

УДК 621.391.372

Лазута Р. Р. ORCID: 0000-0003-3254-9690 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Бондаренко Л. О. ORCID: 0000-0003-1850-0508 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Макарчук В. І. ORCID: 0000-0002-3997-4684 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Руденко В. І. ORCID: 0000-0003-3563-548X (ВІТІ ім. Героїв Крут)

МЕТОД ОЦІНКИ ЖИВУЧОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ПОЗИЦІЙ ТЕОРІЇ РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТУ

Різноманітність мереж електронних комунікацій спеціального призначення, процесів їхнього руйнування та відновлення роблять проблему розроблення методологічних засад оцінювання їхніх ключових характеристик вкрай затребуваною під час проведення оперативних розрахунків посадовими особами органів управління зв'язком.

Залишається так само актуальною і проблема раціонального та оптимального задіяння ресурсів, що збереглися в системі, спрямованих на виконання критично важливих функцій системи після інтенсивного впливу на неї зовнішніх дестабілізаційних впливів. Розв'язання цієї проблеми вимагає від системи нових якостей, яких вона може і не мати, якщо спроєктована для роботи тільки в певних умовах експлуатації.

З огляду на вищевикладені проблеми до властивості живучості та їхніх особливостей, які широко застосовують у створенні складних систем різного призначення, висувують низку особливих вимог, які стосуються як структурної, так і функціональної частини складних систем.

Одним із природних показників кількісного вимірювання ефективності мереж електронних комунікацій спеціального призначення є показник живучості, що зберігся у системі після фіксованої сукупності дестабілізуючих впливів. Показник ефективності є мірою (метричною або у вигляді шкали балів у відповідних модифікаціях) ступеня відповідності необхідному реальному результату виконання встановлених функціональних завдань після впливу дестабілізуючих впливів.

Для того щоб показник ефективності, визначений на безлічі стратегій, міг розглядатися як характеристики функціонування системи, він повинен задовольняти наступним вимогам: змістовності та інтерпретованості, вимірності, відповідності системі переваг особи, що приймає рішення.

Оскільки рішення особи, що приймає рішення щодо побудови та бойового застосування мереж електронних комунікацій спеціального призначення, є визначальним, то розрахунки показника ефективності мереж доцільно проводити з позиції моделі управління ризиками (ризик-менеджменту).

Ключові слова: живучість, ефективність функціонування системи, ризик-менеджмент.

R. Lazuta, L. Bondarenko, V. Makarchuk, V. Rudenko *A method for assessing the resistance of distributed networks of electronic communications for special purpose from the position of the theory of risk management.*

The diversity of special-purpose electronic communications networks, their destruction and restoration processes make the problem of developing methodological bases for evaluating their key characteristics highly demanded during operational calculations by officials of communication management bodies.

The problem of rational and optimal use of the resources preserved in the system aimed at performing critically important functions of the system after the intense impact of external destabilizing influences on it remains just as relevant. Solving this problem requires new qualities from the system, which it may not have if it is designed to work only in certain operating conditions.

In view of the above-mentioned problems with the properties of survivability and their features, which are widely used in the creation of complex systems of various purposes, a number of special requirements are put forward that relate to both the structural and functional parts of complex systems. One of the natural indicators of the quantitative measurement of the effectiveness of special purpose electronic communications networks is the survivability index that has remained in the system after a fixed set of destabilizing influences. The efficiency indicator is a measure (metric or in the form of a scale of points in the appropriate modifications) of the degree of compliance with the required real result of the performance of the established functional tasks, after the impact of destabilizing influences.

In order for the performance indicator, determined on the basis of many strategies, to be considered as a characteristic of the functioning of the system, it must satisfy the following requirements: content and interpretability, measurement, compliance with the system of preferences of the decision-maker.

Since the decision of the person making the decision on the construction and combat use of special-purpose electronic communications networks is decisive, it is advisable to calculate the network efficiency indicator from the standpoint of the risk management model.

Keywords: survivability, efficiency system operation, risk management.

Постановка завдання. Поняття живучості з часом еволюціонує і набуває нового змісту, що тягне за собою не завжди своєчасне закріплення цього поняття у нормативних документах.

У зв'язку з цим у наукових публікаціях та в практиці планування бойового застосування мереж електронних комунікацій спеціального призначення (далі – МЕК СП) спостерігається відсутність єдиного підходу до аналізу та оцінки можливих варіантів побудови оптимальної технічної основи системи управління військами та зброєю.

Відсутність єдиних моделей живучості породжує велику різноманітність запропонованих методів дослідження, а отже, і показників живучості. Таке положення дозволяє зробити висновок про те, що точні визначення та поняття в теорії живучості не сформовані належним чином. Водночас є різні методики з питань оцінки живучості різних технічних систем, що оперують різною термінологією та критеріями, що викликає труднощі або неможливість їх застосування при плануванні МЕК СП.

У цій публікації досліджується сутність питання живучості МЕК СП, що дозволить уточнити стандартизовані визначення та систематизувати підходи до розробки методів аналізу мереж за показником живучості з позицій моделі управління ризиками (ризик-менеджменту).

Актуальність викладеного матеріалу полягає в тому, що відсутність єдиних підходів, а відтак і єдиних методів аналізу ефективності побудови МЕК СП, ускладнює ухвалення рішень особою, що приймає рішення (далі – ОПР), щодо розгортання оптимальної за складом та ефективною за функціональним призначенням технічної основи управління військами та зброєю. Розмаїття телекомунікаційних мереж, процесів їх руйнування та відновлення роблять проблему розробки методологічних засад оцінки живучості ієрархічних МЕК СП вкрай затребуваною під час проведення оперативних розрахунків органів управління зв'язком (далі – ОУЗ). Вирішення зазначеної проблеми полягає в подальшому вивченні глибинної суті проблеми, її опису та пропозиції нових методів вирішення цього актуального завдання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації [2] представлені методики, що застосовуються для аналізу структурованих мереж, в яких враховується їх зв'язність. Однак пріоритетам важливості (вагомості) діючих у системі функціональних взаємозв'язків належного значення не надається.

У публікації [3] цей недолік усунений, але в ній не передбачається оцінка ступеня здатності мережі в цілому функціонувати після шкідливих впливів на її елементи.

Методика, запропонована в [4], спрямована на оцінку живучості мереж з погляду їх функціональності з урахуванням ієрархічних взаємозв'язків. Але в цій роботі структурний аспект живучості представлений лише одним видом взаємозв'язків і до того ж без урахування їхньої значущості.

У публікації [5] розроблено методику оцінки живучості складних систем військового призначення, що дозволяє отримувати комплексну оцінку живучості системи з точки зору її структурної вразливості та функціональності. Однак застосований математичний апарат для моделювання поширення зовнішніх впливів по структурі системи не повністю враховує всі можливі наслідки небажаних впливів.

У деяких роботах, наприклад, [6; 7], подана досить змістовна класифікація властивостей та показників живучості. Однак методики визначення показників у наведених роботах не повною мірою враховують вплив на живучість МЕК СП умов застосування об'єкта дослідження. Саме цим і пояснюється велика кількість показників живучості та відсутність будь-якого взаємозв'язку між ними.

У публікації [8] розроблено методику порівняльної оцінки розподілених інформаційно-телекомунікаційних мереж на предмет їхньої здатності забезпечувати інформаційний обмін між кореспондентами в умовах випадкових та навмисних (комп'ютерні атаки, використання недекларованих можливостей програмного забезпечення) програмних перешкод (деструктивних програмних впливів).

Таким чином можна вважати, що на даний момент у теорії живучості МЕК СП не позначений усталений методологічний підхід, що дозволяє вирішувати задачу комплексної

оцінки живучості складної системи з точки зору її структурної вразливості та функціональності з урахуванням значущості взаємозв'язків, що існують в системі.

Метою статті в умовах відсутності єдиних підходів та методів аналізу живучості МЕК СП є:

встановлення залежностей між сформованими науковими та класифікаційними поняттями живучості МЕК СП, що оперують різною термінологією;

встановлення взаємозв'язку між термінами та їхніми визначеннями;

визначення шляхів вирішення проблеми оцінки живучості МЕК СП та пропозиція методів її вирішення.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо загальнотехнічні визначення живучості, наведені у [9–12].

У [9] під живучістю розуміється «здатність системи військового зв'язку забезпечувати управління військами [силами] в умовах дії зброї противника».

Це визначення близьке за змістом до визначення [10], де «живучість – здатність системи військового зв'язку і автоматизації виконувати завдання за призначенням в умовах дії зброї противника».

У [11] під живучістю розуміється здатність систем до збереження своїх основних функцій (хоча б із допустимою втратою якості їх виконання) при впливі факторів зовнішнього середовища катастрофічного характеру – несприятливих умов експлуатації.

В [12] живучість визначена як властивість об'єкта, що полягає в його здатності виконувати задане призначення в процесі несприятливих впливів на весь об'єкт або окремі його компоненти, підтримуючи в допустимих межах свої експлуатаційні показники.

У цих визначеннях слід звернути увагу на таке:

по-перше, живучість слід розглядати як внутрішню властивість системи, якою вона володіє незалежно від умов функціонування, що виникають в даний момент часу. Вона володіє ним завжди і певною мірою може проявлятися за нормальних умов функціонування, коли виникають відмови елементів, які викликані виробничими дефектами, старінням, відхиленням параметрів тощо. Але повною мірою живучість проявляється при великих зовнішніх впливах, не передбачених умовами нормальної експлуатації, і тому важко прогнозувати, оскільки вони створюють у системі екстремальні умови функціонування;

по-друге, живучість проявляється у тому, що система зберігає не всі функції, які вона має виконувати при нормальній роботі, а лише основні функції, та й то з можливим зниженням якості виконання. Це означає, що можлива зміна стратегії функціонування системи зі збільшенням тяжкості несприятливих впливів;

по-третє, система повинна мати властивість поступової деградації в міру збільшення тяжкості несприятливих наслідків і для кожного рівня таких наслідків вміти оперативно і максимально ефективно використовувати ресурси, що збереглися, для виконання основних функцій з урахуванням зміни стратегії функціонування (цільової функції), а надалі реалізувати оптимальну стратегію відновлення з урахуванням обмежень.

Спираючись на аналіз визначень властивості живучості МЕК СП, наведених вище, представляється можливим уявити визначення живучості з погляду класичної «теорії ризику» як «можлива подія, яка може завдати шкоди чи втрати, або впливати на досягнення цілей». Ризик визначається ймовірністю загрози, вразливістю активу стосовно цієї загрози та впливом, якщо ця подія станеться. Ризик також може бути визначений як невизначеність кінцевого результату та використовуватись у контексті вимірювання ймовірності як негативних, так і позитивних результатів [13].

Нормативними документами, що визначають загальний підхід до управління будь-якими ризиками, є стандарти Міжнародної організації зі стандартизації (англ. *International Organization for Standardization, ISO*) [14] та Державний стандарт України [15]. Зазначені стандарти не є вузькоспеціальними чи галузевими, а порядок застосування цих рекомендацій може бути адаптований для будь-якої організації та її контексту, включаючи прийняття рішень на всіх рівнях протягом усього життєвого циклу системи [14; 15].

У [15] ризик визначено як «вплив невизначеності на цілі». Ризик зазвичай визначається у термінах джерел ризику, потенційних подій, наслідків цих подій та його ймовірності. «Вплив» розглядається як відхилення від очікуваного і може бути позитивним та/або негативним, а також може сприяти реалізації можливостей та усунення загроз, створювати чи призводити до виникнення можливостей та загроз. Цілі можуть мати різні аспекти і категорії та можуть застосовуватися на різних рівнях.

Ризик-менеджмент (risk-management) – це скоординовані дії управління організацією (процесом) з урахуванням ризику [14; 15].

Процес функціонування системи передбачає систематичне застосування політик, процедур та практик для забезпечення обміну інформацією та консультування, визначення контексту (середовища, в якому МЕК СП повинні виконувати свої функціональні завдання з найбільшою ефективністю), а також оцінки ризиків, впливу на ризики, моніторингу, аналізу та документування ризиків, а також ведення звітності щодо ризиків. Процес ризик-менеджменту показаний на рисунку 1.

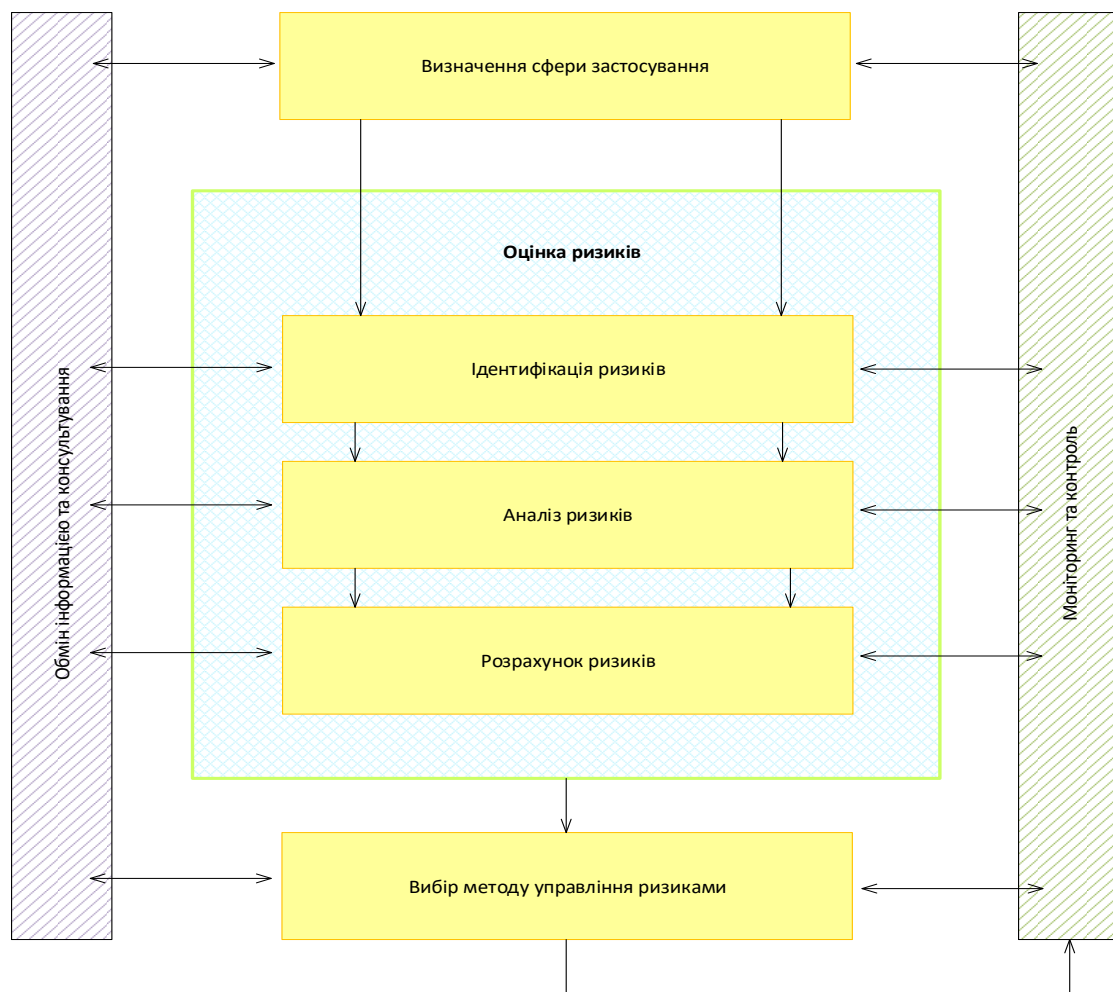


Рис. 1. Процес ризик-менеджменту

Процес ризик-менеджменту має бути невід'ємною частиною процесів управління та прийняття рішень та має бути інтегрований у структуру, діяльність та процеси функціонування ОУЗ. Він повинен застосовуватись на всіх етапах життєвого циклу МЕК СП.

У рамках ОУЗ процес ризик-менеджменту може мати безліч варіантів застосування, адаптованих з урахуванням необхідності досягнення цілей, а також зовнішнього та внутрішнього контексту.

Протягом усього процесу ризик-менеджменту слід враховувати динамічний та мінливий характер поведінки МЕК СП та посадових осіб ОУЗ.

Обмін інформацією та консультування проводяться з метою:

- зведення різних галузей експертних знань воедино на кожному етапі процесу ризик-менеджменту;
- забезпечення належного обліку різних поглядів щодо критеріїв ризику та їхньої оцінки;
- надання достатньої інформації для полегшення контролю за ризиками та прийняття рішень.

Обмін інформацією спрямований на підвищення обізнаності та забезпечення розуміння ризику, тоді як консультування включає отримання зворотного зв'язку та інформації для обґрунтування прийнятих рішень.

Мета ідентифікації ризиків полягає в пошуку, визначенні та описі ризиків, які можуть допомогти або завадити досягненню цілей. Для ідентифікації ризиків важливо використовувати належну, відповідну та актуальну інформацію. ОУЗ слід ідентифікувати ризики незалежно від того, чи знаходяться джерела цих ризиків під її контролем.

Аналіз ризику може проводитися з різним ступенем деталізації та складності, залежно від мети аналізу, доступності та достовірності інформації та наявних ресурсів. Методи аналізу можуть бути якісними, кількісними або їх комбінаціями, залежно від конкретних обставин та передбачуваного використання результатів.

Аналіз ризику слід проводити з урахуванням таких факторів, як:

- ймовірність подій та наслідків;
- характер та масштаби наслідків;
- складність і пов'язаність компонентів;
- фактори, пов'язані з часом;
- ефективність існуючих засобів контролю;
- чутливість та достовірність.

На аналіз ризиків може впливати будь-яка розбіжність думок, упередженість, сприйняття ризику та судження.

Метою оцінювання ризику є сприяння ухваленню рішень. Оцінювання ризику включає порівняння результатів аналізу ризику зі встановленими критеріями ризику визначення необхідності додаткових дій. Цей процес може призвести до вирішення:

- більше нічого не робити;
- розглянути можливі варіанти впливу на ризик;
- провести подальший аналіз, щоб краще зрозуміти ризик;
- підтримувати наявні засоби контролю;
- переглянути цілі.

Розрахунки ризиків проводяться із застосуванням відповідного математичного апарату та обчислювальних систем.

Мета впливу на ризик полягає у виборі та застосуванні варіантів реагування на ризик у процесі функціонування МЕК СП.

Вибір методу та управління ризиками (вплив на ризик) є ітеративним процесом, що включає:

- вибір варіантів впливу на ризик;
- підготовку та реалізацію планів впливу на ризик.

Моніторинг і контроль охоплюють планування, збір та аналіз інформації, документування результатів і надання зворотного зв'язку. Результати моніторингу та контролю мають бути частиною діяльності ОУЗ із загального управління МЕК СП, оцінки її ефективності, а також складання звітності.

Процеси ризик-менеджменту добре узгоджується з принципами системного аналізу, головним завданням якого є вивчення проблемної ситуації, з'ясування її причин, вироблення варіантів її усунення, прийняття рішення та організацією подальшого функціонування системи, що вирішує проблемну ситуацію [16].

Метою застосування системного аналізу, як і ризик-менеджменту, є підвищення ступеня обґрунтованості прийнятого рішення, розширення безлічі варіантів, серед яких проводиться обґрунтований вибір.

Методи та процедури системного аналізу спрямовані на виявлення цілей, висування альтернативних варіантів вирішення проблем, виявлення масштабів невизначеності по кожному з варіантів та зіставлення варіантів за тими чи іншими критеріями ефективності, а також пов'язаних організаційних завдань, що також стосується процесів ризик-менеджменту.

Окрему групу завдань системного аналізу складають завдання дослідження комплексу взаємодій аналізованих об'єктів із зовнішнім середовищем та альтернатив розвитку системи у часі та у просторі.

У системному аналізі використовується сучасний математичний апарат та обчислювальні системи, а також об'єднання формальних та неформальних методів аналізу та синтезу з використанням імітаційних моделей.

Виявлення та вирішення проблем управління в ієрархічних системах, вибір їх оптимальної структури, режимів функціонування та організації взаємодії між підсистемами будуватиметься на спільній роботі системних аналітиків, побудованої на принципах [16]:

- *принцип кінцевої мети* (абсолютний пріоритет кінцевої (глобальної) мети);
- *принцип єдності* (спільний розгляд системи як цілої сукупності елементів);
- *принцип функціональності* (спільний розгляд структури та функції з пріоритетом функції над структурою);
- *принцип розвитку, адаптації* (облік змінності системи, її здатність до розвитку, адаптації, розширення, заміни частин, нарощування, удосконалення, накопичення інформації);
- *принцип ієрархії* (введення частин та їх ранжування з метою встановлення порядку їх розгляду);
- *принцип зв'язності* (виявлення зв'язків між елементами системи та виявлення зв'язків із зовнішнім середовищем (облік зовнішнього середовища);
- *принцип невизначеності* (облік невизначеностей та випадковостей у системі);
- *принцип еквіфінальності* (досягнення системою необхідного кінцевого стану виключно власними характеристиками);
- *принцип модульної побудови* (виділення модулів у системі та розгляд її як сукупності модулів).

Перелічені принципи системного аналізу мають високий ступінь спільності з процесами ризик-менеджменту як за цілями, так і засобами їх реалізації.

Універсальним засобом дослідження різних властивостей складних організаційно-технічних систем довільної природи є методи теорії графів, оскільки вони дозволяють адекватно відображати їх склад, структуру, функціонування різних рівнів декомпозиції.

Для аналізу та наближеної оцінки живучості МЕК СП може бути застосована математична модель у вигляді ймовірності зваженого графа, вершинам якого відповідають вузли та комплекси засобів зв'язку, а ребрам – канали зв'язку, що їх з'єднують [17].

Центральною ідеєю дослідження складних організаційно-технічних систем методом моделювання за допомогою графів є те, що на кожному кроці моделювання, зокрема імітаційного, граф будь-якої природи із довільними властивостями стає детермінованим із фіксованими значеннями параметрів властивостей [17].

Так, якщо структура графа є ймовірністю вираженою, то шляхом розіграшу ймовірностей існування вершин та ребер фіксується конкретна реалізація структури, тобто з вихідного графа виключається частина вершин та ребер. Якщо значення параметрів властивостей залежить від часу, то фіксується момент часу, з якого обчислюється значення параметрів властивостей. У якості вагових коефіцієнтів вершин використовуються ймовірності збереження вузлів при заданій моделі завдання ударів, а як вагові коефіцієнти каналів зв'язку – ймовірності їх збереження при заданій моделі постановки перешкод.

Можливість одночасного обліку у моделі впливу противника зброєю на вузли (центри зв'язку) та перешкодами на канали зв'язку розширює можливості моделі на оцінку стійкості МЕК СП. Як показник живучості використовується ймовірність збереження шляху передачі інформації між довільними вузлами зв'язку і та сама ймовірність, але за умови, що кількість транзитів може обмежуватися.

З урахуванням викладеного методу аналізу критичності окремих елементів МЕК СП пропонується будувати на вимогах щодо проведення аналізу критичності відмов елементів складних систем, викладених у [18]. Для МЕК СП можливі три основні види відмов їх елементів множини $C(a,b)$:

- 1) відмови, які впливають на виконання критичної функції ($F_{кр}$) МЕК СП загалом;
- 2) відмови, що призводять до погіршення якісних та/або часових характеристик виконання функціональних завдань, але які не призводять до критичного стану самої МЕК СП або призводять до частково працездатного її стану;
- 3) відмови, що призводять до критичного стану МЕК СП (при цьому неминучий значний збиток для системи в цілому при виконанні функціональних завдань).

На першому етапі проводиться аналіз критичності безлічі функцій F , що виконуються системою, з паралельним розкладанням графа МЕК СП на приватні підграфи окремих підсистем, що виконують критичні функції $F_{кр}$.

На другому етапі кожна з даних $F_{кр}$ розкладається на безліч простих завдань (процесів), виконання яких обумовлює нормальне функціонування відповідної підсистеми МЕК СП.

Третій етап аналізу полягає у визначенні кратності використання окремих елементів підсистем МЕК СП у вирішенні критичних завдань, що забезпечують виконання $F_{кр}$.

На четвертому етапі проводять розрахунок нормованого показника кратності критичності кожного з елементів підсистем МЕК СП.

Як було зазначено, на першому етапі аналізу критичності елементів МЕК СП з безлічі функцій F , покладених на неї у нормальних умовах експлуатації, виділяють групу $F_{кр} - F^*$, порушення виконання яких може призвести до критичних станів системи. Таким чином, формується група з i функцій для даної МЕК СП, виконання яких повинно забезпечуватися навіть в екстремальних умовах експлуатації. Якісні характеристики виконання цих $F_{кр}$ будуть визначальними для якості живучості системи.

Далі з кожної $F_{кр} f_n^* (n=1, \dots, i)$ формується власний підграф $G(a,b)$, що містить всі елементи, які беруть участь (можуть брати участь) у її реалізації, шляхом розбиття графа $G(a,b)$ на підграфи $G(a,b)$. Підграфи мають, як правило, ієрархічну структуру, що відображає взаємозв'язок керуючого та керованих елементів підсистеми. Для кожного з підграфів G формуються масиви $M_n(c_k)$ з елементів, що входять до них і одновимірні масиви $M_{ж_b}(p_c)$ відповідних їм показників живучості.

Другим етапом є процедура формування множин Z_n приватних завдань $z_{nj} (j=1, \dots, e)$ щодо прийому, зберігання, обробки та видачі інформаційних та керуючих повідомлень (команд, сигналів), що виконуються групами елементів та/або окремими елементами, які входять до підграфа G даної $F_{кр}$. Таким чином на другому етапі формується i груп критичних завдань, що полегшують подальше визначення безлічі критичних елементів МЕК СП. Результати визначення безлічі критичних завдань заносяться до i одновимірних масивів M_{z_n} .

На третьому етапі проводиться аналіз критичності окремих елементів $c_k (k = 1, \dots, g)$ кожної з функціональних підсистем МЕК СП. При цьому для кожного з i -підграфів G формуються матриці критичності $M_{F_{крn}}(z_{nj}, c_k)$ з елементів c_k що входять до їх складу. Елементи даних матриць m_{jk} на перетині рядків, відповідних певним критичним завданням z_{nj} , зі стовпцями, відповідними елементам c_k аналізованого підграфа, заповнюються числовими значеннями відповідно до правил:

- 1) якщо відмова елемента c_k для даної критичної задачі z_{nj} відноситься до виду 1 – значення елемента m_{jk} матриці $M_{F_{крn}}(z_{nj}, c_k)$ дорівнює 0;

2) якщо відмова елемента c_k для даної критичної задачі z_{nj} відноситься до виду 2 – значення елемента m_{jk} матриці $M_{F_{крп}}(z_{nj}, c_k)$ дорівнює 0,5;

3) якщо відмова елемента c_k для даної критичної задачі z_{nj} відноситься до виду 3 – значення елемента m_{jk} матриці $M_{F_{крп}}(z_{nj}, c_k)$ набуває значення 1;

4) якщо для виконання критичної задачі z_{nj} використовуються d паралельно включених однотипних структурних елементів c_k , що входять в аналізований підграф G_n , то відповідний елемент m матриці $M_{F_{крп}}(z_{nj}, c_k)$ прийме значення в d разів менше значення, що визначається за правилами 1–3.

Четвертим етапом аналізу є визначення кількісного значення показника кратності критичності – v_k всіх структурних елементів c_k кожної з i функціональних підсистем МЕК СП.

Визначення кількісного значення v_k проводиться у чотири дії:

1) визначення абсолютного значення величини критичності $m_{\Sigma k}$ елемента c_k n -ї підсистеми МЕК СП шляхом підсумовування значень всіх елементів m_{jk} k -го стовпця матриці критичності $M_{F_{крп}}(z_{nj}, c_k)$;

2) визначення сумарного значення критичності $m_{\Sigma k}$ всіх елементів c_k n -ї підсистеми МЕК СП шляхом підсумовування значень $m_{\Sigma k}$ всіх елементів c_k , що утворюють цю підсистему;

3) визначення нормованого значення величини критичності $\{m_{\Sigma k}\}$ для кожного елемента c_k n -ї підсистеми МЕК СП згідно з виразом (1):

$$\{m_{\Sigma k}\} = \frac{m_{\Sigma k}}{m_{\Sigma n}}; \quad (1)$$

4) розрахунок значення показника v_k проводити за формулою (2):

$$v_k = \frac{1}{m_{\Sigma k}}. \quad (2)$$

Результатом проведення аналізу критичних відмов елементів МЕК СП відповідно до запропонованої методики буде i одновимірних масивів $V_n(c_k)$, що містять значення показника кратності критичності v_k всіх g елементів критичних підсистем МЕК СП [19; 20].

Для оцінки живучості МЕК СП загалом необхідно провести оцінку живучості множини i критичних підсистем з урахуванням критичності їх окремих елементів.

Як було зазначено, практично всі підсистеми МЕК СП матимуть ієрархічну структуру. Тому при оцінці їх живучості в запропонованому методі пропонується використовувати як відомі підходи (детерміновану оцінку та імітаційну модель оцінки структурної живучості ієрархічних систем), так і математичний апарат, що враховує показник кратності критичності елементів, що забезпечують функціональну живучість визначальних підсистем.

Для подальшого проведення обчислень приймемо дві умови:

1) система має живучість, якщо всі i критичних підсистем мають мінімально-допустимий рівень живучості;

2) система залишається частково працездатною в екстремальних умовах експлуатації, якщо у кожній підсистемі залишається хоча б один шлях комунікації між різними рівнями ієрархії.

Для кількісної оцінки живучості n -ї критичної підсистеми МЕК СП пропонується використовувати мінімальне та середнє значення комплексного показника S_n , що визначається як показник живучості, який враховує її структуру та кратність критичності окремих елементів, що входять до підсистеми.

Для розрахунку мінімального значення комплексного показника живучості S_{nMIN} n -ї підсистеми МЕК СП при кратності впливів факторів, що дестабілізують l , використовується вираз (3) [19; 20]:

$$S_{nMIN}^l = \min_Y \left\{ \prod_{k=1}^g \left[p_B \left[M_{B_y}(c_k) \right] \times \left(1 - p_B \left[M_n(c_k) \right] - M_{B_y}(c_k) \right) \right] \times K_y \times \sum_{M_{B_y}(c_k)} v_k \right\}, \quad (3)$$

де Y – безліч можливих станів підсистеми з елементів g при l впливах дестабілізуючих факторах, як вказано у виразі (4):

$$Y = C_l^g = \frac{g!}{l!(g-l)!}; \quad (4)$$

K_y – показник якості функціонування підсистеми в y -му стані, що визначається з виразу (5):

$$K_y = \frac{u_y}{U}, \quad (5)$$

де u_y – кількість нормально функціонуючих вузлів нижнього рівня ієрархічної структури підсистеми МЕК СП мають можливість обміну інформацією з керуючим вузлом верхнього рівня в y -му стані;

U – загальна кількість вузлів нижнього рівня ієрархічної структури даної підсистеми МЕК СП;

$p_B[M_n(c_k)]$ – ймовірність виживання елемента c_k множини $M_{By}(c_k)$ – елементів, що вижили в стані y підсистеми;

$p_B[M_n(c_k)] - M_{By}(c_k)$ – ймовірність виживання елемента c_k з безлічі елементів $[M_n(c_k)]$ даної n -ї підсистеми загиблих у аналізованому y -му стані (не увійшли до $M_{By}(c_k)$);

v_k – кратність критичності елемента c_k даної підсистеми МЕК СП.

Для розрахунку середнього значення комплексного показника живучості S_n n -ї підсистеми МЕК СП при кратності l впливів дестабілізуючих факторів використовується вираз (6):

$$\overline{S_n^l} = \frac{\sum_{y=1}^Y \left\{ \prod_{k=1}^g [p_B[M_{By}(c_k)]] \times (1 - p_B[M_n(c_k)] - M_{By}(c_k)) \right\} \times K_y \times \sum_{M_{By}(c_k)} v_k}{Y}. \quad (6)$$

Фізичний зміст запропонованого показника близький до функції живучості F , оскільки за його допомогою можна простежити зміни живучості кількості впливів дестабілізуючих чинників.

Для аналізу живучості МЕК СП загалом доцільно використовувати безліч найменших значень показника S_{nMIN} , i усереднених значень показників S_n , що визначаються для безлічі критичних підсистем при заданих значеннях кратності l впливу дестабілізуючих факторів.

Висновки. У роботі проведено аналіз різних за змістом термінів, що визначають поняття живучості МЕК СП та встановлені залежності між сформованими науковими та класифікаційними поняттями. Встановлені взаємозв'язки між термінами та їхніми визначеннями.

Проведено аналіз визначень властивості живучості МЕК СП з погляду класичної «теорії ризику». Проведено аналіз процесів ризик-менеджменту щодо їх узгодження з принципами системного аналізу, головним завданням якого є вивчення проблемної ситуації, з'ясування її причин, виробленням варіантів її усунення, прийняттям рішення та організацією подальшого функціонування системи, що вирішує проблемну ситуацію.

Розглянута та запропонована математична модель наближеної оцінки живучості МЕК СП у вигляді ймовірності зваженого графа, вершинам якого відповідають вузли та комплекси засобів зв'язку, а ребрам – канали зв'язку, що їх з'єднують. Визначені шляхи вирішення проблеми оцінки живучості МЕК СП та надана пропозиція щодо методів її вирішення.

Запропоновано оцінку живучості МЕК СП, заснованої на безлічі показників, що дозволяє проводити аналіз живучості та обґрунтований вибір найкращого архітектурно-структурного варіанта побудови (реконфігурації) мереж та їх критичних підсистем.

Подальші шляхи досліджень пов'язані з пошуком шляхів підвищення живучості МЕК СП в умовах масованого застосування противником безпілотних літальних апаратів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Надежность и эффективность в технике. Справочник: в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1988. Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. С. 328.
2. Стекольников Ю. И. Живучесть систем. СПб.: «Политехника», 2002. С. 152. URL: <https://www.google.com/search?client=firefox-b> (дата звернення: лютий 2023 р.).
3. Кочкаров А. А., Малинецкий Г. Г. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты. М., 2005. URL: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=> (дата звернення: лютий 2023 р.).
4. Горшков В. В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем // Кибернетика АН УОТ. 1982. № 1. С. 104–107.
5. Сафонов Р. А. Методика оценки живучести сложных систем военного назначения. 2003. С. 1. УДК 519.876.
6. Черкесов Г. Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. М.: Знание, 1987. 55 с.
7. Попков В. К. Математические модели живучести сетей связи. Новосибирск: СО АН СССР. 1990. 235 с.
8. Искольный Б. Б., Максимов Р. В., Шарифуллин С. Р. Оценка живучести распределенных информационно-телекоммуникационных сетей // Вопросы кибербезопасности. 2017. № 5 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zhivuchesti-raspredeleennyh-informatsionno-telekommunikatsionnyh-setey> (дата звернення: лютий 2023 р.).
9. ДСТУ В3265 – 95. Зв'язок військовий. Терміни та визначення. [Чинний від 1997–01–01]. К.: УкрНДІССІ, 1995. 23 с.
10. Військовий стандарт 01.112.001. Військова система стандартизації. Військовий зв'язок. Терміни та визначення. Міністерство оборони України, Київ, 2006. Реєстраційний номер А2187/000020.
11. Глушков В. М. Словарь по кибернетике. К.: Гл. ред. УСЭ, 1979. С. 87.
12. Горшков В. В. Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем // Кибернетика АН УОТ. 1982. № 1. С. 104–107.
13. Словарь терминов и определений ITIL. Словарь терминов ITIL® на русском языке, версия 2.0, 29 июля 2011 г. на основе английской версии 1.0, 29 июля 2011. С. 114. Crown Copyright 2011].
14. International standard ISO 31000. Second edition 2018-02 Risk management - Guidelines.
15. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент рисков. Принципы и руководства (ISO 31000:2018, IDT).
16. Згуровский М. Г., Панкратова Н. Д. Системный анализ. Проблемы. Методология. Приложения. Киев: Наукова думка, 2005. С. 304.
17. Омельченко А. В. Теория графов. М.: МЦНМО, 2018. 416 с.
18. ГОСТ 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения: [введен 1997-01-01]. М.: Издательство стандартов, 1996. 12 с. [Межгосударственный стандарт].
19. Харыбин А. В. Метод оценки живучести распределенных информационно-управляющих систем // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Харків: «ХАІ», 2007. № 8 (27). URL: <http://nti.khai.edu:57772/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2007/REKS807/Titul.htm> (дата звернення: лютий 2023 р.).
20. Надежность и эффективность в технике. Справочник: в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдуевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1987. Т. 2: Математические методы в теории надежности и эффективности / Под ред. Б. В. Гнеденко. 280 с.