

## РАНЖУВАННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ФУНКЦІОНАЛЬНУ НАДІЙНІСТЬ КВАДРОКОПТЕРА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ЙОГО СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

**En**

The article presents the results of the study of internal and external factors influencing the reliability of a quadcopter.

The aim of the research was to develop a ranking method of internal and external factors affecting the reliability of the quadcopter, and to rank them according to the developed method, which takes into account the main sources of failures and influences on the reliability of its automatic control system, and on their basis to develop a rational algorithm of quadcopter's automatic control system.

In the developed ranking method, the value of the statistical estimation of the probability of failure-free operation of each quadcopter component was selected as a ranking criterion.

In the analysis of the reliability of the quadcopter, structural methods of calculating the reliability were chosen, because they give more unbundling into elements and blocks, which is important for finding the characteristics of reliability. The article presents the calculations of reliability indicators for each element, unit and the entire UAV, developed a structural and logical scheme of reliability of the quadcopter.

According to the developed ranking method, the algorithm of operation of the quadcopter automatic control system is designed, which does not exceed the main restrictions associated with the operation of the quadcopter in general, with proper operation of elements, units, systems and equipment, which increases the reliability of automatic control system and UAV in general.

**Ru**

Статья представляет результаты исследования внутренних и внешних факторов влияния на надежность квадрокоптера.

Целью исследования было разработать метод ранжирования внутренних и внешних факторов, влияющих на надежность квадрокоптера, и провести их ранжирование по разработанному методу, где учесть основные источники отказов и воздействий на надежность при разработке его САК, а также на их основе разработать рациональный алгоритм функционирования САК квадрокоптера.

В разработанном методе ранжирования в качестве критерия ранжирования была выбрана величина статистической оценки вероятности безотказной работы каждой составляющей квадрокоптера.

При анализе надежности квадрокоптера были выбраны структурные методы расчета надежности, так как они дают большее разукрупнение на элементы и блоки, что важно для нахождения характеристик надежности. В статье представлены расчеты показателей надежности для каждого элемента,

<sup>1</sup> КПП ім. Ігоря Сікорського

<sup>2</sup> КПП ім. Ігоря Сікорського

блока и всего БПЛА, разработана структурно-логическая схема надежности квадрокоптера.

По разработанному методу ранжирования спроектирован алгоритм функционирования НПК квадрокоптера, который не допускает превышения основных ограничений, связанных с эксплуатацией квадрокоптера в целом при исправной работе элементов, блоков, систем и оборудования, и который позволяет повысить надежность САК и БПЛА в целом.

### **Вступ**

Сучасні технології досягли успіху в сфері розробки безпілотних коптерів, їхнього оснащення та удосконалення характеристик польоту. Важливим і актуальним також є підвищення надійності квадрокоптерів на всіх етапах польоту, що повинно бути враховано вже на етапі їх проектування.

У статті [1] вирішена задача багатокритеріального ранжування варіантів підвищення надійності безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вертолітного типу за рахунок аварійного ланцюга, який забезпечує живлення електроприводу несучого гвинта від акумуляторної батареї (АКБ), а також варіант із системою підзарядки АКБ від електромеханічного приводу у режимі авторотації; найбільш оптимальним є варіант гібридної системи живлення приводу із аварійної ланцюгом живлення від АКБ та системою підзарядки АКБ від авторотації несучого гвинта.

У роботі [2] розроблена математична модель системи автоматичного керування (САК) безпілотного літального апарату у разі втрати здатності продовжувати політ під час відмови одного із двигунів, пропонується алгоритм керування квадрокоптера за шістьма ступенями свободи, заснований на використанні пропорційно-диференціальних регуляторів.

У статті [3] наведено фактори, які необхідно враховувати для прогнозування розвитку передвідмовного стану об'єктів експлуатації повітряного транспорту, використовуються метод розкладання функцій у ряди і метод Монте-Карло; зроблений висновок про можливість виконання розрахунку всіх імовірнісних характеристик для процесу розвитку передвідмовного стану на етапі розробки.

У роботі [4] приведені три методи ранжування відмов елементів системи: а) за критерієм впливу на користувача системи (несуттєвий, незначний, викликає незадоволення, викликає роздратування тощо); б) за передбаченою частотою проявлення відмови (дуже велика, велика, ... тощо); в) за критерієм рейтингу виявлення відмови (достовірна, ймовірна, мало ймовірна, неможлива). Цих методів недостатньо, щоб виявити дію внутрішніх та зовнішніх факторів впливу на надійність об'єкту і визначити основні із них.

У доповіді авторів статті [5] проаналізовано всі відмови квадрокоптера, які призводять до його падіння, і складено повну таблицю їх ранжування за критерієм частоти відмови складових елементів квадрокоптера,

що сформувало основу для подальших розробок. Шляхів удосконалення надійності квадрокоптера та його САК не розглядалось.

До невирішених задач відноситься обґрунтування і ранжування впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на функціональну надійність квадрокоптера на всіх стадіях «життєвого циклу»: проектування, виготовлення і експлуатації, а також врахування цих впливів для підвищення функціональної надійності за рахунок вдосконалення його системи автоматичного керування.

### **Постановка задачі**

Мета дослідження – вдосконалення САК квадрокоптера із точки зору підвищення його функціональної надійності, розробка методу ранжування внутрішніх і зовнішніх факторів, що впливають на функціональну надійність квадрокоптера, врахування основних джерел відмов та впливів на надійність під час розробки його САК і на їх основі спроектувати алгоритм функціонування САК квадрокоптера у цілому шляхом використання *програмного* резервування за розробленим алгоритмом та підбору більш якісних із точки зору надійності елементів САК.

### **Метод ранжування факторів впливу на надійність квадрокоптера**

Для досягнення мети було розроблено метод ранжування внутрішніх і зовнішніх факторів впливу на надійність квадрокоптера, що дало змогу визначити шляхи та засоби підвищення надійності квадрокоптера й вдосконалити його САК за рахунок зменшення визначених основних впливів шляхом підбору більш якісних із точки зору надійності елементів і пристроїв САК квадрокоптера, розробки алгоритму функціонування САК квадрокоптера підвищеної надійності та використання *програмного* резервування за розробленим алгоритмом. За основний критерій ранжування прийнята статистична оцінка ймовірності безвідмовної роботи кожної складової квадрокоптера.

Ранжування факторів впливу на надійність квадрокоптера, що проведено за розробленим методом, наведено у табл. 1.

На основі даних, отриманих з таблиці ранжування, розроблено блок-схему алгоритму для автоматичного керування БПЛА.

Головною властивістю надійності об'єкта є те, що надійність закладається під час проектування і виготовлення, а проявляється під час його експлуатації. Методи підвищення надійності літальних апаратів (ЛА) можна умовно поділити на:

**П р и л а д и т а м е т о д и к о н т р о л ю**

1. удосконалення складових елементів і блоків об'єкта під час *тимчасового зняття його з експлуатації* для профілактичного огляду за рахунок ремонту, заміни, підрегулювання, підналаштування тощо;
2. використання резервування складових ЛА *під час експлуатації*.

Основними видами резервування під час експлуатації об'єкта, у нашому випадку – під час польоту квадрокоптера, є структурне, функціональне, програмне і часове резервування. У даній роботі для удосконалення САК квадрокоптера використовується *програмне* резервування, коли для продовження роботи САК після тої чи іншої відмови складових елементів квадрокоптера використовується спеціальні додаткові обчислювальні програми.

Оскільки, у даній роботі виконувалась розробка алгоритму для підвищення надійності вдосконаленням системи автоматичного керування квадрокоптера шляхом *програмного* резервування, дані про механічні пошкодження (перенавантаження рами тощо) не враховувалися, тому що вдосконаленням САК їх ліквідувати або зменшити неможливо.

**Таблиця 1.**

Ранжування факторів впливу на надійність квадрокоптера

<b>Відмови</b>	<b>Кількість відмов</b>	<b>Причини відмов</b>	<b>Надійність</b>
Відмова гвинтомоторної групи	130 99 52	Високі оберти Вади (тріщини, надколи) Перегрів двигуна	$\frac{281}{1000} = 0,281$
Відмова акумулятора	198	Різка падіння напруги, нестабільна напруга, підвищення напруги	$\frac{198}{1000} = 0,198$
Перенавантаження рами	63 18	Перенавантаження Виліт променів з місця посадки	$\frac{81}{1000} = 0,081$
Відмова апаратури радіо керування	60	Перешкоди передачі сигналу	$\frac{60}{1000} = 0,060$
Відмова бортового комп'ютера	28 10 3	Збій програмного забезпечення Замикання Не справні елементи плати	$\frac{41}{1000} = 0,041$

За результатами аналізу надійності запропонованим методом ранжування виявлено, що основними причинами падіння квадрокоптера через відмову складових є:

1. Відмова двигуна або його системи, внаслідок чого відбувається неконтрольоване падіння квадрокоптера на землю;
2. Збій бортової системи керування (обчислювач, вимірювач швидкості і кута зносу, радіовисотомір малих висот) квадрокоптера, наслідком чого є невиконання польотного завдання (відхилення від заданого колійного кута, порушення просторового і часового проходження проміжних пунктів маршруту, відхилення від заданої висоти польоту тощо) і посадка квадрокоптера у нерозрахованому районі, що може призвести до часткового (або повного) руйнування квадрокоптера.
3. Перевищення основних обмежень для квадрокоптера, пов'язаних, в основному, із льотною експлуатацією квадрокоптера в умовах сильної турбулентності атмосфери, а також у режимі польоту обгинання гірського складного пересічного рельєфу місцевості.
4. Некоректний облік комплексу випадкових факторів, що впливають на практичну дальність польоту, під час проведення розрахунку дальності і тривалості польоту.
5. Некоректний облік факторів, що впливають на безпеку маневрів у вертикальній площині у разі обгинання БПЛА рельєфу місцевості або штучних споруд.

У результаті аналізу результатів ранжування для підвищення надійності САК квадрокоптера були застосовані такі шляхи вдосконалення:

1. Резервування контуру управління БПЛА.
2. Використання додаткового алгоритму функціонування САК квадрокоптера.
3. Облік комплексу випадкових факторів, що впливають на практичну дальність польоту, при проведенні розрахунків дальності і тривалості польоту.
4. Облік факторів, що впливають на безпеку маневрів у вертикальній площині при обгинанні БПЛА рельєфу місцевості або штучних споруд, при визначенні безпечної висоти польоту.

### **Розробка алгоритму функціонування САК квадрокоптера**

Повний алгоритм функціонування САК квадрокоптера підвищеної надійності, блок-схема якого представлена на рис. 1, не допускає перевищення основних обмежень, пов'язаних із експлуатацією квадрокоптера в цілому, під час справної роботи елементів, блоків, систем і устаткування. Використання цього алгоритму у САК із точки зору підвищення надійності, представляє собою *програмне резервування*.

Алгоритм побудований на основі складеної таблиці ранжування факторів надійності та складається із наступних кроків:

1. завантаження координат маршруту у систему;

***П р и л а д и т а м е т о д и к о н т р о л ю***

2. перетворення координат маршруту до системи координат, пов'язаній із БПЛА;
3. поворот БПЛА у напрямку обраних координат руху;
4. розрахунок відстані до визначеної точки; протягом польоту польотний контролер записує значення сигналів керування із періодом 20 мс.;
5. розпізнавання перешкод та побудова обхідного маршруту у разі їх виявлення;
6. переміщення до визначеної точки;
7. якщо виявлені несправності у будь-якій гвинтомоторній групі (ГМГ), використовується алгоритм переходу квадрокоптера на модель бікоптер;
8. у разі виявлення несправності в акумуляторній батареї використовується алгоритм несправної роботи акумулятора:
  - якщо акумуляторна батарея починає працювати нестабільно (нестабільна напруга, різке підвищення або падіння напруги), на пульт керування відправляється останній записаний сигнал;
  - у разі повної відмови акумулятора відбувається посадка квадрокоптера, для того щоб запобігти падіння;
9. перевірка на втрату радіосигналу: якщо квадрокоптер втратив сигнал, використовується алгоритм повернення БПЛА на крок назад, якщо сигнал присутній, алгоритм продовжує працювати далі;
10. перевірка координації квадрокоптера у просторі;
11. аналіз на виявлення проблем із бортовим комп'ютером квадрокоптера: якщо проблеми виявлені то вмикається алгоритм посадки квадрокоптера;
12. проводиться аналіз на виявлення проблем із інерційно-вимірювальним модулем: якщо проблеми виявлені, то вмикається алгоритм посадки квадрокоптера;
13. проводиться аналіз на виявлення проблем із навігаційною системою місцеположення, якщо проблеми виявлені, то вмикається алгоритм посадки квадрокоптера;
14. вибір наступних координат маршруту, якщо вони присутні та повторення кроків 3-6, у іншому випадку – кінець польоту (посадка квадрокоптера).
15. перевірка кожної гвинтомоторної групи на коректність роботи;
16. у випадку відмови однієї, або двох ГМГ, відбувається перебудова БПЛА з квадрокоптера в бікоптер, що дає змогу запобігти падіння;
17. сигнал переданий з передавача на приймач у приймачі розділяється по каналам і потрапляє на вхід польотного контролера, де перетворюється у цифровий сигнал;

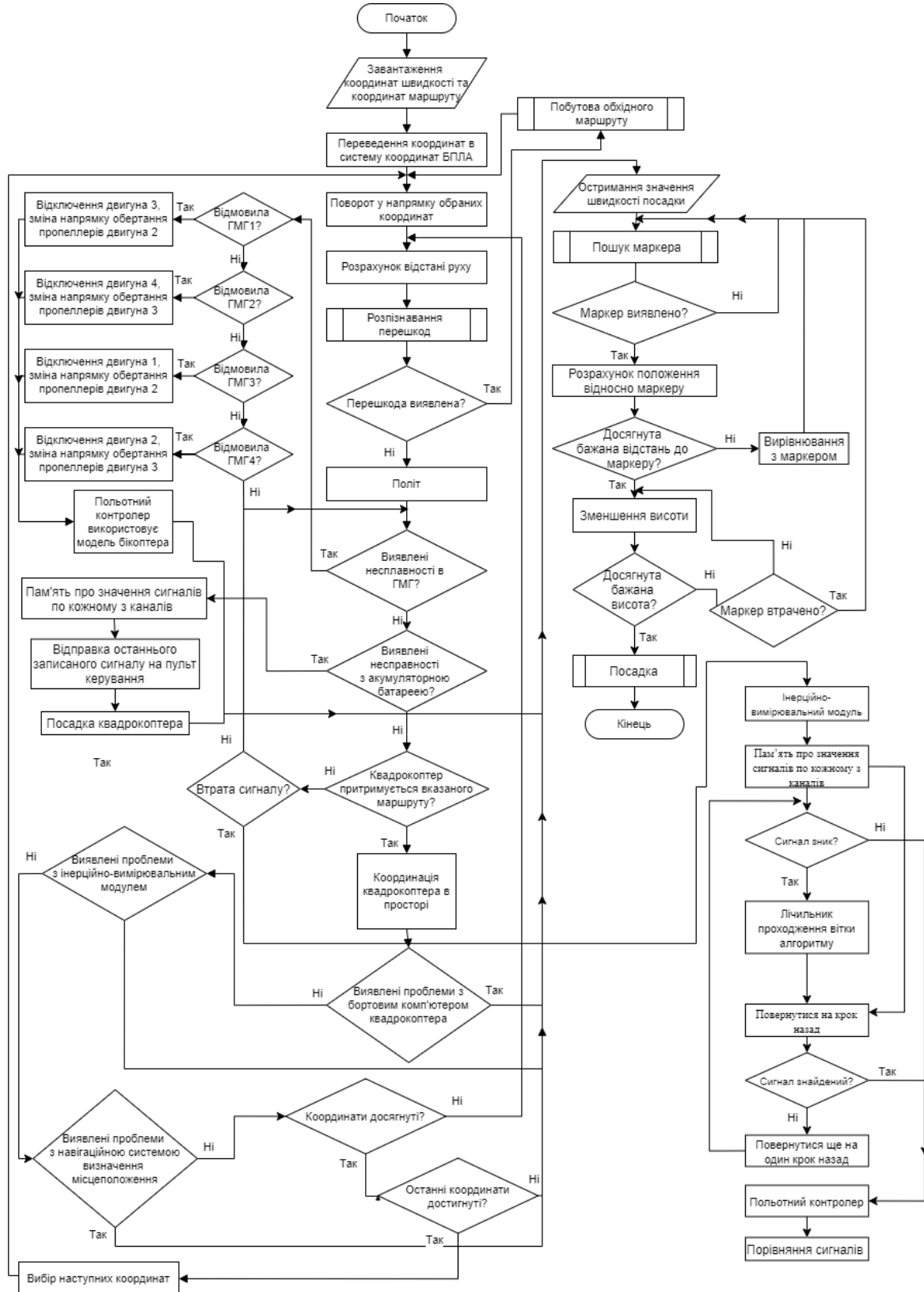


Рис. 1. Блок-схема алгоритму автономного польоту БПЛА

18. польотний контролер порівнює отримані дані: вважається, що якщо значення по всім каналам не нульові, ланка передавач-приймач не

відмовила, і тоді поточні значення по каналам крену  $\gamma_{zi}(t)$ , тангажу  $\theta_{zi}(t)$ , рискання  $\psi_{zi}(t)$ , тяги  $R_{zi}(t)$  вважаються достовірними, і використовуються для завдання керуючих сигналів в САУ квадрокоптера;

19. якщо виконується система рівнянь (1), сигнал із інформацією по каналам крену, рискання, тангажу, тяги, переданий із ланки передавач-приймач і оцифрований у польотному контролері, вважається втраченим, відбувається повернення квадрокоптера у площину передачі сигналу оператором по попередньо переданим і записаними у пам'ять значенням сигналів по кожному із каналів (2);
20. виконується перевірка сигналу з приймача на предмет виконання системи рівнянь (1): якщо система виконується, то квадрокоптер ще на один крок повертається назад;
21. якщо умова відновлення сигналу вважається виконаною (система рівнянь (3)), цикл закінчується.

$$\begin{cases} \gamma_{zi}(t) = 0; \\ \psi_{zi}(t) = 0; \\ \theta_{zi}(t) = 0; \\ R_{zi}(t) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$-\gamma_{zi-n}(t-n\Delta T), -\psi_{zi-n}(t-n\Delta T), -\theta_{zi-n}(t-n\Delta T), R_{zi-n}(t-n\Delta T), \quad (2)$$

де  $n$  — кількість проходжень вітки алгоритму,  $T$  — період надходження керуючого сигналу,  $T = 20$  мс.

$$\begin{cases} \gamma_{zi}(t) \neq 0; \\ \psi_{zi}(t) \neq 0; \\ \theta_{zi}(t) \neq 0; \\ R_{zi}(t) \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$

22. визначення швидкості посадки;
23. пошук та захоплення маркера посадки;
24. обчислення координат маркера посадки відносно квадрокоптера та відстані до нього;
25. вирівнювання положення квадрокоптера над маркером;
26. ітеративний спуск з верифікацією маркера посадки.

За блок-схемою повного алгоритму функціонування автопілота квадрокоптера підвищеної надійності у подальшій роботі буде розроблена програма, яка вдосконалює САК квадрокоптера і покращує безвідмовність її функціонування. Використання розробленої програми під час експлуатації квадрокоптера фактично реалізує *програмне* резервування за відмови



елементів, блоків і САК квадрокоптера, що викликані впливом внутрішніх і зовнішніх факторів.

### Аналіз надійності БПЛА із вдосконаленою САК

Для аналізу надійності квадрокоптера із вдосконаленою САК були обрані структурні методи розрахунку надійності [7], оскільки вони є основними методами розрахунку показників надійності у процесі проектування об'єктів, що піддаються розукрупненню на елементи, характеристики надійності яких у момент проведення розрахунків відомі або можуть бути визначені іншими методами.

Були обрані структурні методи розрахунку надійності оскільки вони є основними методами розрахунку показників надійності в процесі проектування об'єктів, що піддаються розукрупненню на елементи, характеристики надійності яких в момент проведення розрахунків відомі або можуть бути визначені іншими методами. Кількісні показники надійності визначаються за формулами:  $f(t) = \frac{dq(t)}{dt}$ ,  $f(\Delta t_i) = \frac{\Delta n(\Delta t_i)}{N_0 \cdot \Delta t_i}$ ,  $p(t) = e^{-0,0004t}$ ,

$q(t) = 1 - e^{-0,0004t}$ , де  $f(t)$  – щільність розподілу відмов;  $p(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи (ІБР);  $q(t)$  – ймовірність відмов; 0,004 – розраховане значення інтенсивності відмов квадрокоптера;  $t$  – наробіток об'єкта;  $\Delta n$  – кількість відмов у інтервалі наробітку  $\Delta t_i$ ;  $N_0$  – загальна кількість складових елементів, блоків об'єкта дослідження. Оцінка ІБР САК без резервування

$$P_c(40) = 0,829.$$

Структурна логічна схема надійності квадрокоптера із вдосконаленою САК має змішану структуру (містить послідовні і паралельні зв'язки). У разі відмови одного із послідовно з'єднаних елементів відбувається відмова всієї системи, а паралельне з'єднання елементів представляє собою резервування [7].

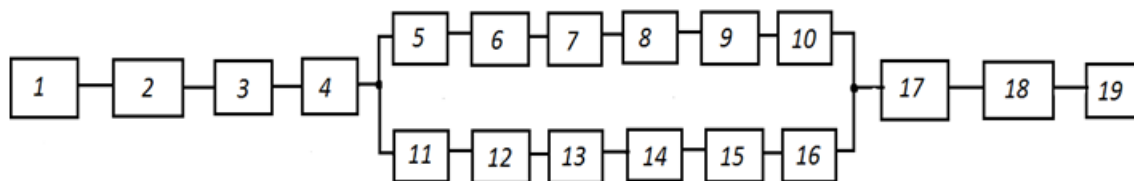


Рис. 2. Структурна логічна схема надійності квадрокоптера

На рис. 2 позначено: 1 – пульт керування, 2 – передавач, 3 – приймач, 4 – польотний контролер, 5 – регулятор обертів безколекторного двигуна (РОБД) 1, 6 – двигун 1, 7 – пропелер 1, 8 – РОБД3, 9 – двигун 3, 10 – пропелер 3, 11 – РОБД2, 12 – двигун 2, 13 – пропелер 2, 14 – РОБД4, 15 – дви-

гун 4, 16 – пропелер 4, 17 – навігаційна система визначення місцеположення, 18 – тривісний акселерометр, 19 – тривісний гіроскоп.

Статистичну оцінку ймовірності безвідмовної роботи квадрокоптера можна знайти за формулою:

$$p_c(t) = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot (1 - (1 - p_5) \cdot (1 - p_6) \cdot (1 - p_7) \cdot (1 - p_8) \cdot (1 - p_9) \times \\ \times (1 - p_{10}) \cdot (1 - p_{11}) \cdot (1 - p_{12}) \cdot (1 - p_{13}) \cdot (1 - p_{14}) \cdot (1 - p_{15}) \cdot (1 - p_{16})) \cdot p_{17} \cdot p_{18} \cdot p_{19}.$$

За розробленою структурно-логічною схемою надійності квадрокоптера проведений аналіз надійності квадрокоптера із вдосконаленою САК структурними методами розрахунку надійності, які дають більше розукрупнення на елементи і блоки, що важливо для знаходження характеристик надійності, а також представлені розрахунки показників надійності для кожного елементу, блоку, САК та всього БПЛА.

Математична модель розрахунку ІБР квадрокоптера

$$p_c(t) = (e^{-0.0002t})(e^{-0.0002t})(e^{-0.0003t}) \times [1 - (1 - (e^{-0.0002t})) \times (1 - (e^{-\frac{t^2}{100000}}))] \times \\ (1 - (e^{-0.0004t})) \\ \times (1 - (e^{-0.0002t})) \left( 1 - \left( e^{-\frac{t^2}{100000}} \right) \right) (1 - (e^{-0.0004t})) (1 - (e^{-0.0002t})) \\ \times \\ \times (1 - (e^{-\frac{t^2}{100000}})) (1 - (e^{-0.0004t})) (1 - (e^{-0.0002t})) (1 - (e^{-\frac{t^2}{100000}})) (1 - (e^{-0.0004t}))].$$

Оцінка ІБР САК, у якій використано програмне резервування  $p_c = 0,972$ .

Таким чином, введення додаткової обчислювальної програми підвищить надійність САК у 1,17 раз.

## **Висновки**

Розроблений метод ранжування факторів впливу на надійність квадрокоптера та його САК за критерієм величини статистичної оцінки ймовірності безвідмовної роботи кожної складової квадрокоптера, проведено ранжування за розробленим методом, аналіз якого дав змогу виявити слабкі місця.

За розробленим методом ранжування спроектований алгоритм *додаткової обчислювальної програми* функціонування САК квадрокоптера, що представляє собою програмне резервування із точки зору підвищення функціональної надійності. Алгоритм не допускає перевищення основних обмежень, пов'язаних із експлуатацією квадрокоптера у цілому, у разі справної роботи елементів, блоків, систем і устаткування.

Використання додаткової обчислювальної програми у САК квадрокоптера за представленим алгоритмом дозволило підвищити функціональну надійність САК квадрокоптера і БПЛА у цілому у 1,17 раз.

**Список використаної літератури**

1. *Петров В. Ф., Барунин А. А., Терентьев А. И.* Модель системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 12-2. С. 217–225.
2. *Иванов Д. А., Коробейников И. С., Альжев А. В.* Повышение надежности и безопасности беспилотного летательного аппарата вертолетного типа с электрическим приводом несущего винта // Труды международного симпозиума надежность и качество. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2017. – Том 1. – С. 120-122. – ISSN: 2220-6418.
3. *Затучный Д. А.* К вопросу о прогнозировании предотказового состояния объекта эксплуатации воздушного транспорта // Труды международного симпозиума надежность и качество. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2017. - Том 1. - С. 35-37. - ISSN: 2220-6418.
4. Establishment of models and data tracking for small UAV reliability // «Automatic Control of a Quadcopter, AR. Drone, using a Smart Glove». 2017. – 248 с. <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/1157>.
5. *Nechyporenko O., Burenin A.* Ranking of the factors influencing the reliability of the quadcopter // Тези доповідей учасників XII міжнародної конференції студентів та молодих вчених 11 квітня 2019 р. «Інтелект, Інтеграція, Надійність». Київ-Варшава. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2019. – С. 70-73. <https://skla.kpi.ua/ua/publications/materials-of-conferences?download=363:khii-mizhnarodna-konferentsiia-studentiv-ta-molodykh-vchenykh-intelligence-integration-reliability-2019>.
6. *Нечипоренко О. М.* Основи надійності літальних апаратів. Навчальний посібник з грифом МОН. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 240 с. – Бібліогр.: с. 235-239. – ISBN 978-966-622-502-6.

**Spysok vykorystanoi literatury**

1. *Petrov V. F., Barunyn A. A., Terentev A. Y.* Model systemy avtomatycheskoho upravleniya bespylotnym letatelnyim apparatom // Yzvestyia Tuls'koho hosudarstvennoho unyversyteta. Tekhnicheskiye nauky. 2014. № 12-2. S. 217–225.
2. *Ivanov D. A., Korobeinikov Y. S., Alzhev A. V.* Povyshenie nadezhnosti i bezopasnosti bespylotnoho letatelnoho apparata vertoletnoho tipa s elektrycheskym privodom nesushcheho vinta // Trudy mezhdunarodnoho sympoziuma nadezhnost i kachestvo. – Penza: Penzenskiyi hosudarstvennyi universitet, 2017. – Tom 1. – S. 120-122. – ISSN: 2220-6418.
3. *Zatuchnyi D. A.* K voprosu o prohnozyrovanyu predotkazovoho sostoyaniya obekta ekspluatatsyi vozdushnoho transporta // Trudy mezhdunarodnoho

- simpoziuma nadezhnost i kachestvo. – Penza: Penzenskiy hosudarstvennyy universitet, 2017. – Tom 1. – S. 35-37. – ISSN: 2220-6418.
4. Establishment of models and data tracking for small UAV reliability // «Automatic Control of a Quadcopter, AR. Drone, using a Smart Glove». 2017. – 248 s. <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/1157>.
  5. *Nechyporenko O.*, Burenin A. Ranking of the factors influencing the reliability of the quadcopter // Tezy dopovidey uchasnykiv XII mizhnarodnoyi konferentsiyi studentiv ta molodykh vchenykh 11 kvitnya 2019 r. «Intelekt, Intehratsiya, Nadiynist'». Kyyiv-Varshava. – K.: IVTS “Vydavnytstvo «Politekhnik»”, 2019. – С. 70-73. <https://skla.kpi.ua/ua/publications/materials-of-conferences?download=363:khii-mizhnarodna-konferentsiia-studentiv-ta-molodykh-vchenykh-intelligence-integration-reliability-2019> .
  6. *Nechyporenko O. M.* Osnovy nadiinosti litalnykh aparativ. Navchalnyi posibnyk z hryfom MON. – K.: NTUU «KPI», 2010. – 240 s. - Bib-liohr.: s. 235-239. – ISBN 978-966-622-502-6.