Це дозволить судну продовжувати свою роботу навіть в разі несправності основної батареї. Тому система керування джерелом зарядного струму має передбачати можливість використання бортових джерел відновлюваної енергії.

Висновки.

1. Застосування електроенергетичних систем на основі акумуляторних джерел живлення пов'язане з необхідністю постійного автоматичного контролю характеристик акумуляторних елементів, BMS, систем перетворення енергії, систем комутації, проведення та ізоляції на всіх етапах виробництва і при експлуатації БНС.

2. Як показав досвід, технічні відмови в енергетичному обладнанні БНС виникають частіше, ніж проблеми виходу з ладу обладнання по причині некваліфікованого поводження. Іменитість бренду (фірми виробника) і висока ціна обладнання не гарантують її відповідності вимогам проекту, впродовж періоду монтажних робіт і наступних етапів життєвого циклу БНС.

3. Надійну роботу акумуляторного джерела БНС можна забезпечити шляхом постійного автоматичного контролю за ключовими параметрами бортового енергетичного устаткування, автоматичної діагностики на всіх етапах виробництва та при експлуатації БНС.

4. Запропонована узагальнена структура системи автоматичного контролю технічного стану акумуляторної електроенергетичної системи БНС, може бути складовою системи автоматичного керування функціонуванням БНС у цілому та забезпечує високі експлуатаційні характеристики судна.

5. Подальші дослідження планується проводити у напрямках розробки алгоритмічного та програмного забезпечення системи автоматичного керування, призначеної для контролю технічного стану акумуляторної електроенергетичної системи БНС.

Література

1. Bai X., Li B., Xu X., Xiao Y. A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Marine Science and Application*. 2022. Vol. 21, No. 2. P. 47–58. DOI:10.1007/s11804-022-00276-9.
2. Bolbot V., Sandru A., Saarniniemi T., Puolakka O., Kujala P. Small Unmanned Surface Vessels—A Review and Critical Analysis of Relations to Safety and Safety Assurance of Larger Autonomous Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 12. Article 2387. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse11122387>.
3. Castano-Londono L., Marrugo Llorente S.P., Paipa-Sanabria E. Evolution of Algorithms and Applications for Unmanned Surface Vehicles in the Context of Small Craft: A Systematic Review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 21. Article 9693. URL: <https://doi.org/10.3390/app14219693>.
4. Zoria Y. More than 13,000 km² of Ukraine's sea and inland waters need demining – Emergency Service. URL: <https://euromaidanpress.com/2023/05/30/more-than-13000-km%C2%B2-of-ukraines-sea-and-inland-waters-need-demining-emergency-service/>.
5. Блінцов В.С., Надточий А.В. Гуманітарне розмінування мілководних акваторій: технології та робототехнічне забезпечення. *Суднобудування та морська інфраструктура*. 2024. №1(18). С. 4–10. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).01](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).01).
6. Multi-Purpose Support Ships. URL: <https://www.damen.com/vessels/defence-and-security/multi-purpose-support-ships>.
7. Nadtochii V., Nadtochii A., Bugrim L. Development of automatic control system of motion of an unmanned surface ships with a sailing installation. *Technology Audit and Production Reserves*. 2019. №5/2 (49). С. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.184643>.
8. Guo W., Wang S., Dun W. The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. *The Open Automation and Control Systems Journal*. 2015. Vol. 7. P. 150–156. URL: <https://scispace.com/pdf/the-design-of-a-control-system-for-an-unmanned-surface-3ni6tcd8nj.pdf>.
9. Er M.J., Ma C., Liu T., Gong H. Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 280. Article 114562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>.
10. Top 5 EV battery chemistries and formats across the world. *Automotive Manufacturing Solutions*. URL: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/top-5-ev-battery-chemistries-and-formats-across-the-world/45901.article>.
11. Fleischmann J. et al. The battery cell component opportunity in Europe and North America. McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-battery-cell-component-opportunity-in-europe-and-north-america>.
12. Bunting A., Vogl S. Battery cell production in Europe: status quo and outlook. Berlin: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, 2024. 7 p. URL: <https://www.ipcei-batteries.eu/fileadmin/Images/accompanying->

[research/publications/2024-05-BZF_Kurzinfo_Marktanalyse_Q2_engl.pdf](https://www.research/publications/2024-05-BZF_Kurzinfo_Marktanalyse_Q2_engl.pdf).

13. Requirements for direct current (DC) power distribution systems for marine and offshore applications. ABS, 2022. 25 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/293-requirements-for-direct-current-\(dc\)-power-distribution-systems-for-marine-and-offshore-applications/293-dc-power-reqts-july22.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/293-requirements-for-direct-current-(dc)-power-distribution-systems-for-marine-and-offshore-applications/293-dc-power-reqts-july22.pdf).
14. Fernandez E.A. Marine Electrical Technology: навчальний посібник. Shroff publishers & distributors pvt. LTD., 2011. 1170 p.
15. Charchalis A. Diagnostic and Measurement System for Marine Engines. WSEAS TRANSACTIONS ON SYSTEMS AND CONTROL. 2020. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.37394/23203.2020.15.36>.
16. Zhang P. et al. Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy. Machines. 2022. Vol. 10, No. 2. Article 72. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10020072>.

References

1. Bai X., Li B., Xu X., Xiao Y. A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles. Journal of Marine Science and Application. 2022. Vol. 21, No. 2. P. 47–58. DOI:10.1007/s11804-022-00276-9.
2. Bolbot V., Sandru A., Saarniniemi T., Puolakka O., Kujala P. Small Unmanned Surface Vessels—A Review and Critical Analysis of Relations to Safety and Safety Assurance of Larger Autonomous Ships. Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, No. 12. Article 2387. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse11122387>.
3. Castano-Londono L., Marrugo Llorente S.P., Paipa-Sanabria E. Evolution of Algorithms and Applications for Unmanned Surface Vehicles in the Context of Small Craft: A Systematic Review. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 21. Article 9693. URL: <https://doi.org/10.3390/app14219693>.
4. Zoria Y. More than 13,000 km² of Ukraine's sea and inland waters need demining – Emergency Service. URL: <https://euromaidanpress.com/2023/05/30/more-than-13000-km%C2%B2-of-ukraines-sea-and-inland-waters-need-demining-emergency-service/>.
5. Blincov V.S., Nadtochij A.V. Ghumanitarne rozminuvannja milkovodnykh akvatorij: tekhnologhiji ta robototekhnichne zabezpechennja. Sudnobuduvannja ta morsjka infrastruktura. 2024. #1(18). S. 4–10. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2024.1\(18\).01](https://doi.org/10.15589/smi2024.1(18).01).
6. Multi-Purpose Support Ships. URL: <https://www.damen.com/vessels/defence-and-security/multi-purpose-support-ships>.
7. Nadtochii V., Nadtochij A., Bugrim L. Development of automatic control system of motion of an

- unmanned surface ships with a sailing installation. Technology Audit and Production Reserves. 2019. #5/2 (49). S. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.184643>.
8. Guo W., Wang S., Dun W. The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. The Open Automation and Control Systems Journal. 2015. Vol. 7. P. 150–156. URL: <https://scispace.com/pdf/the-design-of-a-control-system-for-an-unmanned-surface-3ni6tcd8nj.pdf>.
9. Er M.J., Ma C., Liu T., Gong H. Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. Ocean Engineering. 2023. Vol. 280. Article 114562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>.
10. Top 5 EV battery chemistries and formats across the world. Automotive Manufacturing Solutions. URL: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/top-5-ev-battery-chemistries-and-formats-across-the-world/45901.article>.
11. Fleischmann J. et al. The battery cell component opportunity in Europe and North America. McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-battery-cell-component-opportunity-in-europe-and-north-america>.
12. Bunting A., Vogl S. Battery cell production in Europe: status quo and outlook. Berlin: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, 2024. 7 p. URL: https://www.ipcei-batteries.eu/fileadmin/Images/accompanying-research/publications/2024-05-BZF_Kurzinfo_Marktanalyse_Q2_engl.pdf.
13. Requirements for direct current (DC) power distribution systems for marine and offshore applications. ABS, 2022. 25 p. URL: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/293-requirements-for-direct-current-\(dc\)-power-distribution-systems-for-marine-and-offshore-applications/293-dc-power-reqts-july22.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/293-requirements-for-direct-current-(dc)-power-distribution-systems-for-marine-and-offshore-applications/293-dc-power-reqts-july22.pdf).
14. Fernandez E.A. Marine Electrical Technology: navchalnyj posibnyk. Shroff publishers & distributors pvt. LTD., 2011. 1170 p.
15. Charchalis A. Diagnostic and Measurement System for Marine Engines. WSEAS TRANSACTIONS ON SYSTEMS AND CONTROL. 2020. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.37394/23203.2020.15.36>.
16. Zhang P. et al. Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy. Machines. 2022. Vol. 10, No. 2. Article 72. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10020072>.

Nadtochy A.V., Gordieev B. M. Automation of control of the battery-based electric power system of an uncrewed surface vessel

As a result of the analysis of the current state and current research directions in the field of unmanned surface vessels (UAVs), significant prospects for their creation and practical application for solving a wide range of tasks of domestic organizations in the field of maritime economy, defense, environmental monitoring and humanitarian missions have been demonstrated. It has been established that the relevance of the research is due to the growing need to increase the efficiency, autonomy, reliability and safety of operation of such vessels, especially in conditions of a complex and aggressive marine environment. Particular attention is paid to the need to improve automatic systems for monitoring the technical condition of battery electric power systems, which are a key element in ensuring the reliability of the functioning of UAVs during long-term autonomous missions and operations. A detailed analysis of typical technical defects of lithium-ion batteries used to power the electric power systems of UAVs has been carried out. Among the identified defects were: high internal resistance of battery cells, defects in parallel connections, deep discharge of battery cells, disruption of the balancing circuits of battery management systems (BMS), as well as numerous problems associated with the operation of charging stations and converters. Additionally, malfunctions in the operation of chargers were identified, in particular the absence or incorrect operation of reverse polarity protection systems, defects in the operation of LLC drivers, as well as problems with controlling the cooling system of converters. It was established that a significant number of defects may be associated with an insufficient level of quality control

during production, incorrect operation and the absence of proper diagnostic support. A comprehensive solution is proposed in the form of specialized automatic control systems that allow continuous monitoring of key parameters of battery operation: voltage, current, temperature, state of charge, as well as implementing the functions of operational diagnostics, defect detection and emergency shutdown of equipment in case of critical deviations from the norm. As part of the research, a generalized structure of the system for automatic control of the technical condition of the battery electric power system of the BNS was developed, which is integrated into the general ship control system. The proposed technical solutions allow significantly increasing the reliability and autonomy of the BNS operation, minimizing the risks of emergency situations during operation..

Keywords: *unmanned surface vessel, electric power system, battery, automation, control of technical condition.*

Надточий Анатолій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматики та електроустаткування Херсонського навчально-наукового інституту, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, (Миколаїв), tasman.leh.85@gmail.com

Гордєєв Борис Миколайович – доктор технічних наук, професор кафедри морського приладобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, (Миколаїв), b.gordeev@amiko.ua

Стаття подана 20.11.2024.