

Г. В. ФЕСЕНКО, В. С. ХАРЧЕНКО

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ УГРУПОВАНЬ ФЛОТІВ БПЛА З КОВЗНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Протягом останніх років безпілотні літальні апарати використовуються для вирішення завдань до- і післяаварійного моніторингу атомних електростанцій та інших потенційно небезпечних об'єктів. Використання флоту (угруповання флотів) безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для вирішення завдань моніторингу пов'язано з особливими умовами агресивного навколишнього середовища, яке спричиняє відмови окремих БПЛА, отже потребує забезпечення високого рівня надійності такого флоту (угруповання). Найбільш ефективним способом вирішення цієї задачі є застосування ковзного резервування. Предметом дослідження є угруповання флотів БПЛА з ковзним резервуванням. З метою врахування надійності пункту управління для різних варіантів організації угруповань БПЛА, доцільно сформулювати наступні задачі: проаналізувати різні структури угруповань флотів БПЛА з урахуванням схеми активації резервних БПЛА; розробити та дослідити моделі надійності угруповань флотів БПЛА з централізованою, децентралізованою і змішаною схемою активації резервних БПЛА з можливістю резервування пунктів управління; сформулювати рекомендації щодо вибору схеми активації резервних БПЛА. Результати досліджень: запропоновано структуру угруповання флотів БПЛА з дворівневим ковзним резервуванням (на рівнях флотів та їх угруповання – з використанням резервного флоту) і різними варіантами організації пунктів управління. Досліджено централізовану, децентралізовану та частково децентралізовану структури активації резервних БПЛА угруповання флотів з резервним (резервними флотами), а саме: побудовано структурні схеми надійності цих систем; отримано аналітичні вирази для обчислення імовірності безвідмовної роботи угруповання флотів БПЛА на основі кожної з цих схем; отримано та досліджено залежності: імовірності безвідмовної роботи угруповання флотів БПЛА з різними значеннями імовірності безвідмовної роботи БПЛА від кількості основних флотів у разі використання резервного флоту з трьома БПЛА; імовірності безвідмовної роботи угруповання флотів БПЛА з різними схемами активації резервних БПЛА від кількості основних флотів у разі використання резервного флоту з трьома БПЛА. Розроблення та дослідження моделей надійності надало можливість сформулювати задачі щодо вибору схемами активації резервних БПЛА та відповідні рекомендації щодо організації угруповань. Подальші дослідження доцільно зосередити на розробленні програмного забезпечення для підтримки прийняття рішень щодо вибору варіантів структур і урахування можливих схем організації підльоту резервних БПЛА до зон відповідальності.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; угруповання флотів; резервний флот; надійність; ковзне резервування; пункт управління; схеми активації резервних БПЛА.

1. Проблеми забезпечення надійності флотів БПЛА

1.1. Функції та проблеми забезпечення надійності флотів БПЛА

Протягом останніх років безпілотні літальні апарати (БПЛА) (які також називають дронами) використовуються для вирішення завдань до- і післяаварійного моніторингу атомних електростанцій (АЕС) та інших потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) [1-3]:

– відеонагляду для забезпечення фізичної безпеки АЕС (ПНО);

– визначення ступеня пошкодження елементів інфраструктури АЕС (ПНО);

– пошуку постраждалих та забезпечення їх продуктами, медикаментами та засобами захисту;

– виконання функцій стаціонарних постів контролю і визначення рівня радіаційного (хімічного або інших видів) забруднення навколишнього середовища;

– створення карт радіаційного (хімічного або інших видів) забруднення території навколо АЕС (ПНО);

– створення додаткових бездротових каналів передачі інформації від стаціонарних датчиків системи післяаварійного моніторингу та автоматизова-

ної системи контролю радіаційної обстановки до кризового центру з використанням Wi-Fi та Li-Fi технологій;

– підвищення ефективності прийняття управлінських рішень щодо реагування на аварію шляхом організація доступу до моніторингової інформації групи зовнішніх експертів з використання технології Інтернету дронів.

Використання флоту (угруповання флотів) БПЛА для вирішення завдань моніторингу пов'язано з особливими умовами агресивного навколишнього середовища, яке спричиняє відмови окремих БПЛА, отже потребує забезпечення високого рівня надійності такого флоту (угруповання). Найбільш ефективним способом вирішення цієї задачі є застосування ковзного резервування (його називають також резервуванням типу *k-out-of-n* [4]), коли група основних елементів резервується одним чи декількома резервними елементами, кожний з яких може замінити будь-який з основних елементів у випадку відмови [5].

Таким чином, БПЛА повинні бути поділені на основні (резервовані) та резервні БПЛА. У разі необхідності забезпечити ще більший рівень надійності угруповання флотів може додатково до існуючих резервних БПЛА залучати резервний флот, БПЛА якого також використовуються для заміни основних БПЛА у разі їх відмови. Організація активації резервного БПЛА покладається на наземний або повітряний пункт управління (ПУ).

Таким чином існує проблема забезпечення надійності флотів БПЛА та їх угруповань (УФБ) під час виконання ними завдань з моніторингу в умовах впливу небезпечних факторів радіаційної (хімічної) аварії з урахуванням схеми активації резервних БПЛА (САРБ) пунктом (пунктами) управління.

1.2. Аналіз методів оцінювання й забезпечення надійності флотів та угруповань флотів БПЛА

Детальний аналіз меж доцільності використання навантаженого резерву (резерву, що містить один чи декілька резервних елементів, які перебувають у режимі основного елемента) та ненавантаженого резерву (резерву, що складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у ненавантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента) для систем з ковзним резервуванням запропоновано у [6]. У [7] представлено нові моделі надійності для систем *k-out-of-n* з використанням структурованого безперервного ланцюга Маркова. Запропоновані результати аналізу та стратегії вибору резерву доцільно використовувати під час визначення структури флоту БПЛА.

У [8] запропоновано модель аналізу надійності системи з ковзним резервуванням, яка складається з n компонентів, класифікованих на дві групи у відповідності до своєї ваги та надійності. Ця система є працездатною, якщо загальна вага всіх робочих компонентів перевищує попередньо визначений поріг. Таку модель використано під час оцінювання надійності флоту (угруповання флотів), що складається з неоднорідних БПЛА.

У [9] розглянуто різні визначення багаторівневих систем з ковзним резервуванням та показана можливість використання алгебраїчного методу для вивчення їх надійності. Результати досліджень багаторівневої системи з ковзним резервуванням та різними вимогами щодо кількості працюючих елементів для кожного з цих рівнів подано у [10]. Серед результатів виокремлено новий аналітичний метод, заснований на діаграмах багатозначності прийняття рішень для аналізу надійності багаторівневих систем з ковзним резервуванням.

Результати, отримані авторами [9] та [10], можуть бути використано для оцінювання надійності флотів багатофункціональних БПЛА з передбачуваною деградацією функцій.

Структура системи з ковзним резервуванням, яка може бути взята за базову під час розгляду угруповання флотів БПЛА, запропонована видатним вченим у галузі надійності І. О. Ушаковим у [11].

Оскільки як флоти так і УФБ можуть мати різні варіанти побудови та способи резервування, у [12] представлено матрицю атрибутів оцінки надійності флотів.

1.3. Постановка задачі

Виходячи з результатів досліджень [12, 13] і зважаючи на необхідність врахування надійності ПУ для різних варіантів організації угруповань БПЛА, доцільно сформулювати наступні задачі:

- проаналізувати різні структури УФБ з урахуванням САРБ;
- розробити та дослідити моделі надійності УФБ з централізованою, децентралізованою і змішаною САРБ з можливістю резервування пунктів управління;
- сформулювати рекомендації щодо вибору САРБ.

Статтю структуровано наступним чином: у другому розділі систематизуються варіанти структур УФБ, формулюються принципи розроблення моделей надійності, відповідні обмеження та припущення, надається опис моделей для різних варіантів; третій розділ присвячується дослідженню моделей і розробленню варіантів задач щодо вибору структур і САРБ. Останній розділ підсумовує ре-

зультати і окреслює напрями подальших досліджень щодо надійності флотів і угруповань БПЛА з відношенням.

2. Моделі надійності угруповання флотів БПЛА

2.1. Загальна структура УФБ

Розглянемо УФБ, яке використовується для моніторингу території АЕС і складається з n основних (ОФБ) та ρ резервних (РФБ) флотів БПЛА. Кожен ОФБ складається з БПЛА, серед яких k БПЛА є основними, а $\omega - k$ – резервними. Кожен РФБ має у своєму складі g БПЛА.

2.2. Припущення та обмеження

Для УФБ, що розглядається, прийняті наступні припущення та обмеження:

1. Кожен з основних флотів БПЛА та їх угруповання в цілому не підлягають відновленню.
2. Кожен з БПЛА може перебувати тільки у працездатному та непрацездатному стані.
3. Відмови БПЛА є незалежними.
4. Кожен з основних флотів та їх угруповання в цілому використовує ковзне резервування.
5. Заміна непрацездатних БПЛА будь-якого основного флоту виконується тільки у разі його відмови за рахунок БПЛА резервного флоту.
6. Активація резервного БПЛА під час реалізації ковзного резервування здійснюється відповідним ПУ миттєво.
7. Усі БПЛА угруповання є ідентичними.

2.3. Розробка структурних схем надійності УФБ для різних схем активації резервних БПЛА пунктом (пунктами) управління

Розглянемо наступні САРБ:

1. Централізована схема, яка передбачає активацію резервних БПЛА для заміни непрацездатних БПЛА як в межах ОФБ, так і в межах УФБ одним пунктом управління (ПУ1).

Варіанти структурних схем надійності (ССН) з реалізацією цієї схеми для УФБ з одним РФБ ($\rho = 1$) показано для нерезервованого (рис. 1) та резервованого (рис. 2) ПУ1.

Варіант централізованої схеми, яка передбачає призначення по одному РФБ на кожну групу основних флотів (ГОФБ) ($\rho > 1$) наведена на рис. 3.

2. Децентралізована схема, яка передбачає активацію резервних БПЛА в межах ОФБ за рахунок власного ПУ2. ПУ1 використовується лише у разі відмови одного із ОФБ. ССН, що ілюструє таку схему активації запропонована на рис. 4.

3. Частково децентралізована схема. Її прикладом є схема, яка передбачає що m ОФБ мають свій власний ПУ2, а n ОФБ обслуговуються ПУ1. ССН для випадку, коли $m = 1$ наведена на рис. 5.

На рис. 1, 3, 5 застосовані наступні позначення:

ОФБ1, ОФБ2, ..., ОФБ n – основні флоти БПЛА;

ПУ1 – пункт управління основного флоту БПЛА;

ПУ2 – пункт управління основного флоту БПЛА (застосовується тільки для рис. 5);

РФБ – резервний флот БПЛА;

d_1, d_2, \dots, d_k – основні БПЛА основного флоту;

$d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_\omega$ – резервні БПЛА основного флоту;

d_1, d_2, \dots, d_r – БПЛА резервного флоту.

На рис. 5 застосовані наступні позначення:

ГОФБ1, ГОФБ2, ..., ГОФБ r – групи основних флотів БПЛА;

РФБ1, РФБ2, ..., РФБ r – резервні флоти БПЛА;

ОФБ ij – i -й основний флот j -ї групи флотів, який має структуру, ідентичну до флотів ОФБ1, ОФБ2, ..., ОФБ n , де $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, \rho$;

d_1, d_2, \dots, d_{rj} – БПЛА j -го резервного флоту, де $j = 1, \dots, \rho$.

2.4. Математичний апарат і базові залежності для обчислення імовірності безвідмовної роботи УФБ

Використовуючи розроблені вище ССН, виведемо формули для розрахунку імовірності безвідмовної роботи для кожного з УФБ.

Формули, отримані з використанням ССН, зображених на рис. 1, 2, 4 для наочності доцільно подати у вигляді таблиці 1, у якій параметри мають наступні значення:

$F(k, \omega)$ – імовірність безвідмовної роботи одного ОФБ;

$P(n, k, \omega, 0)$ – імовірність безвідмовної роботи УФБ для випадку відсутності БПЛА у складі РФБ;

$R(n, k, \omega)$ – імовірність знаходження УФБ у стані, коли відмова одного з флотів усунута за рахунок БПЛА зі складу РФБ;

$P(n, k, \omega, 1)$ – імовірність безвідмовної роботи УФБ за наявності одного БПЛА у складі РФБ;

$P(n, k, \omega, 2)$ – імовірність безвідмовної роботи УФБ за наявності двох БПЛА у складі РФБ;

$P(n, k, \omega, r)$ – імовірність безвідмовної роботи УФБ за наявності r БПЛА у складі РФБ;

p_d – імовірність безвідмовної роботи БПЛА;

$p_{пу1}$ – імовірність безвідмовної роботи ПУ1;

$p_{пу2}$ – імовірність безвідмовної роботи ПУ2.

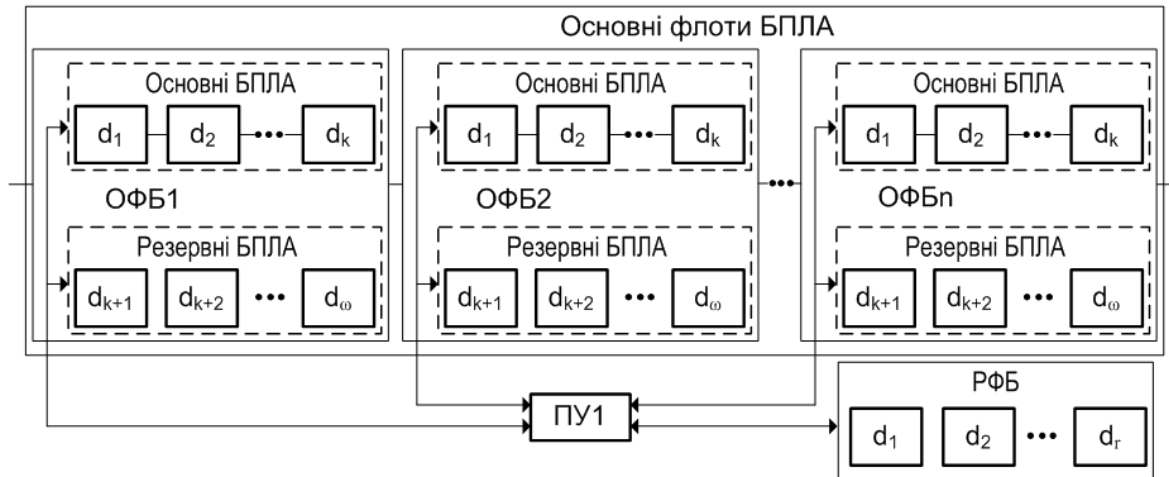


Рис. 1. ССН для УФБ з централізованою САРБ та нерезервованим ПУ

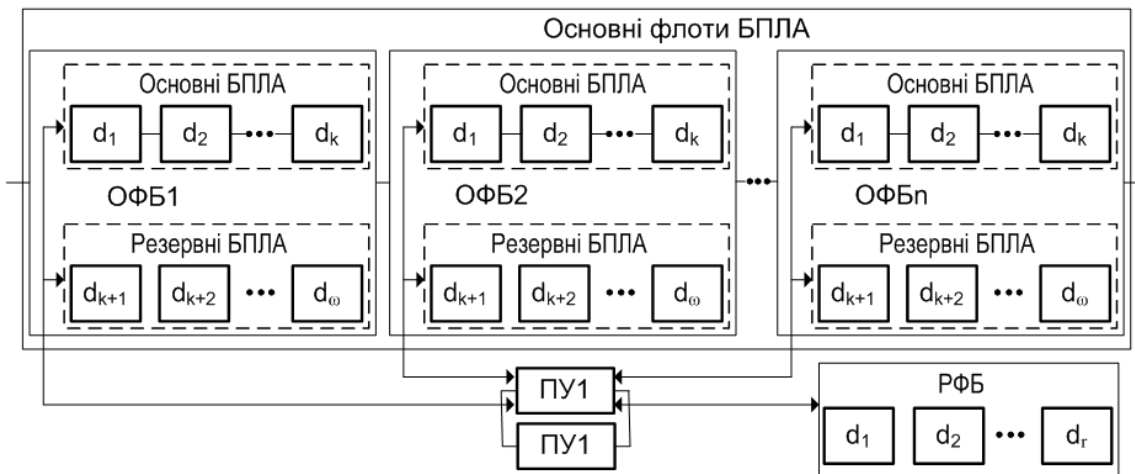


Рис. 2. ССН для УФБ з централізованою САРБ та резервованим ПУ1

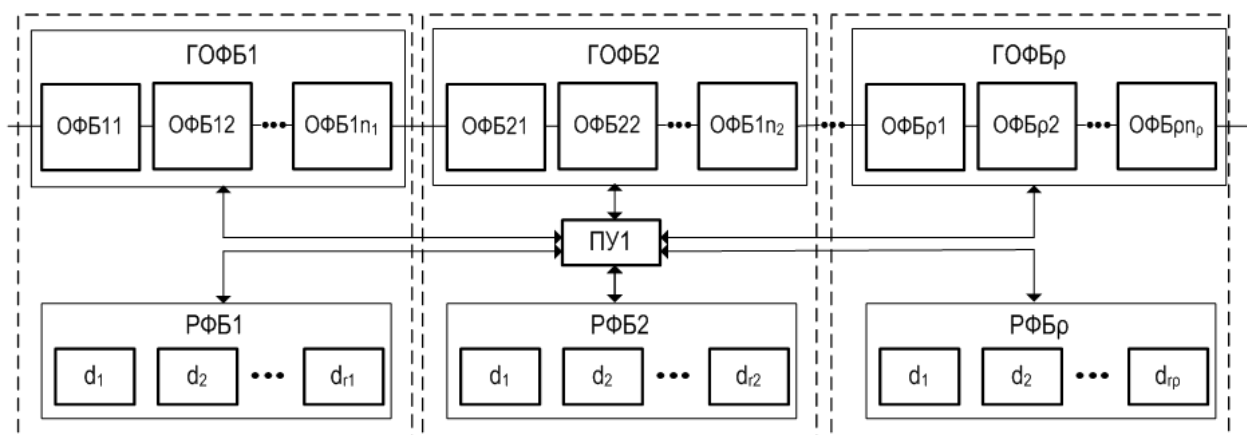


Рис. 3. ССН для УФБ з централізованою САРБ, у якій на кожну ГОФБ призначено по одному РФБ

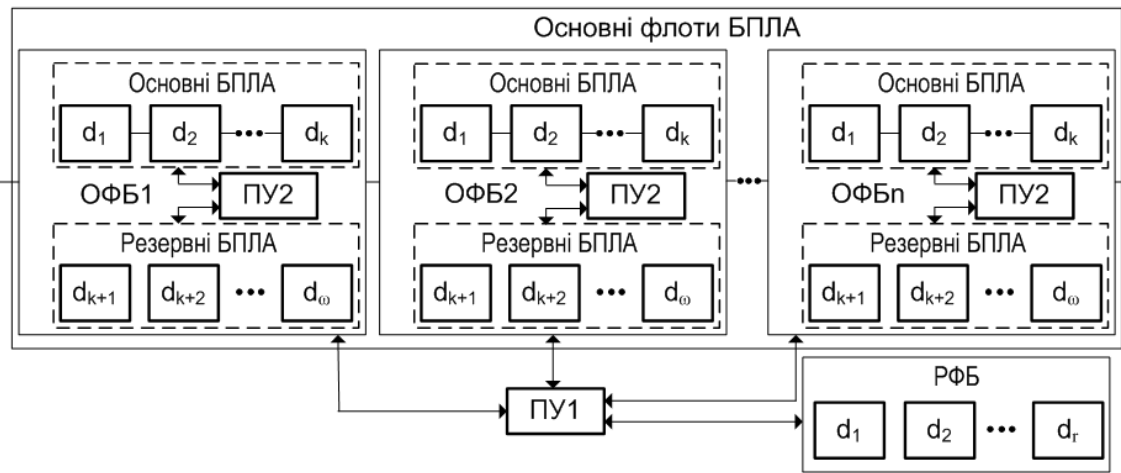


Рис. 4. ССН для УФБ з децентралізованою САРБ

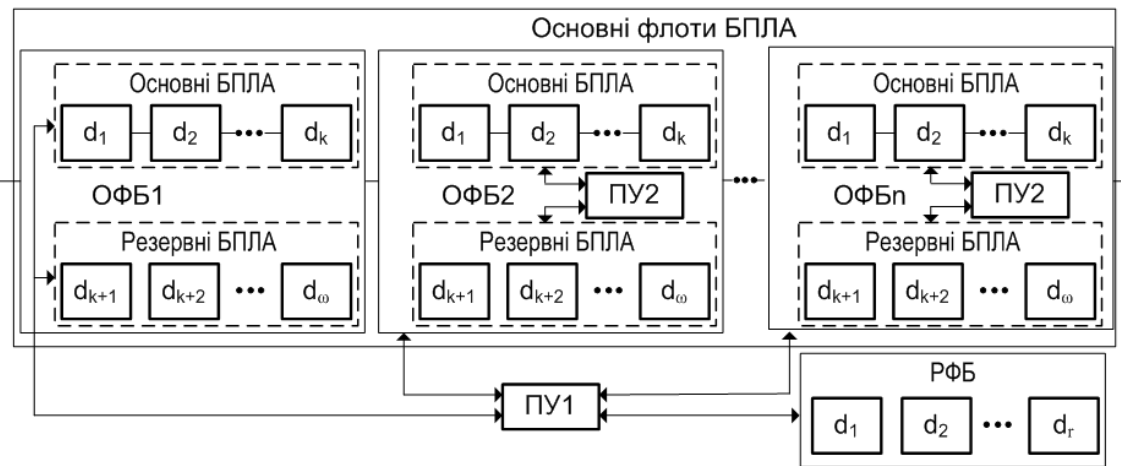


Рис. 5. ССН для УФБ з частково децентралізованою САРБ для випадку m = 1

Таблиця 1

Вирази для обчислення безвідмовної роботи або перебування у відповідному стані параметрів, необхідних для розрахунку імовірності безвідмовної роботи УФБ

Параметр	Вираз для обчислення безвідмовної роботи або перебування у відповідному стані		
	УФБ з централізованою САРБ та нерезервованим ПУ1	УФБ з централізованим САРБ та резервованим ПУ1	УФБ з децентралізованою САРБ
$F(k, \omega)$	$\sum_{i=0}^{\omega-k} C_{\omega}^i p_d^{\omega-i} (1-p_d)^i$	$\sum_{i=0}^{\omega-k} C_{\omega}^i p_d^{\omega-i} (1-p_d)^i$	$\sum_{i=0}^{\omega-k} C_{\omega}^i p_d^{\omega-i} (1-p_d)^i p_{ПУ2}$
$P(n, k, \omega, 0)$	$F^n(k, \omega) p_{ПУ1}$	$F^n(k, \omega) [1 - (1 - p_{ПУ1})^2]$	$F^n(k, \omega)$
$R(n, k, \omega)$	$n [1 - F(k, \omega)] p_d \times F^{n-1}(k, \omega) p_{ПУ1}$	$n [1 - F(k, \omega)] p_d F^{n-1}(k, \omega) \times [1 - (1 - p_{ПУ1})^2]$	$n [1 - F(k, \omega)] p_d \times F^{n-1}(k, \omega) p_{ПУ1}$
$P(n, k, \omega, 1)$	$P(n, k, \omega, 0) + R(n, k, \omega)$	$P(n, k, \omega, 0) + R(n, k, \omega)$	$P(n, k, \omega, 0) + R(n, k, \omega)$
$P(n, k, \omega, 2)$	$P(n, k, \omega, 1) + [1 - P(n, k, \omega, 1)] \times R(n, k, \omega)$	$P(n, k, \omega, 1) + [1 - P(n, k, \omega, 1)] \times R(n, k, \omega)$	$P(n, k, \omega, 1) + [1 - P(n, k, \omega, 1)] \times R(n, k, \omega)$
$P(n, k, \omega, r)$	$P(n, k, \omega, r-1) + [1 - P(n, k, \omega, r-1)] R(n, k, \omega)$	$P(n, k, \omega, r-1) + [1 - P(n, k, \omega, r-1)] R(n, k, \omega)$	$P(n, k, \omega, r-1) + [1 - P(n, k, \omega, r-1)] R(n, k, \omega)$

Розрахунок імовірності безвідмовної роботи для УФБ (СН яких надано на рис. 3 та 5) має свої особливості, тому потребує окремого розгляду.

Почнемо з УФБ з СН на рис. 3. Введемо додатково такі позначення:

$P(n_j, k, \omega, 0)$ – імовірність безвідмовної роботи частини УФБ, що складається з j -ї ГОФБ та j -го РФБ, для випадку відсутності БПЛА у складі j -го РФБ;

$R(n_j, k, \omega)$ – імовірність знаходження УФБ у стані, коли відмова одного з флотів j -ї ГОФБ усунута за рахунок БПЛА зі складу j -го РФБ;

$P(n_j, k, \omega, 1)$ – імовірність безвідмовної роботи частини УФБ, що складається з j -ї ГОФБ та j -го РФБ за наявності одного БПЛА у складі j -го РФБ;

$P(n_j, k, \omega, 2)$ – імовірність безвідмовної роботи частини УФБ, що складається з j -ї ГОФБ та j -го РФБ за наявності двох БПЛА у складі j -го РФБ;

$P(n_j, k, \omega, r)$ – імовірність безвідмовної роботи частини УФБ, що складається з j -ї ГОФБ та j -го РФБ за наявності r БПЛА у складі j -го РФБ;

$P_{УФБ}$ – імовірність безвідмовної роботи УФБ.

Решта параметрів, які будуть враховано, описано вище.

Тоді необхідні імовірності будуть розраховуватись за формулами (1) – (7)

$$F(k, \omega) = \sum_{i=0}^{\omega-k} C_{\omega}^i p_d^{\omega-i} (1-p_d)^i, \quad (1)$$

$$P(n_j, k, \omega, 0) = F^{n_j}(k, \omega), \quad (2)$$

$$R(n_j, k, \omega) = n_j [1 - F(k, \omega)] p_d F^{n_j-1}(k, \omega), \quad (3)$$

$$P(n_j, k, \omega, 1) = P(n_j, k, \omega, 0) + R(n_j, k, \omega), \quad (4)$$

$$P(n_j, k, \omega, 2) = P(n_j, k, \omega, 1) + [1 - P(n_j, k, \omega, 1)] R(n_j, k, \omega), \quad (5)$$

$$P(n_j, k, \omega, r_j) = P(n_j, k, \omega, r_j - 1) + [1 - P(n_j, k, \omega, r_j - 1)] R(n_j, k, \omega), \quad (6)$$

$$P_{УФБ} = P_{ПУ1} \prod_{j=1}^p P(n_j, k, \omega, r_j). \quad (7)$$

Далі розглянемо УФБ, СН якого надано на рис. 5, але прийемо, що m ОФБ управляються

ПУ2, в той час як решта ($m - n$) – управляються ПУ1. Додатково введемо наступні параметри:

$F_1(k, \omega)$ – імовірність безвідмовної роботи одного ОФБ, що управляються ПУ1;

$F_2(k, \omega)$ – імовірність безвідмовної роботи одного ОФБ, що управляються ПУ2. Решта параметрів, що будуть використовуватись, були описані вище. Для отримання необхідних імовірностей застосуємо формули (8) – (14)

$$F_1(k, \omega) = \sum_{i=0}^{\omega-k} C_{\omega}^i p_d^{\omega-i} (1-p_d)^i, \quad (8)$$

$$F_2(k, \omega) = \sum_{i=0}^{\omega-k} C_{\omega}^i p_d^{\omega-i} (1-p_d)^i p_{ПУ2}, \quad (9)$$

$$P(n, k, \omega, 0) = F_1^{n-m}(k, \omega) p_{ПУ1} F_1^n(k, \omega), \quad (10)$$

$$R(n, k, \omega) = (n-m) [1 - F_1(k, \omega)] p_d \times F_1^{n-m-1}(k, \omega) p_{ПУ1} + m [1 - F_2(k, \omega)] \times p_d F_2^{n-m-1}(k, \omega) p_{ПУ1}, \quad (11)$$

$$P(n, k, \omega, 1) = P(n, k, \omega, 0) + R(n, k, \omega), \quad (12)$$

$$P(n, k, \omega, 2) = P(n, k, \omega, 1) + [1 - P(n, k, \omega, 1)] \times R(n, k, \omega), \quad (13)$$

$$P(n, k, \omega, r) = P(n, k, \omega, r-1) + [1 - P(n, k, \omega, r-1)] R(n, k, \omega). \quad (14)$$

3. Результати застосування запропонованих моделей

3.1. Дослідження моделей

Використовуючи формули, представлені у табл. 1 були отримані:

– залежності імовірності безвідмовної роботи УФБ з різними значеннями імовірності безвідмовної роботи БПЛА від кількості ОФБ у разі використання РФБ з трьома БПЛА (рис. 6);

– залежності імовірності безвідмовної роботи УФБ з різними САРБ від кількості ОФБ у разі використання РФБ з трьома БПЛА (рис. 7).

На підставі аналізу отриманих залежностей, можна зробити наступні висновки:

– максимальне відсоткове збільшення імовірності безвідмовної роботи для УФБ, що використовує РФБ з БПЛА (7,4 %) досягається у випадку імо-

вірність безвідмовної роботи БПЛА $p_d = 0,92$ і кількості ОФБ $n = 15$ (рис. 6), тоді як мінімальне відсоткове збільшення імовірності безвідмовної роботи такого УФБ (1,5 %) досягається, коли $p_d = 0,99$ і число ОФБ $n = 2$;

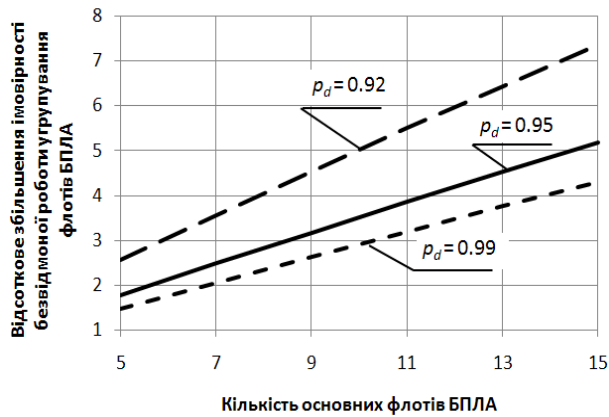


Рис. 6. Залежності імовірності безвідмовної роботи УФБ з різними значеннями імовірності безвідмовної роботи БПЛА від кількості ОФБ у разі використання РФБ з трьома БПЛА:

$$P_{ПУ1} = 0,999, P_{ПУ2} = 0,997, k = 6, \omega = 9$$

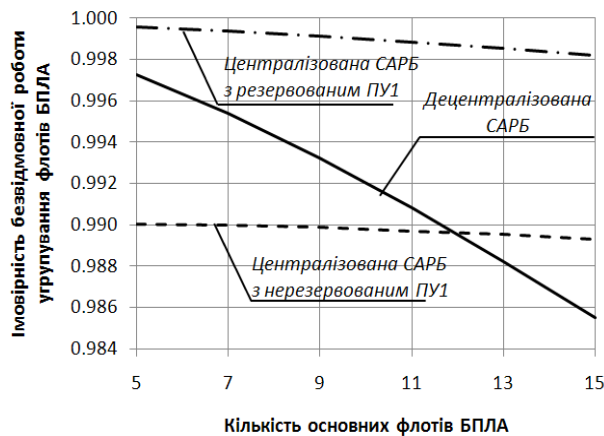


Рис. 7. Залежності імовірності безвідмовної роботи УФБ з різними САРБ від кількості ОФБ у разі використання РФБ з трьома БПЛА:

$$p_d = 0,92, P_{ПУ1} = 0,99, P_{ПУ2} = 0,99, k = 6, \omega = 9$$

– у разі використання УФБ з трьома БПЛА зростання числа флотів з 5 до 15 (рис. 7) призводить до зниження значення імовірності безвідмовної роботи УФБ на 0,0008, 0,0014 і 0,0012 для УФБ з централізованою САРБ та резервованим ПУ1, централізованою САРБ та нерезерованим ПУ1 і децентралізованою САРБ відповідно;

– найкраще значення імовірності безвідмовної роботи має УФБ з централізованою САРБ та резервованим ПУ1 (рис. 7);

– якщо кількість ОФБ є меншою за 12, використання УФБ з децентралізованою САРБ є більш

доцільним, ніж УФБ з централізованою САРБ та нерезерованим ПУ1 (рис. 7).

3.2. Задачі вибору САРБ

На основі представлених результатів можна сформулювати наступні задачі щодо вибору САРБ:

1. Отримати максимальну складність для централізованої САРБ з нерезерованим ПУ1, що дозволяє УФБ мати надійність, не гіршу за УФБ з децентралізованою САРБ.

2. Отримати максимальну складність для централізованої САРБ з резервованим ПУ1, що дозволяє УФБ мати надійність, не гіршу за УФБ з децентралізованою САРБ.

3. Крім того, розроблені моделі надійності надають змогу здійснювати вибір варіантів організації угруповань флотів та їх резервування залежно від кількості цільових завдань і з урахуванням безвідмовності пунктів управління.

4. Висновки

4.1. Результати

Дана стаття узагальнює та розвиває результати публікацій [12, 13]. Запропоновано структуру угруповання флотів БПЛА з дворівневим ковзним резервуванням (на рівнях флотів та їх угруповання – з використанням резервного флоту) і різними варіантами організації пунктів управління.

Досліджено централізовану, децентралізовану та частково децентралізовану структури активації резервних БПЛА угруповання флотів з резервними (резервними флотами), а саме:

– побудовано структурні схеми надійності цих систем;

– отримано аналітичні вирази для обчислення імовірності безвідмовної роботи угруповання флотів БПЛА на основі кожної з цих схем;

– отримано та досліджено залежності: імовірності безвідмовної роботи УФБ з різними значеннями імовірності безвідмовної роботи БПЛА від кількості ОФБ у разі використання РФБ з трьома БПЛА; імовірності безвідмовної роботи УФБ з різними САРБ від кількості ОФБ у разі використання РФБ з трьома БПЛА.

Показано, що:

– збільшення кількості ОФБ з 5 до 15 призводить до зменшення надійності УФБ;

– якщо кількість ОФБ є меншою за 12, використання УФБ з децентралізованою САРБ є більш доцільним, ніж УФБ з централізованою САРБ та нерезерованим ПУ1.

Розроблення та дослідження моделей надійності надало можливість сформулювати задачі щодо вибору САРБ та відповідні рекомендації щодо організації угруповань.

4.2. Напрями подальших досліджень

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробленні програмного забезпечення для підтримки прийняття рішень щодо вибору варіантів структур і урахування можливих схем організації підльоту резервних БПЛА.

Крім того, наступним кроком досліджень має бути розроблення моделей готовності угруповань флотів з урахуванням відновлення БПЛА та узагальнення виразів, отриманих у роботах [11, 12], для різних САРБ.

Література

1. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: концепция, принципы построения [Текст] / А. А. Саченко, В. В. Кочан, В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий, Г. В. Фесенко, М. Э. Яновский // *Ядерная та радіаційна безпека*. – 2017. – № 1(73). – С. 24-29.

2. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: модели надежности [Текст] / В. С. Харченко, М. А. Ястребенецкий, Г. В. Фесенко, А. А. Саченко, В. В. Кочан // *Ядерная та радіаційна безпека*. – 2017. – № 4(76). – С. 50-55.

3. Babak, S. Radiation monitoring of environment using unmanned aerial complex [Text] / S. Babak // *The advanced science journal*. – 2014. – Vol. 12. – P. 41-44. DOI: 10.15550/ASJ.2014.12.041

4. Ram, R. Systems engineering: reliability analysis using k-out-of-n structures [Text] / M. Ram, T. Dohi. – CRC Press, 2019. – 218 p.

5. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення [Текст]. – Чинний з 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1995. – 42 с.

6. Aghaei, M. Redundancy allocation problem for k-out-of-n systems with a choice of redundancy strategies [Text] / M. Aghaei, A. Z. Hamadani, M. A. Ardakan // *Journal of Industrial Engineering International*. – 2017. – Vol. 13, No. 1. – P. 81-92. DOI: 10.1007/s40092-016-0169-3

7. Kim, H. Optimal reliability design of a system with k-out-of-n subsystems considering redundancy strategies [Text] / H. Kim // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2017. – Vol. 167. – P. 572-582. DOI: 10.1016/j.res.2017.07.004

8. Eryilmaz, S. Modeling and analysis of weighted-k-out-of-n: G system consisting of two different types of components [Text] / S. Eryilmaz, K. Sarikaya // *Journal*

of Risk and Reliability. – 2014. – Vol. 228, No. 3. – P. 265-271. DOI: 10.1177/1748006X13515647

9. Pascual-Ortigosa, P. Algebraic analysis of multistate k-out-of-n systems [Text] / P. Pascual-Ortigosa, E. Sáenz-De-Cabezón, H. P. Wynn // *Monografías de la Real Academia de Ciencias*. – 2018. – Vol. 43. – P. 131-134.

10. Efficient analysis of multi-state k-out-of-n system [Text] / Y. Mo, L. Xing, S. V. Amari, J. B. Dugan // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2015. – Vol. 133. – P. 95-105. DOI: 10.1016/j.res.2014.09.006.

11. Ushakov, I. Probabilistic reliability models [Text] / I. Ushakov. – John Wiley and Sons, 2012. – 244 p.

12. Fesenko, H. Evaluating reliability of a multi-fleet with a reserve drone fleet: an approach and basic model [Text] / H. Fesenko, V. Kharchenko, E. Zaitseva // *Information and Digital Technologies (IDT) : Proc. 2019 IEEE Int. Conf., Zilina, Slovakia, 24-26 Jun. 2019*. – Zilina, 2019.

13. Fesenko, H. Reliability models for a multi-fleet of drones with two-level hot standby redundancy considering a control system structure [Text] / H. Fesenko, V. Kharchenko // *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technologies and Application (IDAACS): 10th IEEE Int. Conf., Metz, France, 18-21 September, 2019 (accepted)*.

References

1. Sаченко, А. А., Кочан, В. В., Харченко, В. С., Ястребенецкий, М. А., Фесенко, Г. В., Яновский, М. Э. Sistema posleavariinogo monitoringa AES s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: kontseptsiya, printsipy postroeniya [NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: concept, design principles]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka – Nuclear and Radiation Safety*, 2017, vol. 73, no. 1, pp. 24-29.

2. Kharchenko, V. S., Yastrebenetskii, M. A., Fesenko, G. V., Sаченко, А. А., Кочан, В. В. Sistema posleavariinogo monitoringa AES s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: modeli nadezhnosti [NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: reliability models]. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka – Nuclear and Radiation Safety*, 2017, vol. 76, no. 4, pp. 50-55.

3. Babak, S. Radiation monitoring of environment using unmanned aerial complex. *The advanced science journal*, 2014, vol. 12, pp. 41-44. DOI: 10.15550/ASJ.2014.12.041.

4. Ram, R., Dohi, T. *Systems engineering: reliability analysis using k-out-of-n structures*, CRC Press, 2019. 218 p.

5. ДСТУ 2860-94. Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia [State Standard of Ukraine 2860-94. Terms and definitions]. Kyiv, Derzhstandart Publ., 1995. 42 p.

6. Aghaei, M., Hamadani, A. Z., Aghaei, M., Ardakan, M. A. Redundancy allocation problem for k-out-of-n systems with a choice of redundancy strategies. *Journal of Industrial Engineering International*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 81-92. DOI: 10.1007/s40092-016-0169-3
7. Kim, H. Optimal reliability design of a system with k-out-of-n subsystems considering redundancy strategies. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, vol. 167, pp. 572-582. DOI: 10.1016/j.ress.2017.07.004
8. Eryilmaz, S., Sarikaya, K. Modeling and analysis of weighted-k-out-of-n: G system consisting of two different types of components. *Journal of Risk and Reliability*, 2014, vol. 228, no. 3, pp. 265-271. DOI: 10.1177/1748006X13515647
9. Pascual-Ortigosa, P., Sáenz-De-Cabezón, E., Wynn, H. P. Algebraic analysis of multistate k-out-of-n systems. *Monografías de la Real Academia de Ciencias*, 2018, vol. 43, pp. 131-134.
10. Mo, Y., Xing, L., Amari, S. V., Dugan, J. B. Efficient analysis of multi-state k-out-of-n system. *Reliability Engineering and System Safety*, 2015, vol. 133, pp. 95-105. DOI: 10.1016/j.ress.2014.09.006.
11. Ushakov, I. *Probabilistic reliability models*, John Wiley and Sons, 2012. 244 p.
12. Fesenko, H., Kharchenko, V., Zaitseva, E. Evaluating reliability of a multi-fleet with a reserve drone fleet: an approach and basic model. *IEEE International Conference Information and Digital Technologies (IDT)*, Zilina, Slovakia, 24-26 June, 2019.
13. Fesenko, H., Kharchenko, V. Reliability models for a multi-fleet of drones with two-level hot standby redundancy considering a control system structure. *10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technologies and Application (IDAACS)*, Metz, France, 18-21 September, 2019, pp. 1-6 (accepted).

Поступила в редакцію 10.05.2019, рассмотрена на редколлегии 12.06.2019

МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ГРУППИРОВОК ФЛОТОВ БПЛА СО СКОЛЬЗЯЩИМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Г. В. Фесенко, В. С. Харченко

В последние годы беспилотные летательные аппараты используются для решения задач до- и послеаварийного мониторинга атомных электростанций и других потенциально опасных объектов. Использование флота (группировки флотов) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения задач мониторинга связано с особыми условиями агрессивной окружающей среды, приводящей к отказу отдельных БПЛА, что требует обеспечения высокого уровня надежности такого флота (группировки). Наиболее эффективным способом решения этой задачи является применение скользящего резервирования. Предметом исследования является группировка флотов БПЛА со скользящим резервированием. С целью учета надежности пункта управления для различных вариантов организации группировок БПЛА, целесообразно сформулировать следующие задачи: проанализировать различные структуры группировок флотов БПЛА с учетом схемы активации резервных БПЛА; разработать и исследовать модели надежности группировок флотов БПЛА с централизованной, децентрализованной и смешанной схемой активации резервных БПЛА с возможностью резервирования пунктов управления; сформулировать рекомендации по выбору схемы активации резервных БПЛА. Результаты исследований: предложена структура группировки флотов БПЛА с двухуровневым скользящим резервированием (на уровнях флотов и их группировки - с использованием резервного флота) и различными вариантами организации пунктов управления. Исследована централизованная, децентрализованная и частично децентрализованная структура активации резервных БПЛА группировки флотов с резервным (резервными флотами), а именно: построены структурные схемы надежности этих систем; получены аналитические выражения для вычисления вероятности безотказной работы группировки флотов БПЛА на основе каждой из этих схем; получены и исследованы зависимости: вероятности безотказной работы группировки флотов БПЛА с различными значениями вероятности безотказной работы БПЛА от количества основных флотов в случае использования резервного флота с тремя БПЛА; вероятности безотказной работы группировки флотов БПЛА с различными схемами активации резервных БПЛА от количества основных флотов в случае использования резервного флота с тремя БПЛА. Разработка и исследование моделей надежности позволила сформулировать задачи по выбору схем активации резервных БПЛА и соответствующие рекомендации по организации группировок. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке программного обеспечения для поддержки принятия решений по выбору вариантов структур и учета возможных схем организации полета резервных БПЛА к зонам ответственности

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; группировки флотов; резервный флот; надежность; скользящее резервирование; пункт управления; схемы активации резервных БПЛА.

**RELIABILITY MODELS OF UAV FLEET GROUPS
WITH K-OUT-OF-N REDUNDANCY
FOR MONITORING OF POTENTIALLY DANGEROUS OBJECTS**

H. V. Fesenko, V. S. Kharchenko

Over the past years, unmanned aerial vehicles have been used to solve the problems of pre-and post-accident monitoring of nuclear power plants and other potentially dangerous objects. The use of a fleet (fleet grouping) of the unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring missions is due to the special conditions of the aggressive environment, which causes the failures of certain UAVs, and therefore needs to ensure a high level of reliability of such a fleet (the group of fleets). The most effective way to solve this problem is to use k-out-of-n redundancy. The subject of the study is a UAV fleet group with k-out-of-n redundancy. In order to take into account the reliability of the control station for various variants of the organization of UAV fleet groups, it is advisable to formulate the following tasks: to analyze the different structures of UAV fleet groups taking into account the scheme of activation of redundant UAVs; to develop and investigate models of reliability of UAV fleet groups with a centralized, decentralized and partially decentralized schemes of activation of redundant UAVs with the possibility of control station redundancy; to formulate recommendations for choosing a scheme for activation of redundant UAVs. Research results: the structure of the UAV fleet group with two-level k-out-of-n redundancy (at fleet levels and their groups using the reserve fleet) and different variants of organization of control stations were proposed. The centralized, decentralized and partially decentralized structures of activation of the redundant UAVs for a fleet group with reserve (reserve fleets) are investigated, namely: the reliability block diagrams of these systems are constructed; analytical expressions for calculating the probability of failure-free operation of the UAV fleet group based on each of these schemes are obtained; the following dependencies are obtained and investigated: probability of failure-free operation of a UAV fleet group with different probabilities of UAV failure-free operation from the number of the main fleets in case of use of reserve fleet with three UAVs; the probability of UAV fleet group failure-free operation with different schemes of activation of redundant UAVs from the number of main fleets in the case of using a reserve fleet with three UAVs. The development and research of reliability models have made it possible to formulate tasks regarding the choice of schemes for activation of redundant UAVs and the corresponding recommendations for the organization of groups. Further research is appropriate to focus on developing software to support decision-making on choosing the options for structures and taking into account possible schemes to get areas of responsibility by UAVs.

Keywords: unmanned aerial vehicle; group of fleets; reserve fleet; reliability; k-out-of-n redundancy; control station; schemes for activation of redundant UAVs.

Фесенко Герман Вікторович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Харченко Вячеслав Сергійович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Fesenko Herman Viktorovych – PhD, Associate Professor at the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: h.fesenko@csn.khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-4084-2101, Scopus Author ID: 57190123735, ResearcherID: H-7875-2018, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=Pz4v4UIAAAAJ>

Kharchenko Vyacheslav Serhiiovych – DrS on Engineering, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-5352-077X, Scopus Author ID: 22034616000, ResearcherID: A-7719-2017, <https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=FQ4dH4EAAAAJ>