

Коваленко Андрій Степанович

Коровін Іван Павлович (кандидат технічних наук, доцент)

Національний інститут оборони України імені Івана Черняхівського, Київ

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДО РІВНЯ НАДІЙНОСТІ СКЛАДОВИХ ТАКТИЧНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

У статті розв'язано задачі параметричного і структурного надійнісного синтезу складових тактичного безпілотного літального апарату, які надали змогу обґрунтувати вимоги до їх надійності та відпрацювати рекомендації щодо доцільності вибору їх відмовостійких конфігурацій для забезпечення заданого (необхідного) рівня надійності.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, вимоги, надійність.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Концептуальні напрями розвитку безпілотної авіаційної техніки в інтересах вирішення завдань національної безпеки та в інших сферах визначаються, з одного боку, співвідношенням між важливістю й обсягами завдань, які необхідно і можна ефективно вирішувати за допомогою безпілотних літальних апаратів безпілотних авіаційних комплексів (БпЛА БпАК), з іншого – вартістю розроблення, виробництва та експлуатації безпілотних авіаційних систем (БпАС), а головне – ефективністю їх бойового застосування.

Аналіз сучасних способів і форм ведення бойових дій показує, що керівництвом провідних країн світу передбачається значне розширення завдань, що вирішуються БпЛА військового призначення. Сучасні програми провідних країн світу по створенню і модернізації БпЛА мають пріоритет в об'ємах фінансування [1]. В більшості країнах планується більш широке застосування БпЛА. Експерти в сфері безпілотної техніки прогнозують, що провідні країни світу будуть мати до 2025 року до 80% бойової безпілотної авіації [2]. У світі нараховується понад 150 підприємств, що займаються розробкою та серійним виробництвом БпАС та комплектуючими до них.

Оскільки сьогодні в Україні активно ведуться розробки БпАК у кооперації з іншими українськими підприємствами, то на етапі їх системотехнічного проектування, включаючи проектування тактичних БпЛА (ТБпЛА), необхідно знайти варіанти реалізації відмовостійких конфігурацій таких літальних апаратів, які відповідають заданому рівню безпеки експлуатації та надійності ТБпЛА.

Метою статті є розроблення рекомендацій щодо визначення вимог до рівня надійності складових ТБпЛА.

Викладення основного матеріалу дослідження. При виконанні системотехнічного проектування використовують три основні шляхи забезпечення заданого рівня надійності технічної системи відповідального призначення (ТСВП), до яких також належать і ТБпЛА:

підвищення надійності елементної бази обладнання ТСВП;

введення надлишковості;

вибір стратегії технічного обслуговування та ремонту ТСВП.

Відповідно ці підходи будемо застосовувати при розв'язанні задач параметричного і структурного надійного синтезу навігаційного комплексу (НК) ТБпЛА.

Приймаємо наступні допущення:

при дослідженні надлишковості в безплатформній інерціальній навігаційній системі (БІНС) кожен з гіроскопів та акселерометрів має однократне резервування із забезпеченням ковзного резерву;

значення інтенсивностей відмов резервних гіроскопів та акселерометрів дорівнюють значенням інтенсивностей основних гіроскопів та акселерометрів;

тривалості всіх процесів, які відбуваються в навігаційному комплексі БпЛА, розподілені за експоненційним законом;

інтенсивності подій є сталими в часі величинами;

інтегрована система, яка складається з системи повітряних сигналів, магнітометра та датчика горизонту ("СПС+ММ+ДГ") вважається такою, що відмовила за умови, якщо сталася відмова хоча б однієї з її складових. Іntenсивність відмови даної системи буде визначатись як сума інтенсивностей відмов усіх трьох складових, оскільки згідно зі структурною схемою надійності (рис. 1) вони з'єднані послідовно.

| Name | Value | Info |
|------|-------|---|
| L1 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова Az" |
| L2 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова Гх" |
| L3 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова Гу" |
| L4 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова Гз" |
| L5 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова Ах" |
| L6 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова Ау" |
| L7 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова Az" |
| L8 | 1e-1 | Іntenсивність подій "Відмова СПС+ММ+ДГ" |

Рисунок 1 – Приклад введення показників надійності складових НК БпЛА у вікно програмного засобу

Вхідними даними задач допустимо що:

тривалість льотної експлуатації (льотний час) – $T_{зад}=500$ год.;

граничне значення ймовірності безвідмовної роботи навігаційного комплексу на заданому інтервалі експлуатації (500 год.) $P_{гр.б.р. НК}$ дорівнює 0,98;

значення інтенсивностей відмов складових та елементів структурної схеми надійності НК при двох варіантах реалізації БНС: без резервування та з однократним резервуванням гіроскопів і акселерометрів, які взято з міжнародних стандартів [3, 4].

У рамках розв'язання задач надійного синтезу НК проведемо поетапно ряд дослідів із застосуванням методу комбінованого вибору доцільних показників надійності (інтенсивності відмов) складових та елементів НК, а саме:

бортової апаратури СНС – L1;

безплатформної ІНС: відповідно гіроскопів (Гх, Гу, Гз) – L2, L3, L4, та акселерометрів (Ах, Ау, Az) – L5, L6, L7;

інтегрованої системи "СПС+ММ+ДГ" – L8.

При цьому по черзі та покроково дослідимо (оцінимо) вплив на надійність НК, зміну показників надійності складових НК, а саме значень їх інтенсивності відмов.

Результати таких дослідів представлено у табл. 1 і табл. 2, а також у вигляді графіків залежностей імовірності безвідмовної роботи БпЛА від тривалості експлуатації при зміні вхідних даних (рис. 2–8)

Таблиця 1– Результати досліджень параметричного надійного синтезу НК БпЛА

| № етапу | №дослід | L1 год ⁻¹ | L2 год ⁻¹ | L3 год ⁻¹ | L4 год ⁻¹ | L5 год ⁻¹ | L6 год ⁻¹ | L7 год ⁻¹ | L8 год ⁻¹ | $P_{б.р.НК}$ при $T_{зад}$ |
|---------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| 1 | 1 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,961 |
| 2 | 2 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0013 | 0,967 |
| | 3 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0009 | 0,976 |
| | 4 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,00065 | 0,98 |
| 3 | 5 | 0,00080 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,969 |
| | 6 | 0,00060 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,978 |
| | 7 | 0,00054 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,98 |

Інженерно-авіаційне забезпечення

| № етапу | № досліду | L1 год ⁻¹ | L2 год ⁻¹ | L3 год ⁻¹ | L4 год ⁻¹ | L5 год ⁻¹ | L6 год ⁻¹ | L7 год ⁻¹ | L8 год ⁻¹ | $R_{б.р.НК}$ при $T_{зад}$ |
|---------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 4 | 8 | 0,0013 | 0,000040 | 0,000040 | 0,000040 | 0,000050 | 0,000050 | 0,000050 | 0,0018 | 0.965 |
| | 9 | 0,0013 | 0,000034 | 0,000034 | 0,000034 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,0018 | 0.969 |
| | 10 | 0,0013 | 0,000021 | 0,000021 | 0,000021 | 0,000027 | 0,000027 | 0,000027 | 0,0018 | 0.98 |

Таблиця 2 – Результати досліджень структурного надійного синтезу НК БпЛА

| № етапу | № досліду | L1 год ⁻¹ | L2 год ⁻¹ | L3 год ⁻¹ | L4 год ⁻¹ | L5 год ⁻¹ | L6 год ⁻¹ | L7 год ⁻¹ | L8 год ⁻¹ | $R_{б.р.НК}$ при $T_{зад}$ |
|---------|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 5 | 11 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,9993 |
| 6 | 12 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0036 | 0,99887 |
| | 13 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0072 | 0,99869 |
| | 14 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,018 | 0,99867 |
| | 15 | 0,0013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,18 | 0,99865 |
| | 16 | 0,0026 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,99888 |
| 7 | 17 | 0,0052 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,99849 |
| | 18 | 0,013 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,99828 |
| | 19 | 0,13 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000045 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,99826 |
| 8 | 20 | 0,0013 | 0,000062 | 0,000062 | 0,000062 | 0,000084 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,9976 |
| | 21 | 0,0013 | 0,000090 | 0,000090 | 0,000090 | 0,000108 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,9958 |
| | 22 | 0,0013 | 0,00018 | 0,00018 | 0,00018 | 0,000056 | 0,000056 | 0,000056 | 0,0018 | 0,9852 |
| | 23 | 0,0013 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,00024 | 0,00024 | 0,00024 | 0,0018 | 0,9814 |
| | 24 | 0,0013 | 0,00021 | 0,00021 | 0,00021 | 0,000245 | 0,000245 | 0,000245 | 0,0018 | 0,980 |
| | 25 | 0,0013 | 0,000225 | 0,000225 | 0,000225 | 0,000270 | 0,000270 | 0,000270 | 0,0018 | 0,9762 |

| Constants and info | | Vectors and refuse expression | | Events tree | |
|------------------------|---|-------------------------------|--------------|--------------|--|
| Event | Condition | Formula | Alternative: | Modification | |
| Втрата сигналу від СНС | $(V1=1) \text{ AND } (V2>=0) \text{ AND } (V3>=0) \text{ AND } (V4>=0) \text{ AND } (V5>=0) \text{ AND } (V6>=0) \text{ AND } (V7>=0) \text{ AND } (V8>=0)$ | L1 | 1 | V1:=0 | |
| Відмова Гх | $(V1>=0) \text{ AND } (V2=1) \text{ AND } (V3>0) \text{ AND } (V4>0) \text{ AND } (V5>0) \text{ AND } (V6>0) \text{ AND } (V7>0) \text{ AND } (V8>=0)$ | L2 | 1 | V2:=V2-1 | |
| Відмова Гу | $(V1>=0) \text{ AND } (V2>0) \text{ AND } (V3=1) \text{ AND } (V4>0) \text{ AND } (V5>0) \text{ AND } (V6>0) \text{ AND } (V7>0) \text{ AND } (V8>=0)$ | L3 | 1 | V3:=V3-1 | |
| Відмова Гз | $(V1>=0) \text{ AND } (V2>0) \text{ AND } (V3>0) \text{ AND } (V4=1) \text{ AND } (V5>0) \text{ AND } (V6>0) \text{ AND } (V7>0) \text{ AND } (V8>=0)$ | L4 | 1 | V4:=V4-1 | |
| Відмова Ах | $(V1>=0) \text{ AND } (V2>0) \text{ AND } (V3>0) \text{ AND } (V4>0) \text{ AND } (V5=1) \text{ AND } (V6>0) \text{ AND } (V7>0) \text{ AND } (V8>=0)$ | L5 | 1 | V5:=V5-1 | |
| Відмова Ау | $(V1>=0) \text{ AND } (V2>0) \text{ AND } (V3>0) \text{ AND } (V4>0) \text{ AND } (V5>0) \text{ AND } (V6=1) \text{ AND } (V7>0) \text{ AND } (V8>=0)$ | L6 | 1 | V6:=V6-1 | |
| Відмова Аз | $(V1>=0) \text{ AND } (V2>0) \text{ AND } (V3>0) \text{ AND } (V4>0) \text{ AND } (V5>0) \text{ AND } (V6>0) \text{ AND } (V7=1) \text{ AND } (V8>=0)$ | L7 | 1 | V7:=V7-1 | |
| Відмова СПС+ММ+ДГ | $(V1>=0) \text{ AND } (V2>=0) \text{ AND } (V3>=0) \text{ AND } (V4>=0) \text{ AND } (V5>=0) \text{ AND } (V6>=0) \text{ AND } (V7>=0) \text{ AND } (V8=1)$ | L8 | 1 | V8:=0 | |

Рисунок 2 – Приклад введення дерева правил модифікації компонент вектора стану НК БпЛА без резервування блоків гіроскопів та акселерометрів

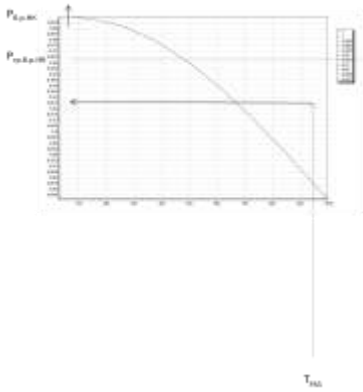


Рисунок 3 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (дослід № 1)

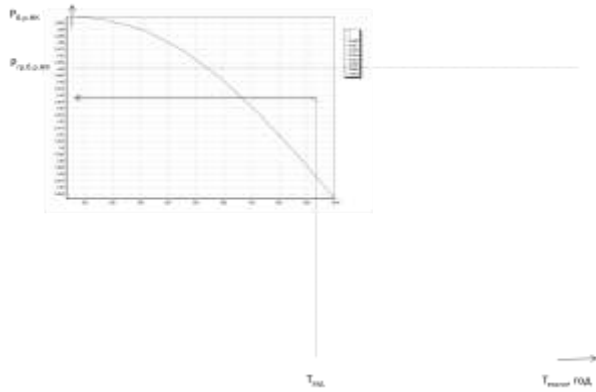


Рисунок 4 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (дослід № 2)

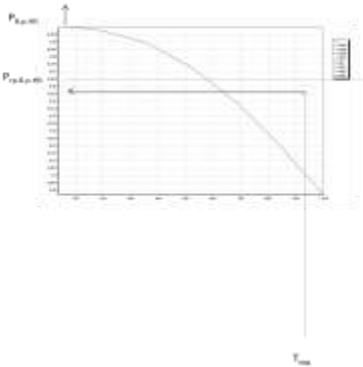


Рисунок 5 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (дослід № 3)

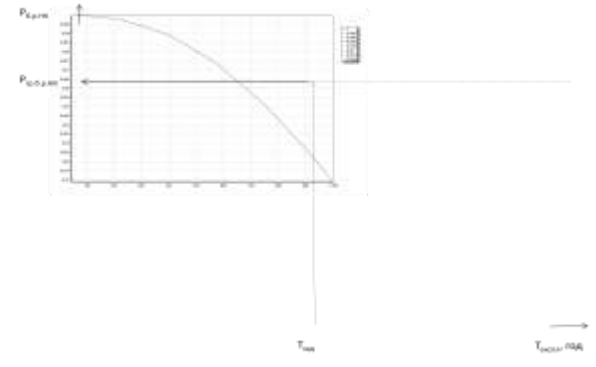


Рисунок 6 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (дослід № 4)

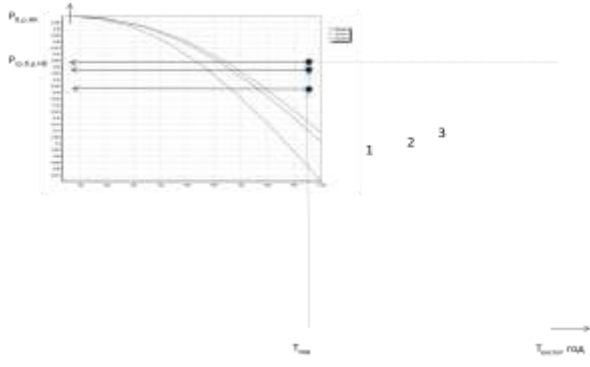


Рисунок 7 – Залежності імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (1 – при досліді № 5; 2 – при досліді № 6; 3 – при досліді № 7)

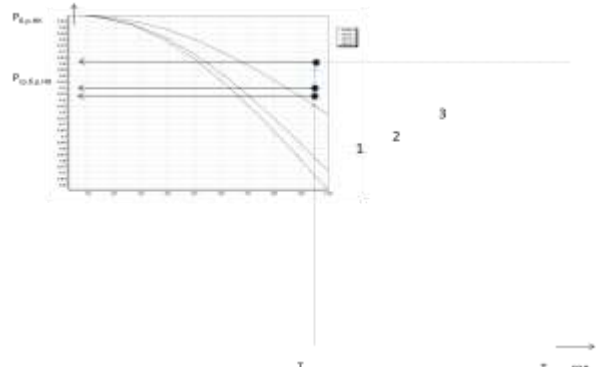


Рисунок 8 – Залежності імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (1 – при досліді № 8; 2 – при досліді № 9; 3 – при досліді № 10)

Для розв'язання задачі структурного надійнісного синтезу навігаційного комплексу БПЛА використовуємо ті ж самі початкові вхідні дані та алгоритм поетапного проведення досліджень, що і при розв'язанні задачі параметричного синтезу.

Результати проведених досліджень наведено у табл. 2 та на графіках рис. 9–12.

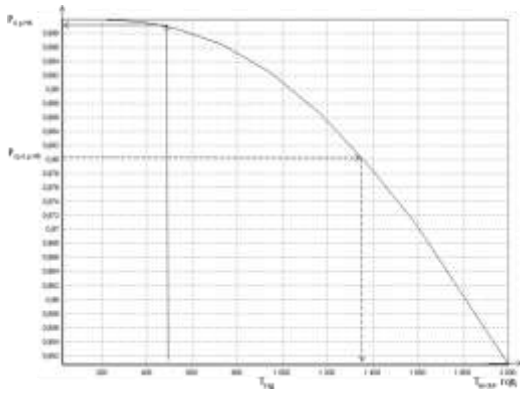


Рисунок 9 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (дослід № 11)

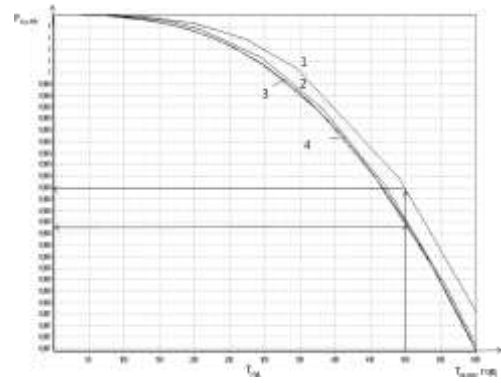


Рисунок 10 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (1 – при досліді № 12; 2 – при досліді № 13; 3 – при досліді № 14; 4 – при досліді № 15)

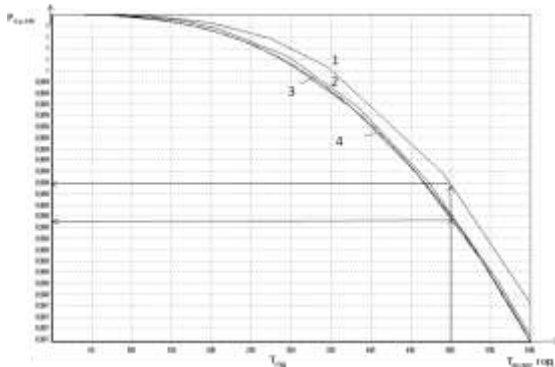


Рисунок 11 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (1 – при досліді № 16; 2 – при досліді № 17; 3 – при досліді № 18; 4 – при досліді № 19)

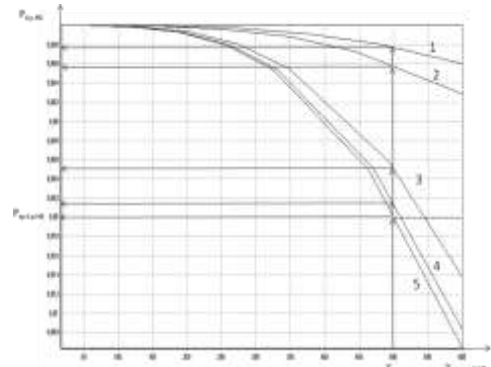


Рисунок 12 – Залежність імовірності безвідмовної роботи НК БПЛА від тривалості експлуатації (1 – при досліді № 20; 2 – при досліді № 21; 3 – при досліді № 22; 4 – при досліді № 23; 5 – при досліді № 24)

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, розв'язавши задачі параметричного та структурного надійнісного синтезу складових БПЛА, можна з легкістю обґрунтувати вимоги до їх надійності та відпрацювати рекомендації щодо доцільного вибору їх відмовостійких конфігурацій для забезпечення заданого (необхідного) рівня надійності.

Актуальність вирішення проблем забезпечення заданого рівня надійності ТБПЛА існує також і для України, де на сьогодні розробка, створення сучасних тактичних БПЛА, у т. ч. їх повітряного компонента – БПЛА, та оснащення ними Збройних Сил України та інших силових відомств є нагальною потребою. У цьому контексті важливе значення мають дослідження, які направлені на розв'язання задач надійнісного проектування відмовостійких ТБПЛА, у т. ч. задач аналізу, синтезу – обґрунтованого вибору доцільної реалізації їх структури із забезпеченням заданого рівня надійності та висування до них вимог.

Список використаних джерел

1. AIRFORCE TECHNOLOGY. [Electronic resource]. – Available: <https://www.airforce-technology.com/news/unmanned-combat-air-vehicles-primary-driver-for-global-c-uas-development-poll/>.
2. STAR 21: Strategic Technologies for the Army of the Twenty-First Century (1992). [Electronic resource]. – Available: <https://www.nap.edu/catalog/1888/star-21-strategic-technologies-for-the-army-of-the-twenty>.
3. US Department of Defense Standard Practice for System Safety: MIL-STD-882D.-2000.
4. US Department of Defense Standard Practice for System Safety: MIL-STD-882E.-2012.- 101p.
5. Unmanned Aerial Vehicle Reliability Study. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.uadrones.net/military/research/acrobat/0302.pdf>.
6. Shawn Reimann, Jeremy Amos, Erik Bergquist, Jay Cole, Justin Phillips, Simon Shuster. UAV for Reliability – Aerospace Vehicle Design 19 December 2013.