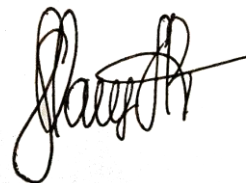


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Мащак Андрій Володимирович



УДК 629.039.58, 621.396.9

**МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ
РАДІОУПРАВЛІННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ**

05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Озірковський Леонід Деонісійович, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри «Теоретична радіотехніка та радіовимірювання»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Харченко Вячеслав Сергійович, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж


кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Сальник Юрій Павлович, Науковий центр сухопутних військ Національної академії сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, начальник науково-дослідного відділу

Захист відбудеться «5» лютого 2016 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «25» грудня 2015 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор*



А.П. Бондарев

Актуальність теми. При проектуванні радіоелектронних систем відповідального призначення (РСВП) недостатньо забезпечити високий рівень їх надійності, оскільки непрацездатність таких систем потенційно загрожує здоров'ю та життю людей, довкіллю, а також призводить до значних матеріальних збитків. Тому важливою задачею на етапі системотехнічного проектування є оцінка ризику експлуатації таких систем. Оцінка ризику експлуатації РСВП потребує докладного опису усіх процесів, ситуацій та чинників, які призводять до аварійної ситуації в результаті непрацездатності системи, і проводиться з метою формування рекомендацій для мінімізації з одного боку наслідків аварії, а з іншого боку – унеможливлення чи зменшення частоти виникнення аварій. Для розв'язання такої задачі необхідно здійснити розробку моделі поведінки РСВП високої складності. А це відповідно потребує використання методів побудови моделей з високим рівнем формалізації та автоматизації, оскільки для досягнення прийняттого рівня ризику потрібно розглядати багато варіантів реалізації РСВП. Відсутність таких засобів призводить до використання спрощених моделей поведінки і отримання недостовірних оцінок ризику, які в свою чергу призводять до реалізації неприйнятних з точки зору безпечності проектних рішень.

Оцінку ризику РСВП, до яких відносяться системи авіоніки і, зокрема, бортова навігаційно-обчислювальна система безпілотного літального апарата (БпЛА) котра входить до складу системи радіоуправління, на сьогоднішній день, здійснюють за допомогою таких методів: аналіз видів, наслідків та критичності несправностей Failure Mode, Effects and (Criticality) Analysis (FMEA/FMECA); аналіз дерева відмов (ДВ); аналіз діаграм бінарного рішення; імітаційного моделювання методом Монте-Карло. Окремі процедури побудови моделей надійності та оцінки ризику переліченими методами частково автоматизовані і реалізовані в спеціалізованих програмних продуктах таких виробників: A.L.D. Reliability Engineering Ltd. (Ізраїль), Reliasoft Corporation (США), PTC Windchill (США), ITEM Software (Великобританія, США), Isograph Ltd. (Великобританія, США).

Як показав огляд інформаційних джерел, питанням оцінки ризику та забезпечення надійності РСВП приділяється велика увага українських та зарубіжних науковців. Для детального дослідження критичності відмов та оцінки безпечності на сьогодні найбільш вживаним є аналіз видів, наслідків та критичності несправностей FMEA/FMECA, який регламентований рядом міжнародних стандартів (MIL-882, Fides Issue, Telcordia, MIL-217). Однак у сучасних методиках реалізації FMEA/FMECA аналізу автоматизованими є лише незначна частина процедур, а засобами автоматизації є різновид електронних таблиць, які заповнюються і перевіряються вручну. Також у цих методиках не передбачено врахування особливостей технічного обслуговування, зокрема обмежена кількість ремонтів, вплив використання відмовостійких конфігурацій, засобів контролю, діагностики та самодіагностики на достовірність оцінки ризику експлуатації РСВП.

У роботах Danhua Wang, F. Mhenni, M. Takeichi, Suiran Yu, Xiangyu Han представлено методи та моделі оцінки ризику експлуатації РСВП на основі

аналізу ДВ та FMEA/FMECA аналізу. Однак слід відзначити, що у представлених методах оцінка ризику є суб'єктивною, оскільки усі показники, які формують остаточні показники аналізу – Risk Priority Number (RPN) та рівень ризику Risk Level, є експертними оцінками.

Отже, для оцінки ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА сучасні методи, в основу яких покладено дерево відмов, не дозволяють побудувати моделі з достатнім рівнем адекватності. Вони не враховують належності одних і тих же відмов до різних аварійних ситуацій, що виключає взаємозв'язок між надійністю та безпечністю БПЛА. А це, в свою чергу, не дозволяє кількісно оцінити вплив використання відмовостійких конфігурацій на зниження ризику експлуатації, що призводить або до надмірного резервування, а відповідно до зростання вартості, або до необґрунтованого ускладнення системи. Моделі для оцінки ризику експлуатації у вигляді ДВ, побудованих за відомою методикою, не дають змоги врахувати вплив технічного обслуговування, ремонту та функціональної поведінки на безпечність, а також вплив засобів контролю і діагностики на безпечність та надійність БПЛА. Крім цього існуючі моделі не дозволяють враховувати перебування системи у стані простою, який для навігаційно-обчислювальної системи БПЛА аналогічний аварійній ситуації.

Таким чином, *актуальною є науково-прикладна задача* зниження ризику експлуатації бортової навігаційно-обчислювальної системи БПЛА шляхом визначення найбільш «слабких» з точки зору безпечності підсистем і реалізації їх у вигляді відмовостійких конфігурацій. Для вирішення цієї задачі необхідно розробити нові або удосконалити існуючі моделі для кількісної оцінки ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА. Крім цього, процес побудови моделі повинен бути формалізованим, що дозволить мінімізувати ймовірність внесення помилки у модель, а відтак і автоматизувати його. Автоматизація процесу побудови моделей зробить їх придатними для багатоваріантного аналізу багатьох реалізацій навігаційно-обчислювальної системи БПЛА в обмежені терміни етапу системотехнічного проектування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційної роботи пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України, які виконувались на кафедрі теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Національного університету «Львівська політехніка», відповідають науковому напрямку «Теорія і методи проектування радіоелектронних кіл, систем і комплексів та забезпечення їх якості» та тематиці досліджень кафедри, а саме:

- науково-дослідна робота «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв та систем», № держреєстрації 0110U001098 (2010–2012);
- науково-дослідна робота «Розроблення моделей надійності, ризику та безпечності програмно-апаратних технічних систем», № держреєстрації 0113U001371 (2013-2014).

У перелічених науково-дослідних роботах автор брав участь як виконавець.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка

методики оцінки рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи котра входить до складу системи радіоуправління безпілотного літального апарата з використанням нових моделей навігаційної та обчислювальної підсистем та на її основі створення програмного засобу, який автоматизує отримання кількісного показника ризику експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз методів побудови моделей систем для оцінки ризику їх експлуатації. Здійснити вибір математичного апарата, який уможливило б побудову адекватних моделей з урахуванням усіх особливостей навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата.

2. Здійснити розробку моделей навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата для кількісної оцінки ризику її експлуатації з формуванням рекомендацій щодо забезпечення заданого або допустимого рівня ризику при заданому рівні надійності. Моделі повинні давати змогу визначати найбільш критичні з точки зору ризику експлуатації підсистеми та їх елементи з метою використання для них відмовостійких конфігурацій, які б знижували рівень ризику експлуатації при заданому рівні надійності.

3. Розробити методику та засіб автоматизованого отримання кількісного показника ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата для забезпечення можливості розв'язання задач надійнісного синтезу системи через багатоваріантний аналіз.

4. Здійснити розробку засобів для візуалізації причинно-наслідкових зв'язків розвитку аварійної ситуації у вигляді дерева відмов, що дозволить відслідковувати вплив критичних з точки зору безпечності підсистем на потенційну аварійну ситуацію та проводити валідацію отриманих дерев відмов шляхом порівняння з деревами відмов, отриманими за допомогою стандартизованих методик.

5. Розробити засоби автоматизованого отримання мінімальних січень на основі моделі навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата у вигляді графа станів та переходів для проведення оцінки ризику експлуатації.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання ризику експлуатації бортової навігаційно-обчислювальної системи БпЛА.

Предметом дослідження є моделі, методики та засоби автоматизації оцінювання ризику експлуатації бортової навігаційно-обчислювальної системи БпЛА.

Методи дослідження, що використані в дисертаційній роботі, базуються на положеннях теорії системотехнічного проектування складних технічних систем, теорії надійності складних систем, теорії випадкових процесів, теорії оцінки ризиків складних технічних систем. Для побудови математичної моделі об'єкта дослідження у вигляді системи диференційних рівнянь Колмогорова - Чепмена та їх розв'язання використано методи теорії марковських випадкових процесів та методи чисельних розв'язків систем лінійних диференційних рівнянь. Для отримання мінімальних січень та побудови дерева відмов використано математичний апарат теорії моделювання дискретно-неперервних стохастичних

систем. Для отримання показників ризику використано теорію оцінки ризиків складних технічних систем.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні результати роботи, які визначають її наукову новизну та виносяться на захист:

1. Дістав подальший розвиток метод формалізованого представлення об'єкта дослідження у вигляді структурно-автоматної моделі, який на відміну від існуючого дозволяє виокремити всі можливі непрацездатні стани складної технічної системи, з множини яких вибираються групи станів, які представляють аварійні ситуації і на їх основі визначаються мінімальні січення без побудови дерева відмов. За допомогою мінімальних січень отримують ймовірність виникнення аварійної ситуації складної технічної системи.

2. Вперше розроблено математичну модель навігаційної підсистеми для оцінки ризику її експлуатації. В моделі відображено: показники надійності дубльованих акселерометрів та гіроскопів; показники надійності магнітометра та вимірвачів висотно-швидкісних параметрів; надійність приймача сигналів від супутникової навігаційної системи та надійність приймача каналу зв'язку БпЛА з оператором. Крім цього, враховано функціональне резервування супутникової навігаційної системи навігаційною підсистемою БпЛА. Це забезпечило високу достовірність оцінки ризику експлуатації системи радіоуправління БпЛА.

3. Удосконалено математичну модель обчислювальної підсистеми для оцінки ризику її експлуатації, в якій, на відміну від існуючих, відображено: мажоритарну структуру та відмови і збої її мікропроцесорів; можливість автоматичного перезавантаження мікропроцесорів після виявлення збою; ненадійність підсистеми електроживлення. Це дало змогу підвищити достовірність оцінки ризику експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів

1. Запропонована методика визначення кількісного показника ризику обчислювально-навігаційної системи БпЛА, а саме ймовірності виникнення мінімального січення, без побудови дерева відмов. Методика дозволяє вирішувати задачі зменшення рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БпЛА на етапі системотехнічного проектування. Це досягається шляхом оцінки ризику експлуатації багатьох варіантів побудови навігаційно-обчислювальної системи БпЛА з врахуванням вартості їх реалізації. Розв'язання задачі зменшення оцінки ризику експлуатації здійснюється з меншими затратами часу, ніж вимагає методика оцінки ризику експлуатації з використанням дерева відмов, що важливо на етапі системотехнічного проектування.

2. Розроблено алгоритм та прототип програмного засобу, в основу якого покладено запропоновану методику. Програмний засіб автоматизує процес отримання кількісного показника ризику, в якому враховуються: відмовостійкі конфігурації підсистем; відмови апаратних засобів; збої програмних засобів; належність певної частини відмов до двох і більше мінімальних січень; вплив ненадійності приймача сигналу від супутникової навігаційної системи; вплив ненадійності приймача системи зв'язку з оператором.

3. Розроблена методика розв'язання зворотної задачі, а саме побудова дерева відмов на основі мінімальних січень. Ступінь формалізації методики дав змогу розробити прототип програмного засобу для автоматизованої побудови дерева відмов. Практична необхідність отримання дерева відмов, після того як сформовані мінімальні січення в тому, що воно візуалізує шляхи потрапляння навігаційно-обчислювальної системи в аварійні стани. Необхідно зауважити, що дерево відмов є обов'язковим атрибутом при здійсненні сертифікації на безпечність експлуатації безпілотного літального апарата.

Результати дисертаційної роботи використані:

- в науково-дослідній роботі за шифром «Дрон» інв. №17-13 НОВ у Науковому центрі Національної Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного.
- в держбюджетній науково-дослідній роботі «Розроблення моделей, методів та алгоритмів для автоматизованої оцінки показників надійності радіоелектронних та електромеханічних пристроїв та систем»
- в держбюджетній науково-дослідній роботі «Розроблення моделей надійності, ризику та безпечності програмно-апаратних технічних систем».

Результати дисертаційних досліджень впроваджені в ТОВ «Сілего Технолоджі (Україна)».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, авторів дисертації належить: [1] – валідація моделі алгоритму поведінки системи радіоелектронного комплексу шляхом її порівняння з моделлю у вигляді бінарної структурно-автоматної моделі; [2] – спосіб представлення непрацездатних станів радіоелектронного комплексу бінарними компонентами вектора стану; [3] - спосіб виділення непрацездатних станів із сукупності усіх станів системи для ідентифікації аварійних ситуацій; [4] – методика побудови дерева відмов складної технічної системи на основі мінімальних січень; математична модель для оцінки ризику експлуатації відмовостійкої системи з мажоритарною структурою; [5] – удосконалений метод формалізованого представлення об'єкта дослідження у вигляді бінарної структурно-автоматної моделі; методика автоматизованого формування мінімальних січень; [6, 9] – спосіб представлення надійності програмного забезпечення в структурно-автоматних моделях мікропроцесорних систем; [7] - математичні моделі навігаційної та обчислювальної підсистем системи радіоуправління БпЛА [8] - тестова бінарна структурно-автоматна модель алгоритму поведінки радіоелектронного комплексу; [10, 11, 12, 16, 17] – автоматизація отримання мінімальних січень на основі методу простору станів; [13-15] – автоматизація методики побудови дерева відмов та основі графа станів і переходів.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати дисертації та основні положення роботи доповідались на дев'яти Міжнародних та чотирьох Всеукраїнських конференціях і семінарах: міжнародна науково-технічна конференція TCSET «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» (Україна, Львів-Славське, 2012, 2014); міжнародна

молодіжна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій (Україна, Севастополь, 2012); Національна конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (Україна, Львів, 2013, 2014); Міжнародна науково-технічна конференція РТПСАС «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта)» (Україна, Київ, 2013, 2014); IX науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку економіки, підприємництва та комп'ютерних технологій в Україні» (Україна, Львів, 2013); Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, Україна, 2013, 2014); 7th International Conference Dependable Systems, Services and Technologies DESSERT 2014 (Ukraine, Kiev, 2014); VII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Україна, Запоріжжя, 2014); КриКТехС-2015/7/105 всеукраїнський науково-технічний семінар «Критичні комп'ютерні технології та системи» (Україна, Харків, 2015); на семінарах кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювання.

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, з них 6 статей у фахових виданнях України, у тому числі 2 статті у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз; 9 публікацій у збірниках праць Міжнародних науково-технічних конференцій та 3 публікації у збірниках праць Всеукраїнських науково-технічних конференцій і семінарів.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку літератури з 154 назв та 2 додатки. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 156 сторінок, з них 113 сторінок основного тексту, 12 рисунків та 21 таблиця.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** проведено обґрунтування актуальності тематики дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Також наведено список публікацій здобувача та апробацію результатів дисертації, показано структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** – «Аналіз методів та моделей для оцінки ризику експлуатації технічних систем» – проведено аналіз сучасного стану методів, моделей та програмних засобів для вирішення задач аналізу ризику експлуатації РСВП і, зокрема, бортової навігаційно-обчислювальної системи БПЛА. Разом з цим, здійснено огляд типових варіантів структурно-функціональних схем навігаційно-обчислювальної системи БПЛА та виділені її особливості, які є визначальними з точки зору оцінки ризику експлуатації БПЛА.

Узагальнена структурна схема навігаційно-обчислювальної системи БПЛА та її взаємозв'язок з іншими бортовими системами показана на рис. 1. До особливостей навігаційно-обчислювальної системи БПЛА слід віднести те, що через необхідність безперервного постачання навігаційної інформації для

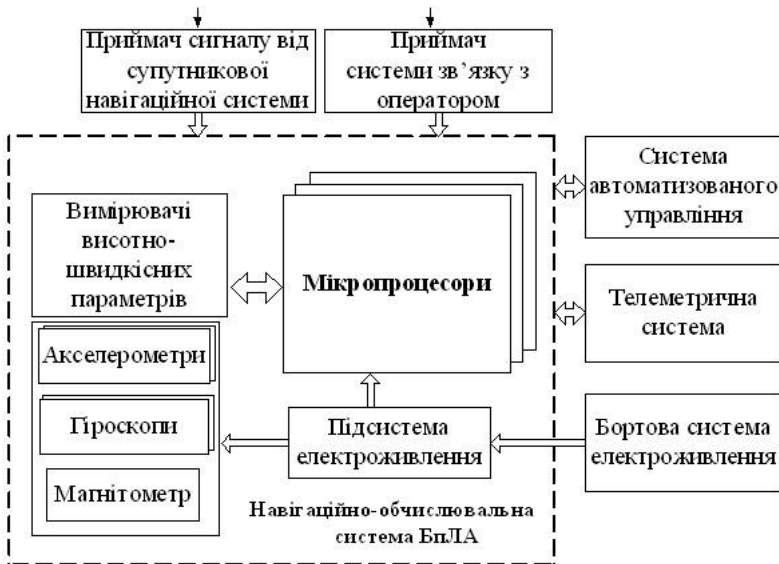


Рис. 1. Узагальнена структурна схема навігаційно-обчислювальної системи та її взаємозв'язок з бортовими системами БПЛА

забезпечення виконання польотного завдання складові такої системи повинні мати відмовостійкі конфігурації. Втім кількість резервних модулів для НОС обмежується допустимими значеннями маси, об'єму, вартості та ін. параметрами, визначеними для БПЛА.

В результаті аналізу встановлено, що для окремих складових навігаційно-обчислювальної системи БПЛА існує ряд методик оцінки ризику їх експлуатації. Однак, у відомих методиках, рівень ризику експлуатації

оцінюється переважно якісно на основі експертних оцінок, а заданий рівень безпечності забезпечується виконанням ряду рекомендацій. Кількісна оцінка ризику експлуатації БПЛА доступна лише на спрощених моделях, які, як правило, відображають лише одну з особливостей навігаційно-обчислювальної системи.

Для побудови математичних моделей навігаційно-обчислювальної системи БПЛА з підвищеним ступенем адекватності було проведено аналіз сучасних методів побудови моделей, які дають змогу проводити кількісну оцінку ризику. Метою аналізу був вибір методу і технології моделювання, що дає змогу адекватно відобразити в одній моделі особливості функціонування навігаційно-обчислювальної системи БПЛА, як з точки зору оцінки ризику, так і з точки зору надійності. Технологія моделювання повинна мати високий ступінь формалізації, щоб забезпечити безпомилкову побудову упродовж короткого часу багатьох варіантів моделі системи залежно від змін структури і поведінки навігаційно-обчислювальної системи для досягнення заданого рівня ризику експлуатації.

В результаті аналізу сучасних технологій побудови моделей для оцінки ризику експлуатації РСВП встановлено, що найбільш вживаними для побудови моделей є логіко-ймовірнісний метод та його різновиди (схеми функціональної цілісності, дерева відмов (статичні та динамічні), дерева подій), метод простору станів та імітаційне моделювання.

При використанні різновидів методу логіко-ймовірнісного моделювання проєктант повинен виконати складну та трудомістку роботу побудови моделі у вигляді логічної функції чи дерева, яка непридатна для багатоваріантного аналізу. Це обумовлено тим, що мінімальні зміни в структурі і алгоритмі поведінки об'єкта проєктування спричиняють великі затрати часу на розробку нової моделі. Крім цього, логіко-ймовірнісні методи не дозволяють враховувати технічне обслуговування і ремонт, а також вплив відмовостійких конфігурацій на безпечність РСВП.

Найбільш ефективним методом для оцінки ризику експлуатації з урахуванням особливостей навігаційно-обчислювальної системи БпЛА є удосконалений метод простору станів з автоматизованою побудовою графа станів і переходів на базі структурно-автоматних моделей. При проведенні досліджень багатьох варіантів реалізації навігаційно-обчислювальної системи БпЛА зміни досить просто вносяться в її структурно-автоматну модель (САМ). Але удосконалений метод простору станів потребує модифікації, оскільки він не дозволяє розрізняти аварійні ситуації і орієнтований виключно на отримання показників надійності.

В удосконаленій версії методу простору станів високий рівень формалізації має методика розробки графа станів та переходів, яка дає можливість автоматизувати процес побудови математичних моделей поведінки складних технічних систем у вигляді дискретно-неперервних стохастичних систем. За допомогою удосконаленої технології існує можливість автоматизовано отримувати мінімальні січення об'єкта дослідження і проводити багатоваріантний аналіз. Високий рівень формалізації удосконаленої версії методу простору станів практично унеможливує внесення помилок при розробці моделі об'єкта дослідження.

На сьогодні не розроблено методик для оцінки безпечності складних систем відповідального призначення, котрі базувалися б на удосконаленій версії методу простору станів. Слід відзначити, що на сьогодні також не розроблено методик, які б дозволили автоматизувати побудову дерева відмов об'єкта дослідження на основі графа станів і переходів та не створено алгоритму валідації результатів FMEA/FMECA-аналізу за допомогою побудованого дерева відмов. Також необхідно розробити моделі навігаційно-обчислювальної системи БпЛА, в яких були б закладені особливості системи, що визначають її надійність та рівень ризику. Разом з цим модель поведінки має враховувати відмовостійкі конфігурації, стратегію технічного обслуговування та ремонту БпЛА. Потрібно, щоб розроблені моделі з прийнятними затратами часу дозволяли проводити оцінку ризику експлуатації та переоцінку рівня ризику при зміні вхідних даних.

У **другому розділі – «Розробка моделі обчислювальної підсистеми з використанням мажоритарної структури»** – проведено аналіз бортової обчислювальної підсистеми, яка є важливою складовою частиною навігаційно-обчислювальної системи БпЛА. Однією з головних умов успішного виконання завдання безпілотним літальним апаратом у ручному або комбінованому режимі польоту є надійне функціонування навігаційно-обчислювальної системи. Обчислювальна підсистема (ОП) є тим компонентом навігаційно-обчислювальної системи БпЛА, що забезпечує підвищення ефективності його застосування, навігаційної точності, автономності роботи та звільняє операторів БпЛА від монотонного і повторюваного виконання завдань “ручного” або напівавтоматичного управління. Відмова ОП однозначно призводить до аварійної ситуації. Тому успішність виконання польоту залежить від правильного та надійного функціонування даної підсистеми.

Запропонована математична модель ОП забезпечує підвищення достовірності оцінки ризику експлуатації за рахунок врахування: наявності

мажоритарної структури для ОП і відмов її мікропроцесорів (МКП); збоїв програмного забезпечення (ПЗ); можливості автоматичного перезавантаження МКП після виявлення збою; ненадійності підсистеми електроживлення (ПЕЖ) та фільтра Калмана.

Розробка математичної моделі ОП здійснюється з використанням методу побудови моделей у вигляді графа станів та переходів на основі САМ. Запроновано формалізоване представлення об'єкта дослідження у вигляді бінарної САМ, яка дозволяє деталізувати стан критичної відмови. Особливістю такої САМ є те, що для кожного елемента ОП необхідно призначити індивідуальний компонент вектора стану, який може приймати лише два значення 0 та 1. Представлення стану групи однотипних елементів одною компонентою не допускається.

На основі бінарної САМ за допомогою програмного засобу ASNA сформовано граф станів і переходів. Отриманий таким чином граф станів та переходів представляє усі можливі аварійні ситуації. Наступним кроком є виділення окремих аварійних ситуацій. Для цього необхідно сформулювати логічний вираз, який представляє усі аварійні ситуації для об'єкта дослідження. За допомогою сформованого логічного виразу з графа станів і переходів вибираються стани, які представляють кожну аварійну ситуацію. Таким чином отримується одна або декілька груп станів, які представляють мінімальні січення. Якщо складові логічного виразу, який описує аварійні ситуації, об'єднані оператором «AND», то для об'єкта дослідження властива одна аварійна ситуація, що представлена групою станів і відповідно одним мінімальним січенням. Якщо складові логічного виразу, об'єднані оператором «OR», то для об'єкта дослідження властиві кілька аварійних ситуацій. Визначення МС з моделі об'єкта дослідження у вигляді графа станів дає змогу враховувати належність певної частини непрацездатних станів до двох і більше мінімальних січень.

Приклад графа станів і переходів з представленням всіх непрацездатних станів (стани 15-25) та трьох аварійних ситуацій показано на рис. 2. Причому, на відміну від існуючих методик оцінки ризику експлуатації, в даному випадку одні аварійні ситуації можуть містити в собі непрацездатні стани від інших аварійних ситуацій. Це дає змогу враховувати належність певної частини відмов до двох і більше мінімальних січень.

Розроблено два варіанти математичної моделі ОП з використанням мажоритарної структури «2 з 3» та з використанням двохкратного резервування. Для цього, згідно з запропонованою методикою було розроблено дві бінарні САМ

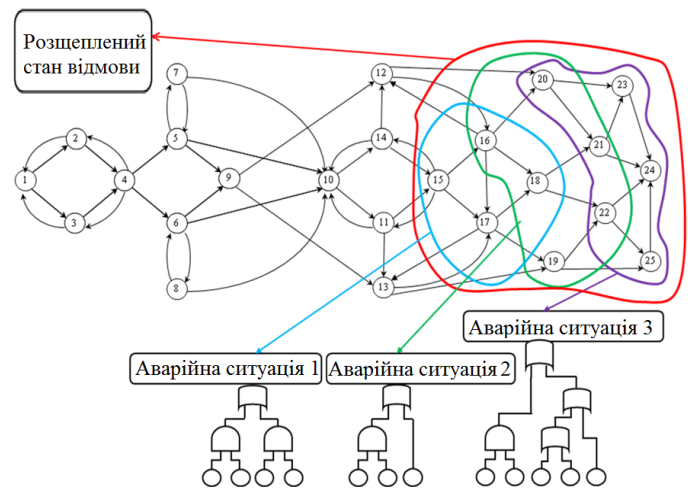


Рис. 2 Приклад графа станів та переходів з представленням трьох аварійних ситуацій

обчислювальної підсистеми. На основі розроблених бінарних САМ отримано моделі ОП у вигляді графа станів і переходів. Нижче представлена математична модель ОП з використанням мажоритарної структури “2 з 3” у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь (1). У моделі враховано такі параметри ОП: інтенсивність відмов мікропроцесора 1 (МКП1) ($\lambda_{\text{МКП1}}$); інтенсивність відмов МКП2 ($\lambda_{\text{МКП2}}$); інтенсивність відмов МКП3 ($\lambda_{\text{МКП3}}$); ймовірність виникнення збою в МКП1 (P_{361}); ймовірність виникнення збою в МКП2 (P_{362}); ймовірність виникнення збою в МКП3 (P_{363}); ймовірність успішного перезавантаження МКП1 ($P_{\text{перез1}}$); ймовірність успішного перезавантаження МКП2 ($P_{\text{перез2}}$); ймовірність успішного перезавантаження МКП3 ($P_{\text{перез3}}$); інтенсивність відмов підсистеми електроживлення ($\lambda_{\text{пезж}}$); інтенсивність відмов фільтра Калмана ($\lambda_{\text{ФК}}$); середнє значення тривалості перезавантаження МКП ($T_{\text{перез}}$).

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_{\text{МКП1}} \cdot (1 - P_{361}) + \dots + \lambda_{\text{МКП2}} \cdot P_{362} + \lambda_{\text{МКП3}} \cdot P_{363} + \lambda_{\text{пезж}} + \lambda_{\text{ФК}}) \cdot P_1(t) + \frac{P_3(t) + P_7(t) + P_{10}(t)}{T_{\text{перез}}} \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\lambda_{\text{МКП2}} \cdot (1 - P_{362}) + \dots + \lambda_{\text{пезж}} + \lambda_{\text{ФК}}) \cdot P_2(t) + \lambda_{\text{МКП1}} \cdot (1 - P_{361}) \cdot P_1(t) + \frac{(1 - P_{\text{перез2}})}{T_{\text{перез}}} \cdot P_3(t) + \frac{P_{\text{перез2}}}{T_{\text{перез}}} \cdot P_8(t) + \frac{P_{\text{перез3}}}{T_{\text{перез}}} \cdot P_{11}(t) \\
 &\vdots \\
 \frac{dP_{82}(t)}{dt} &= -\left(\frac{P_{\text{перез2}}}{T_{\text{перез}}} + \frac{(1 - P_{\text{перез2}})}{T_{\text{перез}}} + \lambda_{\text{пезж}} + \lambda_{\text{МКП3}} \cdot (1 - P_{363}) + \lambda_{\text{МКП3}} \cdot P_{363} \right) \cdot P_{82}(t) + \dots + \lambda_{\text{пезж}} \cdot P_{30}(t) + \lambda_{\text{ФК}} \cdot P_{42}(t) \\
 &\vdots \\
 \frac{dP_{161}(t)}{dt} &= -\left(\frac{P_{\text{перез2}}}{T_{\text{перез}}} + \frac{(1 - P_{\text{перез2}})}{T_{\text{перез}}} + \frac{P_{\text{перез1}}}{T_{\text{перез}}} + \frac{(1 - P_{\text{перез1}})}{T_{\text{перез}}} + \lambda_{\text{пезж}} \right) \cdot P_{161}(t) + \dots + \frac{(1 - P_{\text{перез3}})}{T_{\text{перез}}} \cdot P_{62}(t) \\
 \frac{dP_{162}(t)}{dt} &= -\left(\frac{P_{\text{перез2}}}{T_{\text{перез}}} + \frac{(1 - P_{\text{перез2}})}{T_{\text{перез}}} + \frac{P_{\text{перез1}}}{T_{\text{перез}}} + \frac{(1 - P_{\text{перез1}})}{T_{\text{перез}}} \right) \cdot P_{162}(t) + \dots + \lambda_{\text{МКП3}} \cdot P_{363} \cdot P_{77}(t)
 \end{aligned} \right\} (1)$$

З використанням отриманих математичних моделей двох варіантів реалізації ОП проведено порівняння ризику їх експлуатації за показником “ймовірність виникнення МС”, результати якого представлені в табл. 1 та табл. 2. Крім ймовірності виникнення МС, в цих таблицях представлено процентні відношення ймовірності виникнення окремого МС $Q_{\text{мс}}$ до загальної ймовірності виникнення аварійних ситуацій $Q_{\text{заг}}$, кількість несправних елементів ОП в МС, номери елементів, які входять в МС. Елементи ОП мають таке позначення: МКП1 - 1, МКП2 - 2, МКП3 - 3, підсистема електроживлення - 4. Порівняння виконано за таких умов: при реалізації ОП використовуються три типи МКП, щоб уникнути однотипних збоїв; вважається, що надійність таких МКП є різною.

Результати представлені в таблицях 1 і 2 свідчать про те, що використання для ОП двохкратного резервування зменшує ризик експлуатації в порівнянні з використанням для ОП мажоритарної структури “2 з 3”. Але слід зауважити, що у випадку використання двохкратного резервування втрачаються позитивні якості мажоритарної структури “2 з 3”. Для зменшення рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА в склад ОП введений фільтр Калмана. Однак оскільки даний модуль увімкнений послідовно до ОП, то він має мати інтенсивність відмови на два порядки меншу аніж інтенсивність відмови мікропроцесорів.

Таблиця 1
Мінімальні січення для ОП з
використанням двохкратного
резервування

Номер МС	Ймовірність виникнення МС	Q _{мс} / Q _{заг} , %	Кіль-ть несправних елементів ОП в МС	Номер елемента
1	2,22·10 ⁻⁶	39,02	3	1, 2, 3
2	1,22·10 ⁻⁶	21,40	1	4
3	2,79·10 ⁻⁷	4,89	1	5

Таблиця 2
Мінімальні січення для ОП з
використанням мажоритарної структури
“2 з 3”

Номер МС	Ймовірність виникнення МС	Q _{мс} / Q _{заг} , %	Кіль-ть несправних елементів ОП в МС	Номер елемента
1	2,51·10 ⁻⁶	44,04	2	1, 2
2	1,48·10 ⁻⁶	25,96	2	1, 3
3	1,72·10 ⁻⁶	30,35	2	2, 3
4	1,22·10 ⁻⁶	21,40	1	4
5	2,79·10 ⁻⁷	4,89	1	5

У третьому розділі – «Розробка математичної моделі навігаційної підсистеми безпілотного літального апарата» – здійснено розробку бінарної САМ навігаційної підсистеми (НП), яка складається з трьох акселерометрів, трьох гіроскопів, магнітометра та вимірювачів висотно-швидкісних параметрів. У математичній моделі відображено: показники надійності дубльованих акселерометрів та гіроскопів, магнітометра та вимірювачів висотно-швидкісних параметрів, приймача сигналу від супутникової навігаційної системи та приймача системи зв'язку БПЛА з оператором. Крім цього, враховано функціональне резервування супутникової навігаційної системи інерціальною навігаційною підсистемою БПЛА. В якості показників надійності використано: інтенсивність відмов акселерометра ($\lambda_{ан}$, де n - порядковий номер акселерометра); інтенсивність відмов гіроскопа ($\lambda_{гн}$, де n - порядковий номер гіроскопа); інтенсивність відмов вимірювача висотно-швидкісних параметрів ($\lambda_{ввшп}$); інтенсивність відмов магнітометра ($\lambda_{мм}$); інтенсивність відмов приймача сигналу від супутникової навігаційної системи ($\lambda_{пснс}$); інтенсивність відмов приймача системи зв'язку з оператором ($\lambda_{псзо}$).

На основі бінарної САМ та з використанням програмного засобу ASNA отримано математичну модель НП у вигляді системи диференціальних рівнянь (2), яка налічує 998 рівнянь.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_{\alpha_1} + \lambda_{\alpha_2} + \lambda_{\alpha_3} + \lambda_{a_1} + \lambda_{a_2} + \lambda_{a_3} + \lambda_{\text{ввшп}} + \lambda_{\text{мм}} + \lambda_{\text{пснс}} + \lambda_{\text{псзо}}) \cdot P_1(t) \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\lambda_{\alpha_2} + \lambda_{\alpha_3} + \lambda_{a_1} + \lambda_{a_2} + \lambda_{a_3} + \lambda_{\text{ввшп}} + \lambda_{\text{мм}} + \lambda_{\text{пснс}} + \lambda_{\text{псзо}}) \cdot P_2(t) + \lambda_{\alpha_1} \cdot P_1(t) \\
 &\vdots \\
 \frac{dP_{452}(t)}{dt} &= -(\lambda_{\alpha_1} + \lambda_{\alpha_2} + \lambda_{\text{пснс}} + \lambda_{\text{псзо}}) \cdot P_{452}(t) + \lambda_{\alpha_2} \cdot P_{358}(t) + \lambda_{a_1} \cdot P_{459}(t) + \lambda_{a_2} \cdot P_{432}(t) + \lambda_{a_3} \cdot P_{421}(t) + \lambda_{\text{ввшп}} \cdot P_{516}(t) \\
 &\vdots \\
 \frac{dP_{997}(t)}{dt} &= \lambda_{\alpha_1} \cdot P_{899}(t) + \lambda_{\alpha_2} \cdot P_{751}(t) + \dots + \lambda_{\text{мм}} \cdot P_{756}(t) + \lambda_{\text{пснс}} \cdot P_{691}(t) - \lambda_{\text{псзо}} \cdot P_{997}(t) \\
 \frac{dP_{998}(t)}{dt} &= \lambda_{\alpha_1} \cdot P_{899}(t) + \lambda_{\alpha_2} \cdot P_{751}(t) + \dots + \lambda_{\text{ввшп}} \cdot P_{954}(t) + \lambda_{\text{мм}} \cdot P_{756}(t) + \lambda_{\text{псзо}} \cdot P_{996}(t) - \lambda_{\text{пснс}} \cdot P_{998}(t)
 \end{aligned} \right\} (2)$$

Математична модель НП призначена для методики оцінки ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА в сукупності з

математичною моделлю ОП. За наявності математичних моделей ОП та НП, шляхом композиційного представлення сукупності мінімальних січень, стає можливим проведення оцінки ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА в цілому. Практичне використання методики оцінки ризику експлуатації вимагає засобів автоматизації, розробка яких розглядається в розділі 4.

У четвертому розділі – «Автоматизація окремих процедур отримання оцінки ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата» – для забезпечення можливості багатоваріантного аналізу ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА, здійснено розробку алгоритму автоматизації двох трудоміських процедур оцінки ризику: визначення мінімальних січень на основі графа станів та отримання логічної функції ДВ. Блок-схема алгоритму представлена на рис. 3. На

основі сформованого алгоритму розроблено програмний засіб CutSetDefiner, вхідними даними для якого є експортовані файли з програмного засобу ASNA – матриця векторів непрацездатних станів (*.vs) та матриця ймовірностей перебування системи в усіх станах графа (*.ds). В результаті використання програмного засобу CutSetDefiner, розробник отримує файл, в якому представлені усі мінімальні січення, ймовірності виникнення МС на заданому інтервалі експлуатації, логічну функцію дерева відмов, процентні відношення ймовірності виникнення окремого МС до загальної ймовірності виникнення відповідної аварійної ситуації.

Виконано валідацію методики автоматизованого

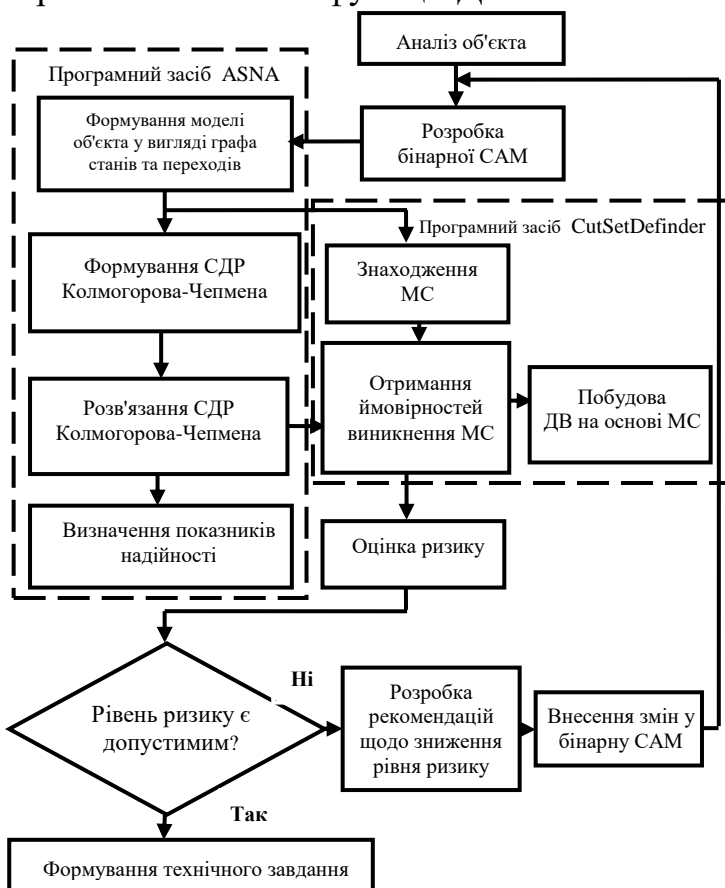


Рис. 3. Блок-схема алгоритму автоматизації отримання МС

отримання мінімальних січень та логічного представлення дерева відмов. В якості об'єкта, на якому перевірялась методика, використана відмовостійка система з структурним резервуванням. Мінімальні січення, отримані за запропонованою методикою, порівнювались з мінімальними січеннями отриманими за відомою методикою з використанням дерева відмов, яке було побудоване за допомогою програмного засобу RAM Commander. Визначені для відмовостійкої системи ймовірності виникнення мінімальних січень співпали, що підтверджує придатність методики до проведення дослідження ризику експлуатації радіоелектронних систем відповідального призначення.

Але слід відзначити, що в порівнянні з відомою методикою отримання мінімальних січень за допомогою дерева відмов, запропонована методика дає можливість отримувати мінімальні січення для систем з обмеженою кількістю відновлень та систем з станом простою. Стан простою системи зумовлений проведенням технічного обслуговування та ремонту. Автоматизація двох процедур методики оцінки ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА створила можливість кількісної перевірки рівня ризику з виявленням критичних елементів системи.

У п'ятому розділі – **«Обґрунтування вимог до надійності складових навігаційно-обчислювальної системи для зменшення ризику її експлуатації»** – показано приклад застосування запропонованої методики отримання МС з використанням програмного засобу CutSetDefiner.

Згідно зі стандартами ГОСТ 27.310-95 та MIL-STD-882E виконується аналіз видів критичних відмов та їх наслідків. Для навігаційно-обчислювальної системи проаналізовано відмови окремих модулів та класифіковано наслідки їх відмов у п'ятирівневій градації. Мінімальні січення отримано на основі запропонованих моделей навігаційної та обчислювальної підсистем за допомогою програмного засобу CutSetDefiner. Необхідно зауважити, що затрати часу в цьому випадку є суттєво меншими в порівнянні з затратами часу отримання МС за відомою методикою, яка передбачає побудову дерева відмов.

Для отримання рівня ризику всі визначені види відмов згідно зі стандартом були проранговані наступним чином: якщо наслідки є значними (високий рівень значущості), то такому виду відмови призначено перший рівень значущості і навпаки - якщо наслідки відмови були незначними, то такій відмові призначено п'ятий рівень значущості (низький рівень значущості). Далі, на основі отриманих ймовірностей виникнення МС, проводилась класифікація відмов залежно від ймовірності виникнення МС. Якщо ймовірність виникнення була незначною, то їй згідно зі стандартом призначався “рівень Е” і якщо ймовірність була великою (більше 0,3), то такій ймовірності виникнення призначався “рівень А”.

Після проведення рангування видів відмов за допомогою таблиці, яка представлена в стандартах, визначено рівень ризику для кожної відмови: відмова двох МКП – “допустимий”, відмова приймача сигналу від супутникової навігаційної системи – “неприйнятний”, відмова приймача системи зв'язку з оператором – “допустимий”, відмова магнітометра, вимірювачів висотно-швидкісних параметрів відмова акселерометрів, гіроскопів – “високий”, відмова ПЕЖ – “неприйнятний”.

Після цього проведено, згідно з вищезгаданими стандартами, аналіз видів відмов та їх наслідків. За допомогою даного аналізу визначено значення пріоритету ризику кожної відмови. Визначення значення пріоритету ризику полягало у присвоєнні кожному виду відмови значення факторів ризику, в залежності від наслідків, які можуть статись після відмови. Згідно стандарту присвоюється значення пріоритету від 1 до 10: нижня межа 1, якщо наслідки є незначними; верхня межа 10 за умови, що наслідки несуть за собою втрати серед населення та екологічні катастрофи. Проведено класифікацію можливості виявлення відмов, що відбуваються у системі, і присвоєно значення показника виявлення. Якщо ймовірність виявлення є дуже високою, то показнику виявлення

присвоюється значення 1 (нижня межа). У випадку якщо відмову не можливо виявити, то даний показник отримує значення 10 (верхня межа). Наступним кроком було класифіковано усі представлені відмови по значенню ймовірності їх виникнення (1 – малоїмовірні відмови та 10 - відмови з дуже великою ймовірністю виникнення). Значення цих ймовірностей узгоджуються з отриманими ймовірностями виникнення МС.

На основі класифікованих факторів ризику розраховано значення пріоритету ризику, яке визначається як добуток ймовірності виникнення відмови, ймовірності виявлення відмови та серйозність (значущість) наслідків відмови. Умовою перевищення допустимого значення пріоритету ризику є значення 60. Відповідно до результатів проведеного аналізу відмова ПЕЖ отримала значення пріоритету ризику 81, що є недопустимим.

Для зменшення рівня ризику через відмову магнітометра, ВВШП, акселерометрів та гіроскопів необхідно замінити магнітометр та ВВШП з меншою на порядок інтенсивністю відмови - $\lambda_{\text{ММ}} = 1,38 \cdot 10^{-4}$ год, $\lambda_{\text{ВВШП}} = 2,48 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ відповідно. Також необхідно замінити модуль приймача СНС з інтенсивністю відмов на порядок нижче - $\lambda_{\text{СНС}} = 3,63 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹. при значенні інтенсивності відмови $\lambda_{\text{ПЕЖ}} = 1,66 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ рівень ризику ПЕЖ “неприйнятний”. Для зменшення рівня ризику від відмови ПЕЖ було рекомендовано замінити підсистему електроживлення на підсистему з меншою у два рази інтенсивністю відмови - $\lambda_{\text{ПЕЖ}} = 8,3 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Проведений аналіз показав, що ввівши відповідні зміни у бінарну САМ згідно із запропонованою методикою було отримано МС, на основі яких проведена повторна оцінка ризику експлуатації. Повторний аналіз показав, що ризик експлуатації через відмови магнітометра, ВВШП, акселерометрів та гіроскопів з рівня “високий” перемістився на рівень “допустимий” а відмова приймача сигналів від СНС отримала рівень “високий”.

За необхідності пред'явити дерево відмов, наприклад, при сертифікації на безпечність експлуатації БпЛА, за запропонованою методикою побудови дерева відмов на основі МС здійснена побудова дерева відмов навігаційно-обчислювальної системи (НОС) (рис. 4). Ця побудова здійснена за допомогою розробленого програмного засобу CutSetDefiner.

Вищенаведена оцінка ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи виконана за умови, що значення тривалості експлуатації становить 100 годин. При необхідності провести оцінку ризику експлуатації при іншому значенні тривалості слід скористатися залежностями ймовірності виникнення

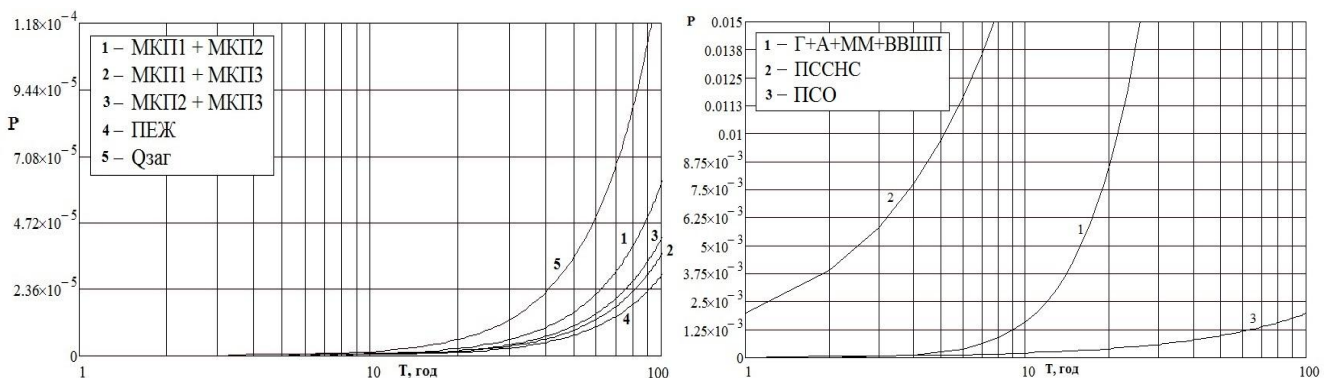


Рис. 5 Залежності ймовірності виникнення мінімальних січень для ОП (рисунок зліва) та для НП (рисунок справа) в залежності від тривалості експлуатації

мінімальних січень для відмов модулів ОП та НП від тривалості експлуатації, представленими на рис. 5. При необхідності провести оцінку ризику експлуатації при іншому значенні тривалості слід скористатися залежностями ймовірності

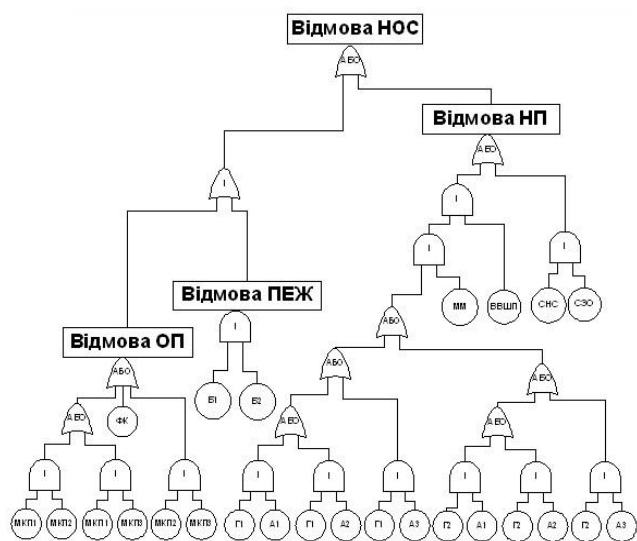


Рис.4 Дерево відмов навігаційно-обчислювальної підсистеми БПЛА

виникнення мінімальних січень для відмов модулів ОП та НП від тривалості експлуатації, представленими на рис. 5. Зліва на рисунку показано залежність ймовірності виникнення МС обчислювальної підсистеми, в які входять відмови: першого та другого мікропроцесорів (лінія 1); першого та третього мікропроцесорів (лінія 2); відмова другого та третього мікропроцесорів (лінія 3); відмова ПЕЖ (лінія 4), відмова ОП (лінія 5). На рисунку, розміщеному справа, показано залежність ймовірності виникнення МС навігаційної підсистеми, в які входять відмови: акселерометрів, гіроскопів,

магнітометра та вимірювачів висотно-швидкісних параметрів (ВВШП) (лінія 1); відмова приймача сигналу від СНС (ПССНС) (лінія 2); відмова ПСО (лінія 3). Наведені залежності дозволяють визначати ймовірності виникнення мінімальних січень на заданому інтервалі експлуатації для подальшої оцінки ризику експлуатації за необхідності зміни тривалості експлуатації.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі представлено розв'язання науково-прикладної задачі зменшення рівня ризику експлуатації бортової навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата за рахунок обґрунтованого підвищення надійності найбільш критичних з точки зору ризику експлуатації підсистем.

В рамках розв'язання даної задачі отримано наступні результати:

1. Проведений огляд сучасних джерел, в яких розглядаються моделі, методи, методики та програмні засоби оцінки ризику експлуатації систем відповідального призначення показав, що більшість методів дозволяє отримати лише якісні результати аналізу ризику експлуатації у вигляді експертних оцінок. Частина методів показує лише окремі кількісні параметри, які не враховують можливості відмовостійких конфігурацій, технічного обслуговування, приналежність однієї відмови до кількох аварійних ситуацій. Спільним недоліком існуючих методів є "ручна" побудова моделей і відповідно великі затрати часу при аналізі багатьох варіантів реалізації радіосистеми відповідального призначення, що є несумісним з обмеженими часовими рамками етапу системотехнічного проектування.

2. Дістав подальший розвиток метод формалізованого представлення об'єкта дослідження у вигляді бінарної структурно-автоматної моделі. Така модель дає змогу отримати граф станів для оцінки ризику експлуатації навігаційно-

обчислювальної системи безпілотного літального апарата. Цей граф відображає усі можливі аварійні ситуації і дозволяє визначити мінімальні січення без побудови дерева відмов. Отримані таким чином мінімальні січення, на відміну від мінімальних січень отриманих за допомогою дерева відмов, можуть входити в різні аварійні ситуації, що відповідає реальній статистичній картині експлуатації об'єкта дослідження і підвищує достовірність оцінки показника ризику експлуатації.

3. Запропоновано методику визначення кількісного показника ризику обчислювально-навігаційної систем безпілотного літального апарата, а саме ймовірності виникнення мінімального січення, без побудови дерева відмов. Методика дозволяє вирішувати задачі зменшення рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата на етапі системотехнічного проектування. Це досягається вибором відповідного варіанта після оцінки ризику експлуатації багатьох варіантів побудови навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата з врахуванням вартості їх реалізації. Розв'язання даної задачі за допомогою запропонованої методики здійснюється з суттєво меншими затратами часу, ніж при застосуванні відомої методики з використанням дерева відмов.

4. Для методики оцінки рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата розроблено математичні моделі обчислювальної та навігаційної підсистем з деталізованим представленням стану критичної відмови. Розроблені моделі дали змогу отримати мінімальні січення та їх кількісні показники ризику, за допомогою яких можна визначити критичні модулі підсистем.

5. Дослідження розроблених моделей дало змогу запропонувати рекомендації щодо зниження рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата. Зокрема для зменшення рівня ризику від відмови підсистеми електроживлення рекомендовано замінити підсистему електроживлення на підсистему з меншою у два рази інтенсивністю відмов. Дана рекомендація була введена в бінарну структурно-автоматну модель. В результаті отримано мінімальні січення, на основі яких, проведено повторну оцінку рівня ризику експлуатації. Повторна оцінка підтвердила зниження рівня ризику, згідно FMESA аналізу, з рівня ризику "недопустимий" до рівня "допустимий".

6. Розроблено алгоритм та прототип програмного засобу, в основу якого покладено запропоновану методику оцінки рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи. Програмний засіб автоматизує процес отримання кількісного показника ризику, в якому враховуються: відмовостійкі конфігурації підсистем; відмови апаратних засобів; збої програмного забезпечення; належність певної частини відмов до двох і більше мінімальних січень; вплив ненадійності приймача сигналу від супутникової навігаційної системи; вплив ненадійності приймача системи зв'язку з оператором. Для візуалізації причин та наслідків аварійних ситуацій програмний засіб дозволяє автоматизовано побудувати дерево відмов на основі мінімальних січень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Volochiy, B. Technique of Construction Models of Behavior Algorithms of Radio Electronic Complex System using the Scheme of Paths Method [Text] / B. Volochiy, L. Ozirkovskyi, O. Shkiliuk, A. Mashchak // International Journal of Computing. - 2014.-Vol. 13, Issue 3.- pp. 183-190.

2. Волочій, Б.Ю. Метод аналізу ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів відповідального призначення [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Науково-технічний журнал «Радіоелектронні і комп'ютерні системи». – 2014, №6 (70).- С. 130 – 134.

3. Волочій, Б.Ю. Методика оцінки показників ефективності радіоелектронного комплексу моніторингу повітряного простору [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2013, № 766.- С. 192-201.

4. Волочій, Б.Ю. Методика побудови дерева відмов складної технічної системи на основі графа станів і переходів [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, А.В. Мащак, О.П. Шкілюк // Вісник академії митної служби України, серія "Технічні науки". – 2014. – №1(51).- С. 10 - 19.

5. Волочій, Б.Ю. Методика розрахунку мінімальних січень для відмовостійких систем на основі структурно-автоматної моделі [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак, І.В. Кулик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – №52. - С.38-45.

6. Волочій, Б.Ю. Оцінка надійності програмно-апаратних систем за допомогою моделі їх поведінки [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Р.С. Чопей, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2014. - № 796. - С. 222-231.

7. Волочій Б.Ю. Оцінка ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Ю.М. Пащук, А.В. Мащак, В.А. Онищенко// Військова техніка та озброєння. – 2015, - №13 – С. 77-87.

8. Волочій, Б.Ю. Порівняння методів оцінки показників ефективності алгоритмів поведінки радіоелектронних комплексів [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2014, – №59.- С. 29-39.

9. Озірковський, Л.Д. Розробка методики побудови марковської моделі алгоритму поведінки програмно-апаратної системи [Текст] / Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Матеріали 9-ої науково-технічної конференції науково-педагогічних працівників «Проблеми та перспективи розвитку економіки і підприємництва та комп'ютерних технологій в Україні». – Львів, 2013. – С. 499-503.

10. Volochiy B. Estimation of Indexes of Efficiency of Radioelectronic Hardware-Software Systems Based on the Algorithm of Behavior [Text] / B. Volochiy, L. Ozirkovskyu, O. Shkiliuk, A. Mashchak // Матеріали 11-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми

радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії TCSET-2012», Львів - Славсько, 2012. – С. 322-323.

11. Volochiy B. Minimal Cut Sets Determination for Renewable Systems with Limited Repair [Текст] / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, A. Mashchak, O. Shkiliuk // Матеріали 12-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії TCSET-2014», Львів - Славсько, 2014. – С. 216-218.

12. Volochiy B.Yu. Defining Minimal Cut Sets Based On Markov Model [Текст] / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, O. Shkiliuk, A. Mashchak // Матеріали 6-ої Міжнародної конференції молодих вчених «Computer Science & Engineering CSE-2013» в рамках 4-го міжнародного фестивалю науки «LITTERIS ET ARTIBUS», Львів, – 2013. – С. 90-91.

13. Волочій, Б.Ю. Автоматизація побудови дерева відмов для оцінки безпечності експлуатації складних технічних систем [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Тези IV Міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки PREDT-2014», Чернівці, – 2014. – С. 102-103.

14. Волочій, Б.Ю. Автоматизація побудови дерева відмов для оцінки надійності та безпечності відмовостійких систем з відновленням [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», Запоріжжя, – 2014, – С. 268-269.

15. Волочій, Б.Ю. Алгоритм автоматизованої побудови дерева відмов для оцінки безпечності експлуатації телекомунікаційних систем [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій СПТЕЛ-2014», Львів, – 2014. – С. 88-91.

16. Волочій, Б.Ю. Отримання мінімальних січень, котрі призводять до втрати працездатності телекомунікаційної системи [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак // Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій СПТЕЛ-2013», Львів, – 2013. – С. 263-266.

17. Волочій, Б.Ю. Розрахунок мінімальних січень для відмовостійких систем на основі структурно-автоматної моделі [Текст] / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, О.П. Шкілюк, А.В. Мащак, І.В. Кулик // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи РТПСАС-2013», Київ, – 2013. – С. 160-161.

АНОТАЦІЯ

Мащак А.В. Моделі для оцінки ризику експлуатації системи радіоуправління безпілотним літальним апаратом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за

спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2015.

В дисертаційні роботі представлено розв’язання науково-прикладної задачі зменшення рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи безпілотного літального апарата (БПЛА) за рахунок обґрунтованого підвищення надійності складових, найбільш критичних з точки зору ризику експлуатації системи.

Розв’язання поставленої задачі полягало в розробці методики визначення кількісного показника ризику навігаційно-обчислювальної системи БПЛА, а саме ймовірності виникнення мінімального січення, без побудови дерева відмов. Методика дозволяє вирішувати задачі зменшення рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА на етапі системотехнічного проектування. Для методики оцінки рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи БПЛА розроблено математичні моделі навігаційної та обчислювальної підсистем з деталізованим представленням стану критичної відмови.

Розроблено алгоритм та прототип програмного засобу, в основу якого покладено запропоновану методику оцінки рівня ризику експлуатації навігаційно-обчислювальної системи. Програмний засіб автоматизує процес отримання кількісного показника ризику, в якому враховуються: відмовостійкі конфігурації підсистем; відмови апаратних засобів; збої програмних засобів; належність певної частини відмов до двох і більше мінімальних січень; вплив ненадійності приймача сигналу від супутникової навігаційної системи; вплив ненадійності приймача системи зв’язку з оператором. Для візуалізації причин та наслідків аварійних ситуацій програмний засіб дозволяє автоматизовано побудувати дерево відмов на основі мінімальних січень.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, навігаційно-обчислювальна система, оцінка ризику експлуатації, відмовостійкість, надійність, мінімальні січення, дерево відмов.

АННОТАЦИЯ

Мащак А.В. Модели для оценки риска эксплуатации системы радиоуправления беспилотным летательным аппаратом. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 - радиотехнические и телевизионные системы. - Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2015.

В диссертационные работе представлено решение научно-прикладной задачи уменьшения уровня риска эксплуатации навигационно-вычислительной системы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) за счет обоснованного повышения надежности составляющих, наиболее критичных с точки зрения риска эксплуатации. Решение поставленной задачи заключалась в разработке методики определения количественного показателя риска эксплуатации навигационно-вычислительной системы БПЛА, а именно вероятности возникновения минимального сечения, без построения дерева отказов. Методика позволяет

решать задачи уменьшения уровня риска эксплуатации навигационно-вычислительной системы БПЛА на этапе системотехнического проектирования. Для методики оценки уровня риска эксплуатации навигационно-вычислительной системы БПЛА разработаны математические модели навигационной и вычислительной подсистем с детализированным представлением состояния критического отказа.

Разработан алгоритм и прототип программного средства, в основу которого положена предложенная методика оценки уровня риска эксплуатации навигационно-вычислительной системы. Программное средство автоматизирует процесс получения количественного показателя риска, в котором учитываются: отказоустойчивые конфигурации подсистем; отказ аппаратных средств; сбои программных средств; принадлежность определенной части отказов к двум и более минимальным сечениям; влияние ненадежности приемника сигнала от спутниковой навигационной системы; влияние ненадежности приемника системы связи с оператором. Для визуализации причин и последствий аварийных ситуаций программное средство позволяет автоматизировано построить дерево отказов на основе минимальных сечений.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, навигационно-вычислительная система, оценка риска эксплуатации, отказоустойчивость, надежность минимальные сечения, дерево отказов.

ANNOTATION

Andriy Mashchak. Models for risk assessment of unmanned aerial vehicle radiosystem. – On rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Ph.D. (candidate of science) degree by specialty 05.12.17 - Radioengineering and television systems. – "Lviv Polytechnic" National University, Lviv, 2015.

In this work were solved a scientific and applied task of increasing the degree of risk assessment adequacy of reliability components models of unmanned aerial vehicles (UAV) computing-navigational onboard system. This task is solved by reasoned reliability improving of the most critical in terms of safety UAV computing-navigational subsystem modules and subsystems.

Solving this problem was based on developing of a methodology for quantitative determining the risk index of computer and navigation subsystem of UAV computing-navigational onboard system. Namely this risk index is a minimal cut sets which are determined without fault tree building. Proposed methodology allows to meet the challenges of exploitation risk level reducing of UAV computing-navigational system in the design phase stage of UAV development. This is achieved by assessing the exploitation risk of UAV modules different variants and configuration options with taking into account the cost of its realization.

For the methodology of assessing the exploitation risk level of UAV computing-navigational system were developed a reliability computing subsystem model and navigation subsystem model. These subsystems are the main part of UAV radio system. Models are developed with a high detailed representation of the critical fail state. This high detailed representation of the critical fail state gives opportunity to determine the

faults of separate modules which causes to fail of whole UAV computing-navigational system.

Also the algorithm and prototype software tool is developed. This software tool is based on the proposed methodology for assessing the exploitation risk level of UAV computing-navigational system. Software tool automates the processes of obtaining quantitative risk index. Obtained quantitative risk index takes into account: subsystems fault-tolerant configurations; hardware failures; software failures; affiliation of certain failure to two or more minimal cut sets; reliability of satellite navigation systems signal receiver; reliability of operator commands receiver. Also to visualize the causes and consequences of fails the proposed software tool allows to build in automated mode the fault tree which is based on obtained minimal cut sets. Based on developed algorithm and models is made a possibility to make a quick model rebuild for risk assessment.

Keywords: unmanned aerial vehicle, onboard computing-navigational system, risk assessment, fault-tolerance, reliability, minimum cut sets, fault tree.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БпЛА - безпілотний літальний апарат

ВВШП – вимірювачі висото-швидкісних параметрів

ДВ – дерево відмов

МКП – мікропроцесор

ММ – магнітометр

МС – мінімальне січення

НП – навігаційна підсистема

НОС – навігаційно-обчислювальна система

ОП – обчислювальна підсистема

ПЕЖ – підсистема електроживлення

САМ – структурно-автоматна модель

СДР – система диференціальних рівнянь

FMЕА – аналіз видів і наслідків несправностей (Failure mode and effects analysis)

FMЕСА – аналіз видів і критичних наслідків несправностей (Failure mode, effects and criticality analysis)

Здано в набір 27.11.2015. Підписано до друку 11.12.2015.

Формат 60x90 1/16. Зам. № 3029.

Тираж 150 прим. Обсяг 0,9 умовн. друк. арк.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO

у друкарні ПП «Арк-сервіс».

79005, м. Львів, вул. Драгоманова, 16.

