

Розроблення методики обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем

О. В. Майстренко, О. А. Караванов, О. О. Ріман, В. А. Курбан, А. А. Щерба, І. Д. Волков, Т. М. Кравець, Г. О. Семів

Запропоновано алгоритм обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем з урахуванням особливостей функціонування таких систем. Означений алгоритм базується на компонуванні методів оцінювання живучості та методів оцінювання надійності. Таке компонування проведено для підвищення ефективності застосування означених методів та зменшення невизначеності при проведенні розрахунків.

Проаналізовано результати розрахунків прикладу застосування методики обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем. Аналіз результатів свідчить, що досягнення поставленого завдання, зокрема щодо заданої імовірності безвідмовного функціонування розвідувально-вогневої системи відбувається при змішаному видові резерву. Причому надаючи перевагу ненавантаженому резерву, використовуючи навантажений лише до критичних елементів – окремих функціональних елементів підсистеми управління. Перевага змішаного виду резерву над ненавантаженим резервом становить 28 %. До того ж, встановлено, що кратність резерву, для прийнятих умов, повинна бути не нижче 2. Розроблено методику обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем з урахуванням особливостей функціонування таких систем. Означена методика включає алгоритм, методи оцінювання живучості та методи оцінювання надійності функціонування. Ця методика перевірена на працездатність шляхом розгляду прикладу обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем та отримання адекватного результату. Цей результат підтверджено досвідом застосування розвідувально-вогневих систем в останніх збройних конфліктах.

Ключові слова: розвідувально-вогневі системи, живучість, схема надійності, структурно-функціональна схема.

1. Вступ

Результати аналізу воєнних конфліктів останніх десятиліть [1–4] свідчать про збільшення частки завдань з ураження цілей розвідувально-вогневіми системами (РВС). Переваги означених систем є очевидними: швидкість реакції, точність виконання завдань, мобільність, стійкість функціонування. Однак із збільшенням ваги означених систем збільшується обсяг заходів щодо протидії ним [3–5].

Відповідно до «парадоксальної логіки війни» [6], сутність якої полягає у тому, що чим ефективніше зразок озброєння, тим більше зусиль прикладають

для його нейтралізації. Тобто, чим більша роль РВС у протиборстві, тим більше зусиль приділяють для боротьби з ними. Іншими словами, чим більшу продуктивність РВС буде виявляти, тим менша буде стійкість її функціонування, що в свою чергу призведе до зниження ефективності у цілому.

Для підвищення здатності складних систем військового призначення функціонувати в умовах відмов проводяться певні заходи. Так, при плануванні військових (бойових) операцій завжди враховується так званий допустимий рівень втрат, тобто планується, що частина військових підрозділів втратить свою функціональну здатність. Відповідно для збереження здатності до функціонування планується резерв сил і засобів. Доволі часто у військовій літературі фігурує величина 10 % резерву. Чи достатньо такого обсягу резерву? Чи необхідно резервувати лише сили і засоби? Який вид резерву необхідно використовувати?

Зрозуміло, що будучи в умовах невизначеності та обмеженого часу на планування, розрахувати величину резерву складно. Однак, якщо формалізувати означений процес через розробку методики із визначеними процедурами, вхідними даними і алгоритмом такий розрахунок буде спрощено.

Тобто однією з проблем застосування РВС є відсутність дієвих механізмів визначення обсягу резерву у залежності від умов функціонування цих систем.

Більш того, у залежності від умов функціонування РВС, буде відрізнятися і ефективність певного виду резерву. Загалом розглядається два основних види резерву – навантажений та ненавантажений. Під навантаженим резервом, розглядається резерв, що містить один чи декілька резервних елементів, які перебувають у режимі основного елемента [7]. Ненавантажений резерв, це такий резерв, який складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у ненавантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента [7].

Таким чином, використання ненавантаженого резерву в критичних точках обумовлено певним часом введення, у разі відмови, резервного елемента. Означене може призвести до зриву виконання завдань. З іншого боку, підтверджено, що ефективність навантаженого резерву дещо нижче ненавантаженого. А при поєднанні цих видів резерву на різних ділянках організаційно-функціонального ланцюга неможливо визначити, скільки і якого виду резерву необхідно застосувати. Тобто неможливо визначити обсяг і вид резерву для досягнення потрібного рівня імовірності безвідмовного функціонування.

Також при визначенні імовірності безвідмовного функціонування РВС неможливо врахувати структурно-функціональне об'єднання окремих функціональних елементів різних підсистем (розвідки, управління, вогневого впливу). Тобто при однаковій кількості окремих функціональних елементів у РВС імовірність безвідмовного функціонування може бути різною. Це пояснюється тим, що різні варіанти організаційно-функціонального об'єднання матимуть різні показники живучості. Відповідно ще однією проблемою є не врахування живучості при визначенні надійності функціонування РВС і навпаки.

Загалом же, підходи до забезпечення здатності РВС функціонувати в умовах проведення військових (бойових) операцій доволі часто включають декілька заходів, які не узгоджуються між собою. Так, аналіз існуючих підходів свід-

чить, що організаційно-функціональне об'єднання окремих елементів проводиться окремо по підсистемам. Тобто окремо підсистема розвідки, окремо підсистема управління, окремо підсистема вогневого впливу [8]. Більш того, живучість цих підсистем, як правило, визначають без врахування надійності функціонування [9, 10]. В той же час, надійність функціонування, як правило, визначають без врахування можливості зміни структурно-функціональної схеми [11–13]. Тобто, без врахування живучості цієї системи.

Не узгодження цих заходів в практичній площині і призводить до високого рівня невизначеності при плануванні бойового застосування РВС. Зокрема і при визначенні виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС. Іншими словами, неузгодження заходів щодо забезпечення здатності функціонування РВС в умовах проведення військових (бойових) операцій обумовлює невизначеність і у досягненні мети військової (бойової) операції у цілому.

Таким чином, актуальність цієї науково-прикладної проблематики полягає у потребі розроблення дієвих механізмів визначення обсягу та виду резерву структурно-функціональних елементів РВС при комплексному урахуванні живучості та надійності функціонування означених систем. До того ж, актуальність цієї науково-прикладної проблематики підтверджується широким застосуванням РВС у сучасних військових конфліктах.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У статті [9] розглянуті питання підвищення ефективності проведення заходів підвищення живучості військових об'єктів, зокрема за рахунок маскуванню. Однак у статті не висвітлені питання поєднання підвищення живучості із підвищенням надійності функціонування військових об'єктів

У статті [10] розкрито питання забезпечення живучості сил і засобів десантно-штурмових військ, зокрема через відновлення озброєння і військової техніки. Однак у статті не розглянуті такі важливі заходи забезпечення здатності до виконання завдань, як резервування сил і засобів.

У статті [11] представлена методика оцінювання ефективності надійності функціонування автоматизованої системи військового призначення. Головна відмінність цієї методики від інших полягає в тому, що ця методика дозволяє відповідним органам управління визначити її ефективність. Причому таке визначення можна проводити синхронізовано з термінами циклів управління військами та засобами з врахуванням обраного в неї способу управління об'єктами управління. Однак ця методика не дозволяє визначити вид та кількість резерву для забезпечення заданої імовірності безвідмовної роботи протягом встановленого терміну.

В статті [12] запропоновано методику оцінювання надійності функціонування автоматизованих систем управління військами (силами) на прикладі автоматизованої системи управління "Ореанда-ПС". Означена методика ґрунтується на врахуванні незалежності потоку відмов технічних засобів від програмних збоїв та навпаки. Однак у праці не розглянуто зв'язок підсистем які приймають участь у реалізації поставлених завдань, зокрема підсистем розвідки, управління та вогневого впливу.

У статті [13] отримано сукупність розрахункових співвідношень, за допомогою яких проведена кількісна оцінка виграшу в надійності систем при спільному використанні структурного, часового та навантажувального резервування. Однак у статті не розглянутий варіант змішаного резервування, а також не врахована живучість системи.

У статті [14] розглядається моделювання та аналіз надійності складних систем, що використовують одноразові елементи під час своєї роботи. Дослідження включає аналіз впливу надійності використаних одноразових предметів на результуючий рівень надійності системи в цілому. Однак у статті не враховано структурно-функціональні зв'язки окремих функціональних елементів, які приймають участь у реалізації завдань.

У статті [15] розглянуто питання застосування методу варіаційного градієнта до динамічних систем. Використання варіаційного градієнтного методу підвищить ефективність обробки інформації в процесах управління та дослідження динамічних систем. Як приклад моделі розглядається застосування варіаційного градієнтного методу до моделей автоматизованих систем управління безпілотними літальними апаратами. Однак у статті не розглянуті питання комбінування декількох підходів для оцінювання функціональної стійкості параметрів.

У статті [16] розглянуто застосування модифікованого градієнтного методу до систем підтримки прийняття рішень для управління безпілотним літальним апаратом, заданих моделями інтегро-диференціації з низькою нелінійністю. На основі доведеної теореми зроблено висновок, що даний метод збігається. Представлені оцінки швидкості конвергенції. Модифікований градієнтний метод дозволяє досліджувати більш широкий клас динамічних моделей при розгляді проблем управління безпілотними літальними апаратами. Однак у цій статті не описано поведінку таких систем при включенні резервних елементів із різними видами резервування.

В роботі [17] описано програмну реалізацію математичної моделі надійності відновлюваної технічної системи з постійним навантаженим резервом. Розроблене програмне забезпечення автоматизує формування математичної моделі надійності у вигляді системи рівнянь Колмогорова-Чепмена і дає змогу аналізувати показники надійності технічної системи для різних значень кратності резервування. Однак у статті не розглядається порядок вибору виду резервування.

У статті [18] запропоновано підхід до підвищення надійності складних технічних систем методом синхронізації систем приймачів ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) з використанням технологій MLAT (MultiLATeration). Сутність технології MLAT полягає в тому, що система з декількох приймачів (мінімум трьох) здатна вимірювати координати повітряного об'єкту, навіть за умов, коли повітряний об'єкт не передає в простір інформацію про своє місцезнаходження. ADS-B – це технологія, при якій «кожне повітряне судно бачить інше», що дозволяє запобігати пілотам небезпечних ситуації [18]. Однак у цій статті не розглянуто можливість компонування різних методів підвищення надійності функціонування.

Таким чином, основними недоліками існуючих підходів є висока складність обчислень, не врахування живучості під час оцінювання надійності та на-

впаки. Також до виявлених недоліків слід віднести неможливість обґрунтування вибору виду та обсягу резерву окремих функціональних елементів, високий рівень невизначеності при підборі вхідних даних. Сутність наукової проблеми обумовлена виявленими недоліками та полягає у відсутності науково-методичного апарату обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розроблення методики обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем з урахуванням особливостей функціонування таких систем. Це дасть можливість приймати обґрунтовані рішення щодо призначення такого обсягу і виду резерву окремих функціональних елементів, який забезпечить виконання бойових завдань.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- розробити алгоритм обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС;
- розробити процедуру визначення виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС.

4. Матеріали і методи дослідження процесу обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем

Для проведення розрахунків використовувалась програма Microsoft Excel 2010 (корпорація Microsoft, США).

Для оцінювання стійкості функціонування РВС у військовій (бойовій) операції використовувались методи теорії надійності [19–21].

Зокрема для розрахунку стійкості функціонування невідновлюваної РВС із включеним резервом структурно-функціональних елементів – метод розрахунку імовірності безвідмовної роботи невідновлюваної системи з навантаженим резервом [19–21].

Вихідними даними для цього методу є: загальна кількість окремих структурно-функціональних елементів (n), інтенсивність потоку відмов (λ), час проведення військової (бойової) операції (час функціонування РВС) (t), кількість резервних елементів (n_e).

Загальний вигляд структурної схеми надійності РВС із включеним резервом структурно-функціональних елементів сформований на підставі матеріалу з [19] та приведений на рис. 1.

Відповідно розрахунок імовірності безвідмовної роботи РВС із включеним резервом структурно-функціональних елементів розраховується за формулою [17–19]:

$$P(t)_{r,ar} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{n_e+1}, \quad (1)$$

Для розрахунку стійкості функціонування РВС із резервом структурно-функціональних елементів заміщенням – метод розрахунку імовірності безвідмовної роботи невідновлюваної системи з ненавантаженим резервом (passive redundancy) [19, 20].

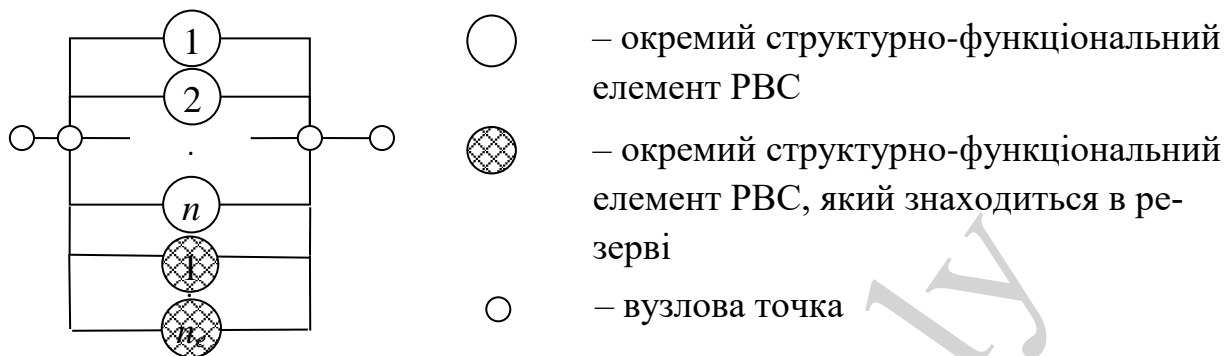


Рис. 1. Структурна схема надійності РВС із включеним резервом структурно-функціональних елементів (active redundancy)

Вихідними даними для цього методу є такі ж, як і для методу розрахунку імовірності безвідмовної роботи РВС із включеним резервом.

Загальний вигляд структурної схеми надійності РВС із резервом структурно-функціональних елементів заміщенням сформований на підставі матеріалу з [19] та приведений на рис. 2.

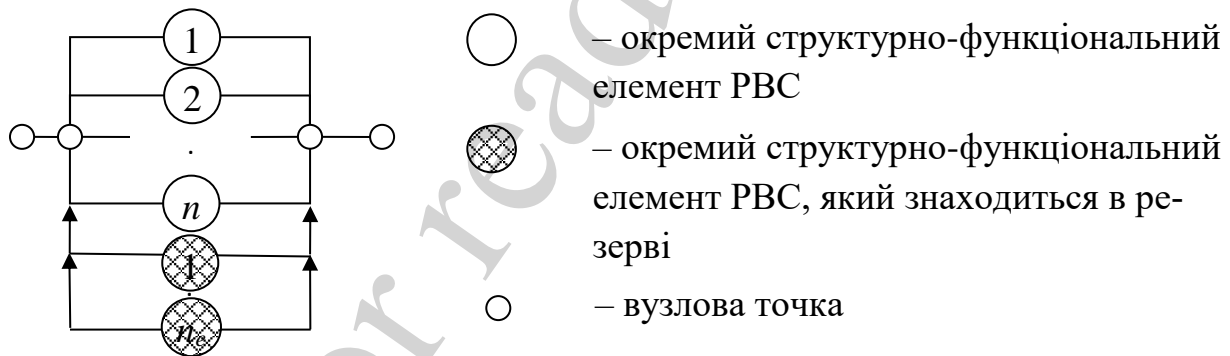


Рис. 2. Структурна схема надійності РВС із резервом структурно-функціональних елементів заміщенням (passive redundancy)

Відповідно розрахунок імовірності безвідмовної роботи РВС із резервом структурно-функціональних елементів заміщенням розраховується за формулою [19–21]:

$$P(t)_{r,pr} = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n_e} \frac{(\lambda t)^i}{i!}, \quad (2)$$

Для оцінки живучості (survivability), як складової стійкості функціонування РВС з різними структурно-функціональними схемами, використовується метод послідовного перебору [20]. Сутність методу полягає у порівнянні коефіцієнтів працездатності декількох структурно-функціональних схем шляхом послідовної перевірки системи на живучість при послідовній відмові елементів системи. Візуальне відображення застосування цього методу пропонується представити у вигляді таблиці коефіцієнтів працездатності для двох схем (табл. 1).

Таблиця 1
Коефіцієнти працездатності РВС (для двох схем)

№ стану	Елементи системи			Втрати		Коефіцієнт працездатності K_j	
	1	...	n	Схема 1	Схема 2	Схема 1	Схема 2
1	0		1	$l_{1,1}$	$l_{2,1}$	$K_{1,1}$	$K_{2,1}$
·	·	...	·	·	·	·	·
n_j	1	...	0	$l_{1,j}$	$l_{2,j}$	$K_{1,j}$	$K_{2,j}$

Показником живучості РВС у цьому методі є математичне очікування кількості працездатних елементів [20]:

$$M_s = \sum_{j=1}^n K_j P_j, \quad (3)$$

де M_s – математичне очікування кількості працездатних елементів системи; K_j – коефіцієнт працездатності системи в j -тому стані, його визначають за формулою $K_j = \frac{n_{w,j}}{n}$ [20]; $n_{w,j}$ – кількість працездатних елементів системи; n – загальна кількість елементів системи; n_j – кількість j -тих станів системи; P_j – імовірність j -того стану системи, визначається за формулою [21]:

$$P_j = 1 - C_n^l q^l (1 - q)^{n-l}, \quad (4)$$

l – кількість одночасних відмов по елементам системи; q – імовірність відмови елемента системи.

У дослідженні розглядається узагальнена структурно-функціональна схема РВС. Тобто застосування розробленої методики можливе для будь-якого типу РВС, яка має три підсистеми (розвідки, управління, вогневого впливу). Більш того, в методиці передбачена можливість урахування специфіки застосування РВС через зміну величин показників.

Стосовно обмежень, зважаючи на специфіку застосування РВС (зокрема під час проведення військових (бойових) операцій), можна прийняти умову, що РВС є не відновлюваною системою.

Ще одним обмеженням є врахування відмов, викликаних технічними несправностями та відмов, викликаних впливом противника. Тобто інтенсивність відмов буде складатися з двох компонентів. Однак в межах дослідження пропонується враховувати один показник – інтенсивність відмов.

Також за обмеження пропонується прийняти що час функціонування РВС рівний часу проведення військової (бойової) операції.

Ще одним обмеженням є те, що потік відмов підпорядковується експоненційному закону розподілу випадкових величин та є найпростішим.

5. Результати дослідження процесу обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем

5.1. Розробка алгоритму обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС

Вхідними даними для цього алгоритму є кількість та інтенсивності відмов структурно-функціональних елементів підсистем, час функціонування (прогнозуемий), заданий рівень імовірності безвідмовного функціонування, кількість можливих структурно-функціональних зв'язків між окремими елементами РВС.

На першому кроці алгоритму пропонується проводити побудову структурно-функціональних схем РВС. Загалом РВС складається із трьох підсистем – розвідки, управління та вогневого впливу [22, 23]. Однак, не зважаючи на різні функціональні призначення, елементи цих підсистем можуть об'єднуватись на локальному рівні. Означене забезпечує можливість без зміни кількості окремих елементів та функціональних зв'язків створювати різні структурно-функціональні схеми.

На наступному кроці пропонується проводити вибір структурно-функціональної схеми із найкращими показниками живучості. Такий вибір пропонується проводити за допомогою методу послідовного перебору.

Структурно цей блок включає декілька субблоків. До таких відносяться субблоки: визначення коефіцієнту працездатності системи у певному стані, визначення імовірності певного стану системи, визначення математичного очікування кількості працездатних елементів системи певної схеми за формулою (3).

Причому, визначення коефіцієнту працездатності проводиться з урахуванням підсистем РВС. Також врахування особливостей підсистем проводиться і при визначенні імовірності певного стану системи (4). Так, враховуються як кількість окремих функціональних елементів по підсистемам розвідки (n_r), управління (n_c), вогневого впливу (n_f), так і інтенсивності їх відмов: розвідки (λ_r), управління (λ_c), вогневого впливу (λ_f). Відповідно результуюча імовірність певного стану буде розраховуватись за формулою:

$$P_j = P_r P_c P_f, \quad (5)$$

де, P_r – імовірність перебування у певному стані підсистеми розвідки; P_c – імовірність перебування у певному стані підсистеми управління; P_f – імовірність перебування у певному стані підсистеми вогневого впливу.

Також до цього блоку відноситься субблок перевірки умови відповідності значення розрахованого математичного очікування заданому. У випадку, коли розраховане значення менше заданого, переходять до блоку 3 для вибору іншої структурно-функціональної схеми. У іншому випадку переходять до блоку 8 для побудови схем надійності за відповідною структурно-функціональною схемою. Побудова такої схеми проводиться по ділянках у залежності від особливостей застосування РВС в операції.

Наступним етапом є розрахунок імовірностей безвідмовного функціонування РВС відповідно до ділянок із різними видами резервування за формулами (1), (2).

На наступному етапі проводиться розрахунок результуючої імовірності безвідмовного функціонування РВС за відомою залежністю [19–21]:

$$P(t)_{r,res} = \prod_{\gamma=0}^Z P(t)_{r,\gamma}, \quad (6)$$

де γ – номер ділянки схеми надійності РВС з певним видом резервування; Z – кількість ділянок схеми надійності РВС з певним видом резервування.

Причому для ділянок з послідовним з'єднанням окремих функціональних елементів імовірності безвідмовного функціонування РВС визначається так, як зазначено у [19–21]:

$$P(t)_{r,series} = \prod_{i=0}^n P(t)_{r,i}, \quad (7)$$

для паралельного з'єднання [19–21]:

$$P(t)_{r,paralel} = 1 - \prod_{i=0}^n (1 - P(t)_{r,i}), \quad (8)$$

де γ – номер ділянки схеми надійності РВС з певним видом резервування; Z – кількість ділянок схеми надійності РВС з певним видом резервування.

Наступним є блок перевірки умов відповідності імовірності безвідмовного функціонування РВС результуючої та заданої. У випадку, коли означена умова не виконується, необхідно перейти до зміни схеми надійності РВС. В іншому випадку алгоритм переходить до блоку отримання результатів розрахунків.

Загальний вигляд блок-схеми алгоритму обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС, що пропонується, представлений на рис. 5.

Таким чином, розроблено алгоритм обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС у вигляді блок-схеми (рис. 5). Зазначений алгоритм слугує для обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС з урахуванням особливостей функціонування таких систем.

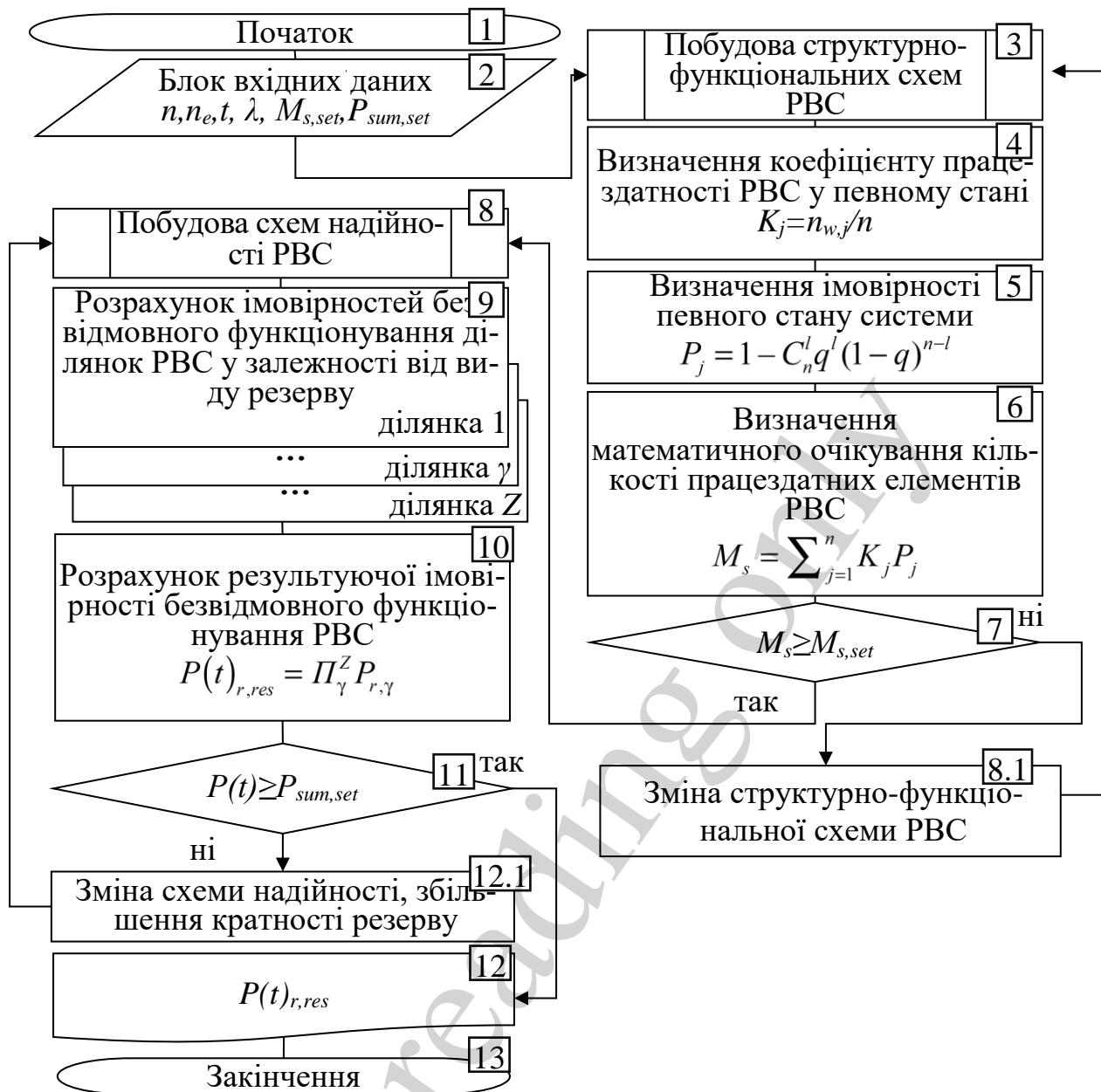


Рис. 5. Загальний вигляд блок-схеми алгоритму обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів розвідувально-вогневих систем

5. 2. Розробка процедури визначення виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС

Вихідна обстановка для розробки процедури визначення виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС для одного типу РВС при конкретних умовах бойових дій (операції) включає данні: за свої війська, противника та умови обстановки.

За основу взято проведення операції оперативного рівня.

Данні за свої війська з питань виконання завдань РВС: тип розвідувальних засобів – безпілотні літальні апарати (БПЛА) А1-СМ «Фурія», кількість БПЛА – $n_r=3$; кількість резервних БПЛА, виділених старшим начальником – $n_{e,r}=3$. Тип засобів управління – апаратно-програмний комплекс автоматизованого уп-

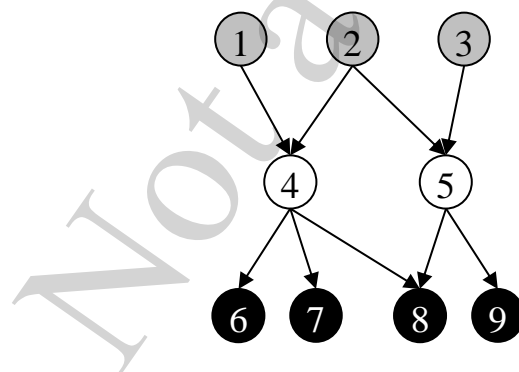
равління вогнем артилерійського підрозділу «ArtOS»; кількість комплексів – $n_c=2$; кількість резервних комплексів, виділених старшим начальником – $n_{e,c}=2$. Тип засобів вогневого впливу – 122-мм гаубиця Д-30; кількість гаубиць – $n_f=4$; кількість резервних гаубиць, виділених старшим начальником – $n_{e,c}=3$.

Данні за противника: противник має на озброєнні артилерійські системи: 122-мм гаубиця Д-30 до батареї, 152-мм пушка-гаубиця Д-20 до взводу. Засоби протиповітряної оборони противника: зенітна установка калібру 23 мм, ЗУ 23-2 до 2 одиниць, переносні зенітно-ракетні комплекси «Ігла-1» 9К310 до 2 одиниць. Засоби радіоелектронної боротьби: автоматизована станція перешкод Р-330Ж «Житель» – одна одиниця. Узагальнення даних, свідчить що інтенсивність виконання завдань противником, може призвести до таких інтенсивностей відмов від виконання завдань наявними силами і засобами розвідки – $\lambda_r=0,5$; управління – $\lambda_c=0,2$; вогневого впливу – $\lambda_f=0,5$ відмов/год.

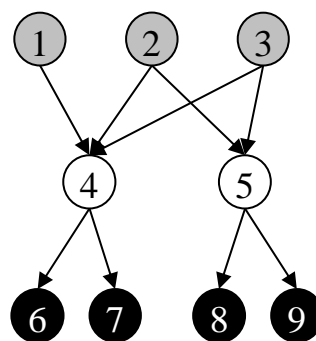
Дані за умови обстановки: узагальненні данні свідчать, що досягнення мети операції щодо подавлення сил противника, необхідно – $t=5$ год. Причому кількість придатних до виконання завдань за призначенням засобів РВС визначається через встановлений рівень математичного очікування кількості працездатних елементів РВС $M_{s,set}=5$. До того ж, для гарантованого виконання бойових завдань здатність до виконання завдань повинна становити не нижче $P_{r,set}=0,8$.

На першому етапі розробки процедури пропонується скласти структурно-функціональні схеми РВС за вихідними даними.

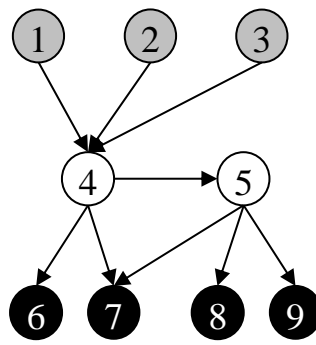
Загальний вигляд структурно-функціональних схем РВС, побудованих в межах умов прикладу за різними варіантами, приведений на рис. 6.



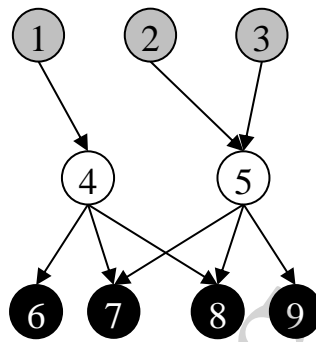
a



б



a



b

Рис. 6. Загальний вигляд структурно-функціональних схем розвідувально-вогневих систем побудованих за різними варіантами: *a* – з концентрацією на підсистемі вогневого впливу; *b* – з концентрацією на підсистемі розвідки; *в* – з концентрацією функцій на одному пункті управління; *г* – з підсиленою концентрацією на підсистемі вогневого впливу; ○ – окремий функціональний елемент підсистеми управління; ● – окремий функціональний елемент підсистеми вогневого впливу; ◐ – окремий функціональний елемент підсистеми розвідки

Застосовуючи метод послідовного перебору (табл. 1), розраховано коефіцієнти працездатності за кожним станом та за кожним варіантом структурно-функціональних схем РВС (табл. 2) та за вихідними даними прикладу.

Розрахунок імовірності певного стану системи проводиться за формулою (4) причому для кожної підсистеми (розвідки, управління, вогневого впливу) окремо. Результати розрахунків занесені у табл. 3–6.

Усі із запропонованих структурно-функціональних схем РВС відповідають заданій умові. Однак найкращий результат в схемі (*a*). Тому подальші розрахунки проводитимуться відносно неї.

Загальний вигляд схем надійності для умов прикладу з навантаженим (*a*), з ненавантаженим (*b*) та з змішаним (*в*) резервами, побудованих авторами, висвітлений на рис. 7.

Таблиця 2

Результати визначення коефіцієнтів працездатності схем, рис. 6, а–г

№ стану, j	Елементи системи									Кількість одночасних відмов, l				Коефіцієнт працездатності по схемам, K_j			
	Розвідка			Управління		Вогневий вплив				a	\bar{b}	\bar{v}	\bar{z}	a	\bar{b}	\bar{v}	\bar{z}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9								
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	0.89	0.89	0.89	0.67
2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.78	0.78	0.89	0.89
3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.89	0.89	0.89	0.89
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	3	3	9	3	0.67	0.67	0	0.67
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	3	4	3	4	0.67	0.56	0.67	0.56
6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0.89	0.89	0.89	0.89
7	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0.89	0.89	0.89	0.89
8	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0.89	0.89	0.89	0.89
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0.89	0.89	0.89	0.89

Таблиця 3

Результати визначення імовірності працездатного стану системи для кожної підсистеми за схемою (а)

Номер стану, j	Кількість одночасних відмов, l	Імовірності працездатного стану системи			
		Розвідки, P_r	Управління, P_c	Вогневого впливу, P_f	Результуюча, P_j
1	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
2	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
3	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
4	3	0.98145	0.53491	0.99797	0.524
5	3	0.98145	0.53491	0.99797	0.524
6	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
7	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
8	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
9	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862

Примітка: Відповідно математичне очікування кількості працездатних елементів РВС (3) становить $M_3=5.94$

Використовуючи формули (6)–(8) було складено загальну розрахункову залежність визначення імовірності безвідмовного функціонування РВС для схем надійності висвітлених на рис. 7.

$$P_{r,res} = 1 - \left(1 - \left(1 - \left(1 - P_1\right)\left(1 - P_2\right)\right)P_4\left(1 - \left(1 - P_6\right)\left(1 - P_7\right)\right)\right) \times \left(1 - \left(1 - \left(1 - P_2\right)\left(1 - P_3\right)\right)P_5\left(1 - \left(1 - P_8\right)\left(1 - P_9\right)\right)\right). \quad (9)$$

Відповідно до формули розрахунку імовірності безвідмовного функціонування РВС з навантаженим резервом (1), розрахункова залежність (9) набуває наступного вигляду:

$$P(t)_{r,res} = 1 - \left[\left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_r t} \right)^2 \right) \right) \right) \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_c t} \right)^2 \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_f t} \right)^2 \right) \right) \right) \right] \times \\ \times \left[\left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_r t} \right)^2 \right) \right) \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_c t} \right)^2 \right) \left(1 - \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_f t} \right)^2 \right) \right) e^{-\lambda_f t} \right]. \quad (10)$$

Таблиця 4

Результати визначення імовірності працездатного стану системи для кожної підсистеми за схемою (б)

Номер стану, j	Кількість одночасних відмов, l	Імовірності працездатного стану системи			
		Розвідки, P_r	Управління, P_c	Вогневого впливу, P_f	Результуюча, P_j
1	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
2	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
3	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
4	3	0.98145	0.53491	0.99797	0.524
5	4	0.98145	0.53491	0.96594	0.507
6	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
7	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
8	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
9	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862

Примітка: Відповідно математичне очікування кількості працездатних елементів РВС(3) становить $M_s=5.93$

Таблиця 5

Результати визначення імовірності працездатного стану системи для кожної підсистеми за схемою (в)

Номер стану, j	Кількість одночасних відмов, l	Імовірності працездатного стану системи			
		Розвідки, P_r	Управління, P_c	Вогневого впливу, P_f	Результуюча, P_j
1	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
2	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
3	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
4	9	0.22659	0.60042	0.29008	0.039
5	3	0.99945	0.53491	0.96594	0.516
6	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
7	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
8	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
9	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862

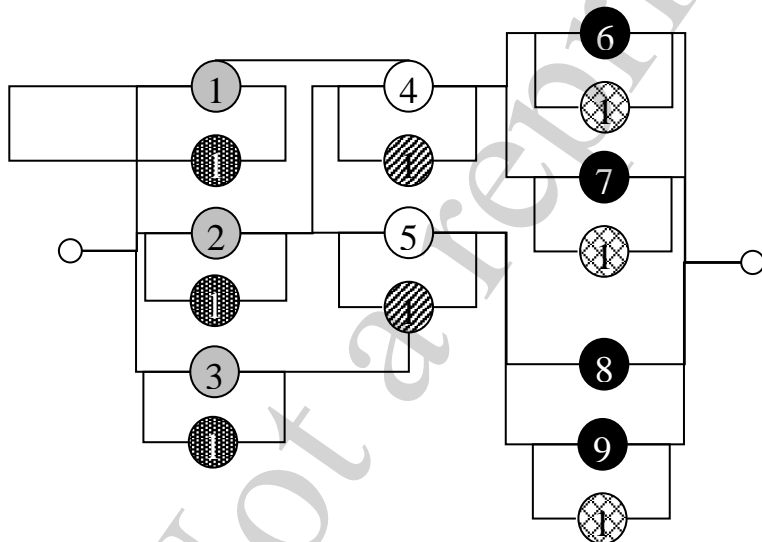
Примітка: Відповідно математичне очікування кількості працездатних елементів РВС (3) становить $M_s=5.62$

Таблиця 6

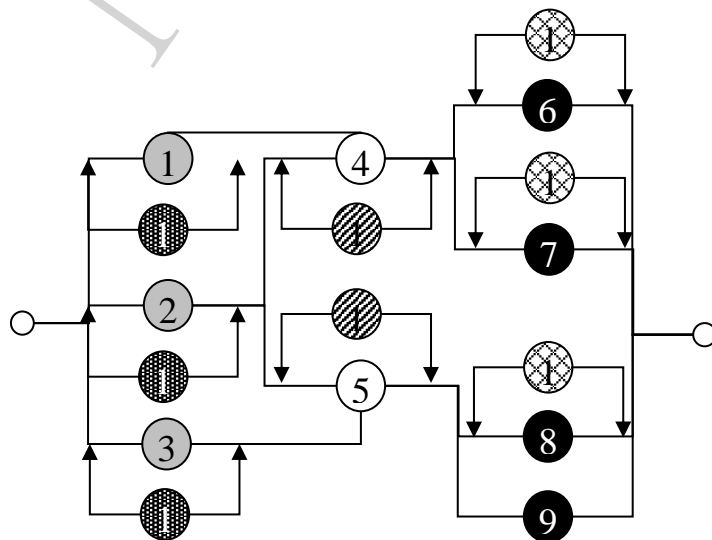
Результати визначення імовірності працездатного стану системи для кожної підсистеми за схемою (з)

Номер стану, j	Кількість одночасних відмов, l	Імовірності працездатного стану системи			
		Розвідки, P_r	Управління, P_c	Вогневого впливу, P_f	Результуюча, P_j
1	2	0.98145	0.53491	0.99797	0.524
2	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
3	1	0.98145	0.86466	0.99995	0.849
4	3	0.98145	0.53491	0.99797	0.524
5	4	0.79251	0.53491	0.99797	0.423
6	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
7	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
8	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862
9	1	0.99945	0.86466	0.99797	0.862

Примітка: Відповідно математичне очікування кількості працездатних елементів РВС (З) становить $M_s=5.59$



a



б

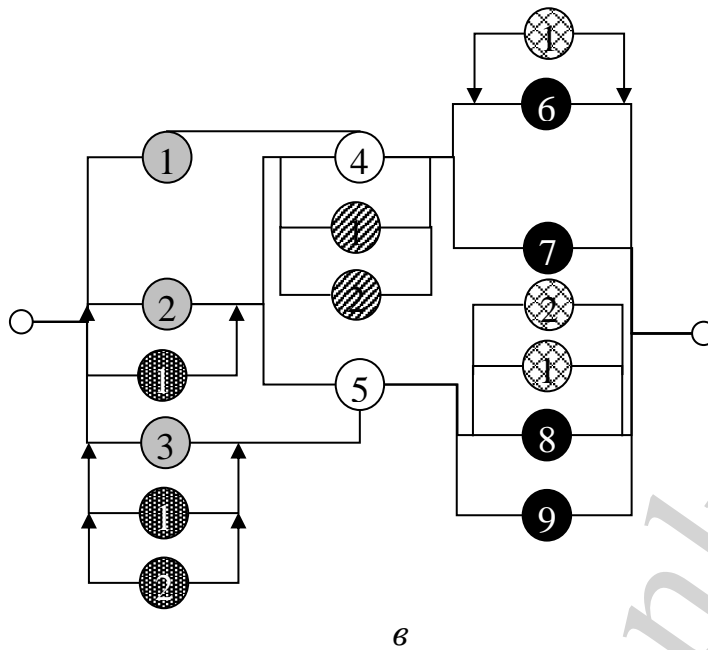


Рис. 7. Загальний вигляд схем надійності РВС резервованих за різними варіантами: *a* – навантажений резерв, *б* – ненавантажений резерв, *в* – змішаний резерв;

- – окремий структурно-функціональний елемент підсистеми розвідки;
- – окремий структурно-функціональний елемент підсистеми управління;
- – окремий структурно-функціональний елемент підсистеми вогневого впливу;
- – окремий структурно-функціональний елемент підсистеми розвідки, який знаходиться у резерві; ● – окремий структурно-функціональний елемент підсистеми розвідки, який знаходиться у резерві; ● – окремий структурно-функціональний елемент підсистеми вогневого впливу, який знаходиться у резерві; ● – окремий структурно-функціональний елемент підсистеми вогневого впливу, який знаходиться у резерві; ○ – вузлова точка

Застосовуючи розрахункову залежність (2) у формулі (9) для варіанту (*б*) рис. 7, формула набуде вигляду:

$$P(t)_{r,res} = 1 - \left(\begin{aligned} & \left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(e^{-\lambda_r t} \sum_{i=0}^2 \frac{(\lambda_r t)^i}{i!} \right) \right) \right) \right) \left(e^{-\lambda_c t} \sum_{i=0}^2 \frac{(\lambda_c t)^i}{i!} \right) \times \\ & \times \left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(e^{-\lambda_f t} \sum_{i=0}^2 \frac{(\lambda_f t)^i}{i!} \right) \right) \right) \right) \end{aligned} \right) \quad (11)$$

$$\left(\begin{aligned} & \left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(e^{-\lambda_r t} \sum_{i=0}^2 \frac{(\lambda_r t)^i}{i!} \right) \right) \right) \right) \left(e^{-\lambda_c t} \sum_{i=0}^2 \frac{(\lambda_c t)^i}{i!} \right) \times \\ & \times \left(1 - \left(1 - \left(1 - \left(e^{-\lambda_f t} \sum_{i=0}^2 \frac{(\lambda_f t)^i}{i!} \right) \right) \right) \right) (1 - e^{-\lambda_f t}) \end{aligned} \right),$$

Відповідно для варіанту (в) рис. 7 формула (9) при використанні формул (1) і (2) набуде наступного вигляду:

$$P(t)_{r,res} = 1 - \left(\begin{aligned} & \left(1 - \left(1 - (1 - e^{-\lambda_r t}) \left(1 - e^{-\lambda_r t} \sum_{i=0}^1 \frac{(\lambda_r t)^i}{i!} \right) \right) \right) \times \\ & \times \left(1 - (1 - e^{-\lambda_c t})^3 \right) \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_f t} \sum_{i=0}^1 \frac{(\lambda_f t)^i}{i!} \right) (1 - e^{-\lambda_f t}) \right) \end{aligned} \right) \quad (12)$$

$$\left(\begin{aligned} & \left(1 - \left(1 - \left(1 - e^{-\lambda_r t} \sum_{i=0}^1 \frac{(\lambda_r t)^i}{i!} \right) \right) \left(1 - e^{-\lambda_r t} \sum_{i=0}^2 \frac{(\lambda_r t)^i}{i!} \right) \right) \times \\ & \times e^{-\lambda_c t} \left(1 - \left(1 - (1 - e^{-\lambda_f t})^3 \right) (1 - e^{-\lambda_f t}) \right) \end{aligned} \right),$$

Результати розрахунків для відповідних умов за формулами (10)–(12) внесені у табл. 7.

Результати аналізу даних з табл. 7 свідчать, що ні при одному із видів резервування досягнути рівня заданої імовірності безвідмовного функціонування неможливо. Тому проведено збільшення кратності резерву по кожному елементу на 2 (рис. 8). Результати розрахунків висвітлені у табл. 8 та рис. 9.

У табл. 8 та на рис. 9 представлені результати визначення імовірності безвідмовного функціонування РВС за різними схемами при збільшенні кратності резерву на 2. Тип РВС – трьохкомпонентний, тобто означена система включає підсистеми розвідки, управління та вогневого впливу. Причому розрахунки враховують типи окремих функціональних елементів через величини показників їх характери-

стик. Тобто, це, окрім випадку наведеному у прикладі, може бути застосовано до РВС тактичного, оперативного або стратегічного призначення, а також наземного, повітряного або морського базування.

Таблиця 7

Результати визначення імовірності безвідмовного функціонування РВС за різними схемами

Час функціонування, год	Імовірності безвідмовного функціонування РВС при певному видіві резерву		
	Навантажений (а)	Ненавантажений (б)	Змішаний (в)
5	0.087995	0.115044	0.15496
4.5	0.136276	0.181672	0.21927
4	0.229439	0.276118	0.30233
3.5	0.349689	0.400519	0.40425
3	0.504267	0.549267	0.5217
2.5	0.677637	0.705633	0.64711
2	0.836876	0.843764	0.76914
1.5	0.945184	0.939637	0.87473
1	0.991068	0.986395	0.95172
0.5	0.999695	0.999084	0.99206

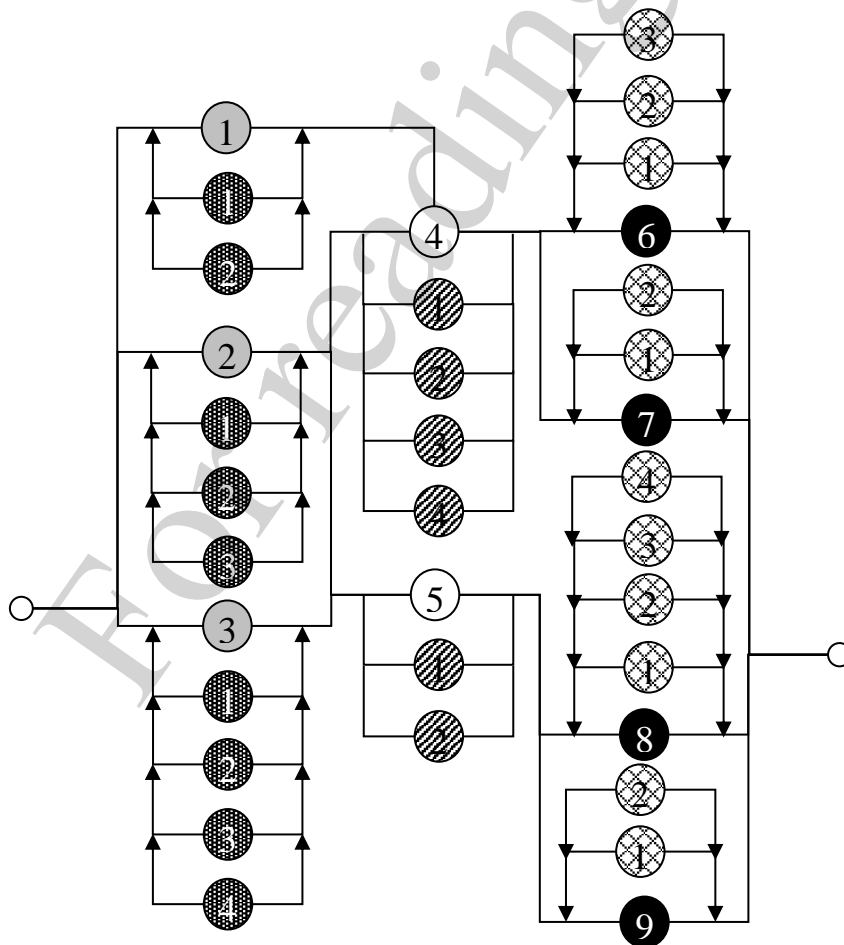


Рис. 8. Загальний вигляд схеми надійності РВС зі змішаними видами резерву та із збільшеною кратністю резерву по кожному елементу на 2.

Умовами моделювання процесу функціонування РВС, при яких отримано графічні залежності (рис. 9), є проведення військової (бойової) операції з активною протидією противника. Параметри відмов окремих функціональних елементів підсистем розвідки, управління, вогневого впливу вказані у вихідних даних, через інтенсивності відмов. Загальна кількість засобів розвідки, управління та вогневого впливу також вказані у вхідних даних. Особливістю моделювання є те, що штучно створена критична ділянка через зменшення окремих функціональних елементів (підсистема управління). Це зроблено для перевірки методики на здатність вирішувати завдання визначення обсягу та виду резерву у незбалансованих системах.

Таблиця 8

Результати визначення імовірності безвідмовного функціонування РВС за різними схемами при збільшенні кратності резерву на 2

Час функціонування	Імовірності безвідмовного функціонування РВС при певному виді резерву		
	Навантажений (а)	Ненавантажений (б)	Змішаний (в)
5	0.212691	0.53254	0.81545
4.5	0.32161	0.65337	0.88846
4	0.46206	0.76653	0.94117
3.5	0.62308	0.86065	0.97393
3	0.77997	0.92859	0.99079
2.5	0.9019	0.96992	0.99759
2	0.9708	0.99027	0.99958
1.5	0.995375	0.99787	0.99996
1	0.99975	0.99977	0.99999
0.5	0.99999	0.99999	1

Загальний вигляд алгоритму роботи посадових осіб при плануванні операції приведений на рис. 10.

Аналіз алгоритму роботи посадових осіб при плануванні операції (бою) свідчить, що включення методики обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів ВС дозволить зменшити невизначеність при плануванні. Також ця методика дозволить оптимізувати кількість засобів розвідки, управління та вогневого впливу для умов проведення саме цієї операції (бою).

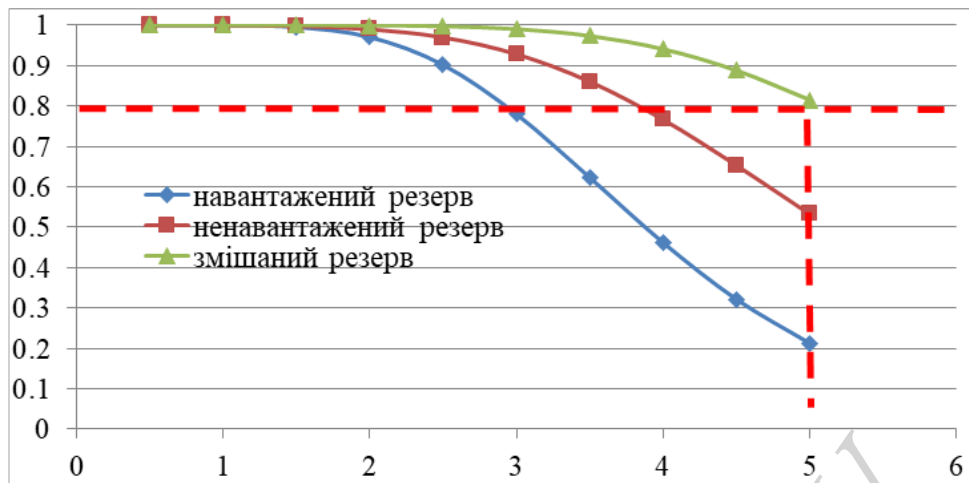


Рис. 9. Графік залежності імовірності безвідмовного функціонування із різними видами резерву від часу функціонування

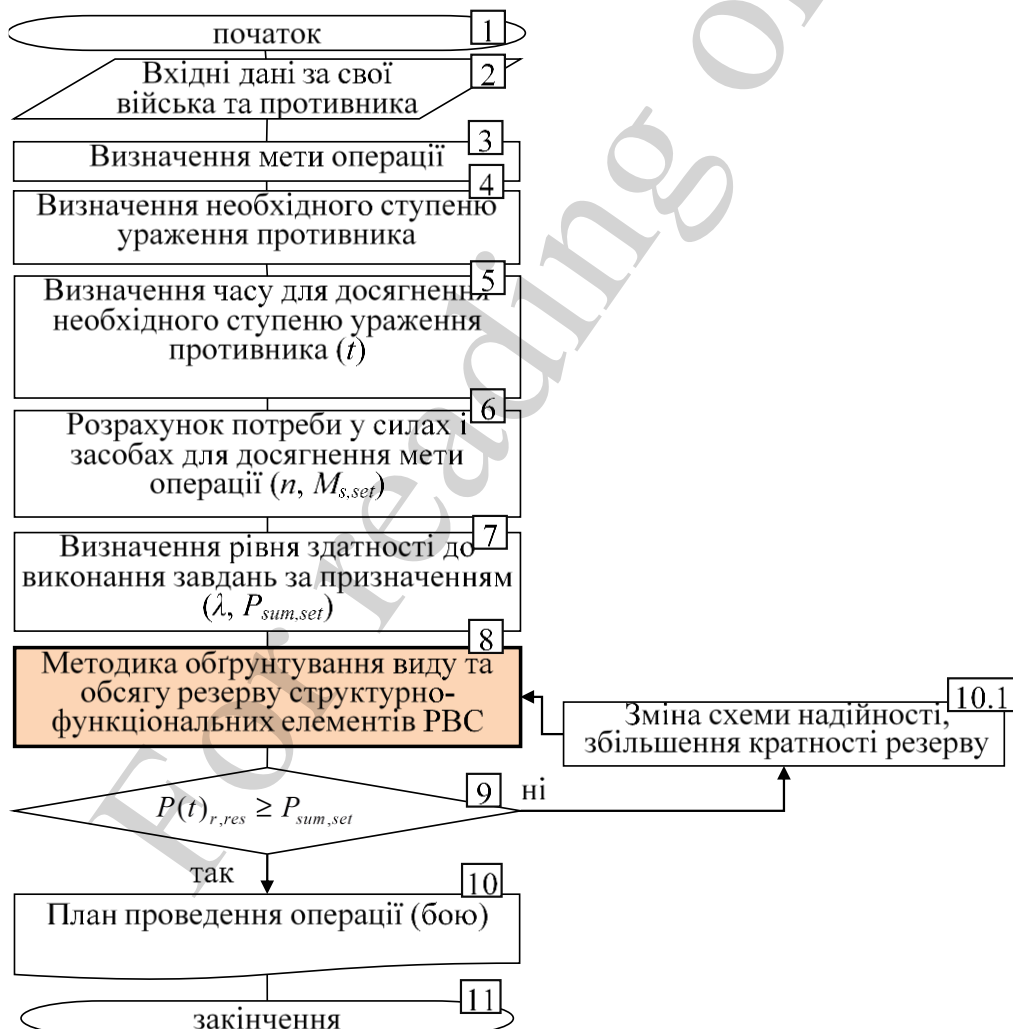


Рис. 10. Алгоритм роботи посадових осіб при плануванні операції (бою) з використанням методики обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС

6. Обговорення результатів розроблення методики обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів

Аналіз результатів свідчить, що досягнення поставленого завдання, зокрема щодо заданої імовірності безвідмовного функціонування РВС відбувається при змішаному видові резерву. Причому надаючи перевагу ненавантаженому резерву, використовуючи навантажений лише до критичних елементів – окремих-функціональних елементів підсистеми управління. Перевага змішаного виду резерву над ненавантаженим резервом становить 28 %.

Такі результати пояснюються комплексним підходом до врахування особливостей функціонування кожної із підсистем РВС. До того ж різниця між навантаженим і ненавантаженим резервом пояснюється тим, що навантажений резерв залишається в умовах впливу факторів, які можуть призвести до відмови. До таких факторів відноситься технічне напрацювання, вплив противника, вплив умов функціонування.

Загалом же в ході розробки процедури визначення виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС виявлено, що методика сформована на основі цієї процедури та алгоритму може забезпечити обґрунтований вибір виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС з урахуванням особливостей функціонування таких систем.

Практична складова цього дослідження обумовлена використанням розробленої методики обґрунтування виду та обсягу резерву у практиці бойового застосування військ (сил). Безпосередньо цю методику доцільно застосовувати під час планування бою (операції). Так, у залежності від рівня бойових дій, вхідні данні формуються під час визначення необхідного ступеню ураження противника, що дасть можливість визначити часу для досягнення цього ступеню. Відповідно, можливо визначити час проведення операції, що є вхідною величиною. До того ж, ступінь вогневого ураження противника дозволить визначити потребу у силах і засобах, що сформує вихідні данні щодо кількості засобів розвідки, управління та вогневого впливу. А також дасть можливість встановити рівень математичного очікування кількості працездатних елементів РВС. На наступному етапі проводиться аналіз можливостей засобів розвідки, управління та вогневого впливу як своїх військ, так і противника, що дасть можливість визначити характеристики функціонування цих систем. Узагальнення характеристик дозволить визначити інтенсивності відмов зазначених засобів та рівень здатності до виконання завдань за призначенням, тобто встановити допустимий рівень імовірності безвідмовного функціонування РВС. На наступному етапі проводиться обґрунтування виду та обсягу резерву засобів підсистем РВС за допомогою запропонованої у роботі методики. Причому, у випадку не досягнення потрібного рівня імовірності безвідмовного функціонування РВС, збільшується кратність резерву.

У статті запропоновано алгоритм обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС з урахуванням особливостей функціонування таких систем (рис. 5). Означений алгоритм базується на компонентів методів оцінювання живучості та методів оцінювання надійності. Таке

компонування проведено для підвищення ефективності означених методів та зменшення невизначеності при проведенні розрахунків.

До особливостей застосування РВС, які враховані в означеній методиці відноситься – виконання різнотипових задач окремими функціональними елементами (розвідка, управління, вогневий вплив). Ця особливість врахована через застосування найбільш доцільних видів резервування (рис. 1, 2, формули (6)–(8)). Ще однією особливістю є функціонування в умовах впливу противника, це враховано через перевірку рівня живучості РВС перед перевіркою надійності функціонування (табл. 1, формули (3)–(5)).

Перевагами цього алгоритму є те, що визначення надійності функціонування РВС відбувається комплексно із визначенням живучості, що дозволяє зменшити невизначеність при розгляді РВС. Також означений алгоритм дозволяє визначити таку структурно-функціональну схему, яка б відповідала заданим рівням показників живучості та надійності функціонування (рис. 5, блоки 7 та 11). Окрім того, означений алгоритм дозволяє враховувати різні види резервування, зокрема: навантажений та ненавантажений резерви (рис. 5, блок 9).

Відносно обмежень застосування алгоритму обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС (рис. 5) слід зазначити, що означений алгоритм застосовується у випадку коли РВС уражає одну ціль. Тобто, метою функціонування РВС є ураження однієї цілі. Ще одне обмеження стосується того, що всі структурно-функціональні елементи певної підсистеми є однаковими.

Недоліком цього алгоритму є недосконалість процедури визначення важливості окремих організаційно-функціональних елементів підсистем. Тобто важливість означених елементів необхідно визначати за іншою методикою, що певним чином ускладнює роботу. Однак це може бути напрямком подальших досліджень.

Наступним завданням дослідження було розробити процедуру визначення виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС. Отриманим результатом є визначений найбільш доцільний вид резервування – змішаний (рис. 8, 9, табл. 8). Означений результат базується на застосуванні алгоритму обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС та komponуванні методів оцінювання живучості та методів оцінювання надійності функціонування.

Загалом означений результат дозволяє подолати проблему, пов'язану з суттєвою невизначеністю при виборі виду та обсягу резерву.

Перевагами цього результату є можливість кількісно оцінити перевагу певного виду резервування над іншим (рис. 9, табл. 8).

Обмеженням є те, що означений результат можна застосовувати лише для умов описаних в умовах. Хоча проведення дослідження інших варіантів структурно-функціональних схем РВС дозволить створити статистичну вибірку для узагальнених висновків. Означене може бути подальшим напрямком досліджень.

Недоліком можна вважати, що означений результат не враховує інші підвиди резервування, зокрема такі, як мажоритарне, ковзаюче і т. п.

Загалом же сукупність зазначених результатів свідчить про розроблення методики обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС з урахуванням особливостей функціонування таких систем. Означена методика включає алгоритм (рис. 5), методи оцінювання живучості та методи оцінювання надійності функціонування. Ця методика перевірена на працездатність шляхом розгляду прикладу обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС (рис. 8, табл. 8) та отримання адекватного результату (рис. 9), підтвердженого досвідом застосування РВС в останніх збройних конфліктах.

У цілому отримання цього наукового результату дозволяє подолати недоліки, які виявлені як у практичній площині, так і в теоретичній.

Щодо переваг цієї методики, необхідно зазначити відносну його простоту. Цю методику можна використовувати без додаткової формалізації для споживача. До того ж, ця методика не передбачає спеціальних навичок дослідника для його використання. Також перевагою цієї методики є її модульність, тобто здатність замінювати певні блоки іншими більш доцільними для умов певної операції.

Обмеження щодо застосування цієї методики полягають у тому, що її можна використовувати у випадку коли РВС уражає одну ціль. Ще одним обмеженням є те, що в межах підсистеми окремі функціональні елементи мають однакові параметри. Також, обмеженням є те, що час введення в дію резервного елемента є близьким до 0. Одним із важливих обмежень, є те, що потік відмов підпорядкований експоненційному закону розподілу випадкових величин.

У цілому щодо недоліків цієї методики, необхідно відмітити, що ця методика враховує певну сукупність видів резервування, що певною мірою обмежує дослідників. Також недоліком цієї методики є те, що важливість кожного окремого функціонального елемента необхідно визначати за окремо. Загалом подолання означених недоліків може бути напрямком подальших досліджень.

7. Висновки

1. Запропоновано алгоритм обґрунтування виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС з урахуванням особливостей функціонування таких систем. Сутність його полягає у структуризації кроків щодо оцінювання живучості РВС та на підставі обраного варіанту оцінювання надійності функціонування такої системи. Особливостями цього алгоритму є врахування характеристик окремих підсистем РВС, як то: управління, розвідки, вогневого впливу. Відмінними рисами цього алгоритму є таке компонування методів оцінювання живучості та методів оцінювання надійності функціонування систем, яке дозволить усунути існуючі недоліки цих методів. Зокрема таких, як невизначеність при формалізації вхідних даних, висока обчислювальна складність. Областю застосування цього алгоритму є обґрунтування видів та обсягів резерву окремих функціональних елементів РВС під час планування військових (бойових) операцій.

2. Запропоновано процедуру визначення виду та обсягу резерву структурно-функціональних елементів РВС. Також, визначено найбільш доцільний вид резервування для прийнятих умов – змішаний, з кратністю резервування окремих функціональних елементів не нижче 2. Для прийнятих умов різниця між змішаним

видом резерву та ненавантаженим резервом становить 28 %. Особливістю та відмінною рисою цього результату є його видове та кількісне значення. Завдяки такій особливості вдалось подолати проблему, сутність якої полягає у неможливості визначити обґрунтовану перевагу певної виду резервування окремих функціональних елементів РВС перед іншим. Область застосування цього результату – практичні дії командирів (начальників) при плануванні військових (бойових) операцій.

Література

1. Harris, C., Kagan, F. (2018). Introduction. Russia's military posture: ground forces order of battle. Institute for the Study of War, 9–11. URL: <https://www.jstor.org/stable/resrep17469>
2. Czuperski, M., Herbst, J., Higgins, E., Polyakova, A., Wilson, D. (2015). Hiding in plain sight: Putin's War in Ukraine. Atlantic Council. URL: <https://www.jstor.org/stable/resrep03631>
3. Майстренко, О. В., Бубенщиков, Р. В., Бондар, Р. В., Поплінський, О. В. (2018). Декомпозиція процесу вогневого ураження противника за допомогою методу побудови «дерева цілей». Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, 32 (2), 45–50. doi: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2018-32-2-45-50>
4. Nichol, J. (2009) Russia-Georgia Conflict in August 2008: Context and Implications for U.S. Interests. Congressional Research Service. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a496306.pdf>
5. Majstrenko, O. V., Prokopenko, V. V., Makeev, V. I., Ivanyk, E. G. (2020). Analytical methods of calculation of powered and passive trajectory of reactive and rocket-assisted projectiles. Radio Electronics, Computer Science, Control, 2, 173–182. doi: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-18>
6. Luttwak, E. N. (2001). Strategy: The Logic of War and Peace, Revised and Enlarged Edition. Harvard University Press, 320. doi: <https://doi.org/10.2307/j.ctv1c7zfsc>
7. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. URL: https://dnaop.com/html/2273/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_2860-94
8. Maistrenko, O., Ryzhov, Y., Khaustov, D., Tsybulia, S., Nastishin, Y. (2021). Decision-Making Model for Task Execution by a Military Unit in Terms of Queuing Theory. Military Operations Research, 26 (1), 59–70. URL: <https://www.jstor.org/stable/26995958>
9. Коваль, В. В. (2020). Удосконалена сукупність принципів застосування сил і засобів маскування військових об'єктів від технічних засобів повітряної розвідки та наведення зброї противника. Системи озброєння і військова техніка, 3 (63), 13–18. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.02>
10. Сівак, В., Клят, Ю. (2020). Удосконалений метод швидкого відновлення повітрянодесантної техніки та озброєння десантно-штурмових військ за критерієм забезпечення їхньої живучості. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки, 79 (1), 230–239. doi: <https://doi.org/10.32453/3.v79i1.109>
11. Кучеренко, Ю., Носик, А., Сімонов, С., Шубін, Є. (2020). Методика оцінки ефективності надійності функціонування автоматизованої системи

військового призначення, як складної організаційно-технічної системи. Системи озброєння і військова техніка, 3 (63), 24–30. doi: <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.63.04>

12. Медведєв, В. К., Кас'яненко, М. В., Коренівська, І. С. (2018). Підхід щодо оцінювання надійності функціонування автоматизованої системи управління „Ореанда-ПС”. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, 33 (3), 81–86. doi: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2018-33-3-81-86>

13. Креденцер, Б. П., Могилевич, Д. І., Кононова, І. В. (2017). Оцінка виграшу в надійності при комплексному використанні надлишковості в об'єктах телекомунікацій. Збірник наукових праць [Військового інституту телекомунікацій та інформатизації], 2, 48–57.

14. VINTR, Z., VALIS, D. (2008). Reliability Modelling of Automatic Gun with Pyrotechnic Charging. *Advances in Military Technology*, 3 (1), 33–42.

15. Mashkov, O. A., Sobchuk, V. V., Barabash, O. V., Dakhno, N. B. et. al. (2019). Improvement of variational-gradient method in dynamical systems of automated control for integro-differential models. *Mathematical Modeling and Computing*, 6 (2), 344–357. doi: <https://doi.org/10.23939/mmc2019.02.344>

16. Barabash, O., Dakhno, N., Shevchenko, H., Sobchuk, V. (2018). Integro-Differential Models of Decision Support Systems for Controlling Unmanned Aerial Vehicles on the Basis of Modified Gradient Method. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). doi: <https://doi.org/10.1109/msnmc.2018.8576310>

17. Мандзій, Б., Сенів, М., Куць, Б. (2013). Програмна реалізація моделі надійності відновлюваної технічної системи з постійним навантаженим резервом. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (9 (63)), 18–23. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/14843/12645>

18. Khudov, H., Glukhov, S., Maistrenko, O., Fedorov, A., Andriienko, A., Koplik, O. (2020). The Method of ADS-B Receiver Systems Synchronization using MLAT Technologies in the Course of Radar Control of Air Environment. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8 (5), 2002–2008. doi: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/87852020>

19. Беляев, Ю. К., Богатырев, В. А., Болотин, В. В. и др. (1985). Надежность технических систем. Москва: Радио и связь, 608.

20. Садчиков, П. И., Приходько, Ю. Г. (1983). Методы оценки надёжности и обеспечения устойчивости функционирования программ. Москва: Знание, 102.

21. Голинкевич, Т. А. (1985). Прикладная теория надёжности. Москва: Высшая школа, 168.

22. Щерба, А. А. (2014). Еволюція розвідувально-вогневої технології на основі мережецентричних принципів управління. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 4, 109–112.

23. Maistrenko, O., Khoma, V., Karavanov, O., Stetsiv, S., Shcherba, A. (2021). Devising a procedure for justifying the choice of reconnaissance-firing systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (109)), 60–71. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224324>