

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2020.1-59.3>  
УДК 629.7.014-519.064.5-022.332:621.311.25-047.36

**Г. В. Фесенко**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

## **ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНОГО ОБ'ЄКТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ФЛОТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

*Сучасний стан розвитку безпілотної авіації та мініатюризація спеціального бортового обладнання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), роблять їх ефективним інструментом підвищення надійності, живучості та розширення можливостей штатних систем моніторингу атомних електростанцій (АЕС) та інших потенційно небезпечних об'єктів (ПНО). БПЛА здатні виконувати функції засобів вимірювання та розгортати багатоканальні бездротові мережі зв'язку між засобами вимірювання та кризовими центрами. Метою статті є розробка теоретико-множинної моделі системи моніторингу ПНО з використанням багатоцільового флоту безпілотних літальних апаратів на прикладі системи моніторингу Запорізької атомної станції (АЕС). Побудована загальна структурна схема системи моніторингу ПНО та розроблена теоретико-множинна модель на її основі. Сформульовані рекомендації щодо корегування моделі у разі розгортання багатоцільового флоту БПЛА. Відзначено, що для формування багатоцільового флоту БПЛА необхідно володіти інформацією про: засоби вимірювання, функції яких можуть виконувати БПЛА; об'єкти системи моніторингу ПНО, між якими розгортаються бездротові канали, кількість таких каналів, бездротові технології, що використовуються; протяжність бездротової мережі; додаткові функції, які повинен виконувати багатоцільовий флот (фото, відео, тепловізійний моніторинг тощо); кількість змін БПЛА для забезпечення безперебійної роботи утворюваних ними бездротових каналів та виконання інших завдань післяаварійного моніторингу. Показано процес розробки теоретико-множинної моделі та здійснення її корегування після розгортання багатоцільового флоту БПЛА на прикладі системи*

© Г. В. Фесенко, 2020

---

моніторингу Запорізької АЕС. Визначені можливості флоту, зокрема щодо утворення шістнадцяти бездротових мереж і виконання функцій повітряних станцій радіаційного й метеорологічного контролю. Показано варіант розгортання багатоцільового флоту у складі п'яти груп БПЛА та однієї повітряної станції радіаційного контролю для виконання функцій засобів вимірювання й каналів зв'язку, що відмовили внаслідок аварії на АЕС.

Ключові слова: теоретико-множинна модель, безпілотний літальний апарат, потенційно небезпечний об'єкт, система моніторингу, кризовий центр, бездротова мережа.

*Статья посвящена разработке теоретико-множественной модели системы мониторинга потенциально опасного объекта (ПОО) с использованием многоцелевого флота беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Построена общая структурная схема системы мониторинга ПОО и разработана теоретико-множественная модель на ее основе. Сформулированы рекомендации по корректировке модели в случае развертывания многоцелевого флота БПЛА. Показан процесс разработки теоретико-множественной модели и осуществления ее корректировки после развертывания многоцелевого флота БПЛА на примере системы мониторинга Запорожской атомной станции (АЭС). Определены возможности многоцелевого флота и показан вариант его развертывания в составе пяти групп БПЛА и одной воздушной станции радиационного контроля для выполнения функций средств измерения и каналов связи, отказавших в результате аварии на АЭС.*

Ключевые слова: теоретико-множественная модель, беспилотный летательный аппарат, потенциально опасный объект, система мониторинга, кризисный центр, беспроводная сеть.

*The current state of development of unmanned aerial vehicles (UAVs) and the miniaturization of special on-board equipment of them make them an effective tool for improving the reliability, survivability and capacity of regular monitoring systems for nuclear power plants (NPP) and other potentially dangerous objects (PDOs). UAVs are able to perform the functions of measuring instruments and deploy multi-channel wireless communication networks between measuring instruments and crisis centers. The aim of the paper is to develop a set-theoretic model of the PDO monitoring system using a multi-purpose fleet of UAVs on the example of the Zaporizhzhia NPP monitoring system. The general structural scheme of the PDO monitoring system is constructed and the set-theoretical model based on it is developed. Recommendations for model adjustment in case of deployment of a multi-purpose UAV fleet are formulated. It is noted that for the*

---

*formation of a multi-purpose fleet of UAVs it is necessary to have information about: measuring instruments, the functions of which can be performed by UAVs; objects of the PDO monitoring system, between which wireless channels are deployed; the number of the channels, wireless technologies used; the length of the wireless network; additional functions to be performed by the multi-purpose fleet (photos, videos, thermal imaging monitoring, etc.); the number of UAV shifts to ensure uninterrupted operation of the wireless channels formed by them and to perform other tasks of the post-accident monitoring. The process of developing a set-theoretic model and its correction after the deployment of a multi-purpose UAV fleet is shown on the example of the Zaporizhzhia NPP monitoring system. The capabilities of the fleet have been identified, in particular regarding the formation of sixteen wireless networks and the performance of the functions of air stations for radiation and meteorological monitoring. The deployment of a multi-purpose fleet consisting of five groups of UAVs and one airborne radiation control station to perform the functions of measuring instruments and communication channels that failed due to a nuclear accident is shown.*

*Keywords: set-theoretic model, unmanned aerial vehicle, potentially dangerous object, monitoring system, crisis center, wireless network.*

**Вступ.** На сьогоднішній день в Україні налічується біля 26,5 тисяч потенційно небезпечних об'єктів (ПНО), більшість з яких характеризуються великою імовірністю виникнення аварій внаслідок низького рівня безпеки виробництва, недостатньої підготовки кадрового ресурсу й застарілих технологій. Серед таких об'єктів особливо місце посідають атомні електростанції (АЕС), на яких, не дивлячись на постійне зростання рівня культури безпеки та постійне підвищення рівня надійності ядерної техніки й технологій, імовірність виникнення аварійних ситуацій залишається достатньо високою, про що свідчить, зокрема, аварія на японській АЕС Фукусіма-1. У разі виникнення аварій штатні дротові та радіомережі зв'язку можуть виходити з ладу, створюючи дефіцит моніторингової інформації і ускладнюючі тим самим процес реагування на радіаційну аварію. Крім того, можуть відмовляти технічні засоби контролю параметрів безпеки й стану систем реакторної установки системи аварійного та післяаварійного моніторингу (ПАМС), а також технічні засоби радіаційного й метеорологічного контролю автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО).

Сучасний стан розвитку безпілотної авіації й мініатюризація спеціального бортового обладнання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) роблять їх ефективним інструментом підвищення надійності, живучості та розши-

---

рення можливостей штатних систем моніторингу АЕС та інших ПНО (СМ АЕС і ПНО). БПЛА здатні виконувати функції засобів вимірювання (ЗВ) та розгортати багатоканальні бездротові мережі зв'язку між штатними непошкодженими ЗВ та кризовими центрами (КЦ). Крім того, застосування БПЛА в складі АСКРО дозволить значно розширити перелік специфічних завдань, що вирішуються в рамках збору даних про радіаційну обстановку, а саме: здійснювати радіаційне картографування місцевості й пошук джерел радіоактивного випромінювання, відбирати проби та визначати маршрути з найменшим рівнем радіаційного забруднення для проведення евакуації чи введення сил і засобів ліквідації радіаційної аварії.

**Постановка задачі.** Аналіз останніх публікацій вітчизняних та закордонних авторів з питань використання БПЛА для моніторингу АЕС та інших ПНО показує, що вони розподіляються на публікації, присвячені питанням:

– використання БПЛА для вимірювання потужності дози гамма-випромінювання, радіаційного картографування місцевості, здійснення дистанційного відеоспостереження й фотографування підстильної поверхні у важкодоступних місцях або зонах періодичного контролю під час радіаційних аварій [1-4];

– розширення функцій штатних АСКРО [5, 6];

– доставки в зону радіоактивного забруднення наземних тимчасових автоматизованих пристроїв контролю факторів небезпеки за допомогою БПЛА з розробкою схеми покриття зони радіаційного забруднення касетним та одиночним способами доставки пристроїв контролю [7];

– створення багатOVERСІЙНИХ систем моніторингу з використанням технологій Інтернету дронів з висвітленням питань забезпечення надійності й живучості СМ ПНО з використанням багатоцільових флотів (БЦФ) БПЛА, а також питань планування їх застосування [8-10].

І хоча вказані публікації охоплюють великий спектр проблем використання БПЛА під час моніторингу АЕС та інших ПНО, у них не здійснювався теоретико-множинний опис СМ таких об'єктів у разі застосування БЦФ.

**Мета.** Метою статті є розробка теоретико-множинної моделі СМ ПНО з використанням БЦФ БПЛА на прикладі СМ Запорізької АЕС.

**Результати дослідження.** Як правило, СМ ПНО має у своєму складі дві підсистеми моніторингу (ПСМ), з яких одна відповідає за контроль па-

раметрів безпеки технологічного обладнання й виробничого середовища у приміщеннях ПНО, а інша, за допомогою спеціальних постів контролю (ПК), здійснює на прилеглий території вимірювання параметрів, що характеризують ступень забруднення навколишнього середовища та метеорологічні умови. Структурна схема СМ ПНО у загальному вигляді представлена на рис. 1. Відзначимо, що ця схема є базовою й може мати у своєму складі додаткові засоби й канали зв'язку в залежності від специфіки виконуваних цією системою завдань.

Виходячи з рис. 1, СМ ПНО може бути описана наступною множиною елементів:

$$СМ ПНО = \left\langle \begin{array}{l} ПСМ А, ПСМ В, КЦ, ЗМ А, ЗМ В, С, \\ ПЗОІ, W_{С-ПЗОІ}, W_{ПЗОІ-КЦ}, ПК, D, ОбС, W_{D-ОбС}, \\ W_{ОбС-ЦПК}, W_{ЦПК-КЦ} \end{array} \right\rangle, \quad (1)$$

де *ПСМ А* – ПСМ, що здійснює моніторинг у приміщеннях ПНО;

*ПСМ В* – ПСМ, що здійснює моніторинг на території, що прилягає до ПНО;

*КЦ* – кризовий центр;

*ЗМ А* – множина зон моніторингу (ЗМ) ПСМ А:

$$ЗМ А = \{ЗМ Ai\}, \quad (2)$$

де  $i = \overline{1, n}$ ;

*ЗМ В* – множина ЗМ ПСМ В:

$$ЗМ В = \{ЗМ Bj\}; \quad (3)$$

*С* – множина ЗВ ПСМ А:

$$С = \{ci\_a(Ai)\}, \quad (4)$$

де  $a(Ai) = \overline{1, a(Ai)}$ ;

*ПЗОІ* – множина пристроїв збору та обробки інформації (ПЗОІ) ПСМ А:

$$ПЗОІ = \{ПЗОІi\}, i = \overline{1, n}; \quad (5)$$

$W_{С-ПЗОІ}$  – множина каналів зв'язку між ЗВ і ПЗОІ у складі ПСМ А:

$$W_{С-ПЗОІ} = \{W_{Ci\_a(Ai)-ПЗОІi}\}; \quad (6)$$

$W_{ПЗОІ-КЦ}$  – множина каналів зв'язку між ПЗОІ та КЦ;

$$W_{ПЗОІ-КЦ} = \{w_{ПЗОІ, КЦ}\}; \quad (7)$$

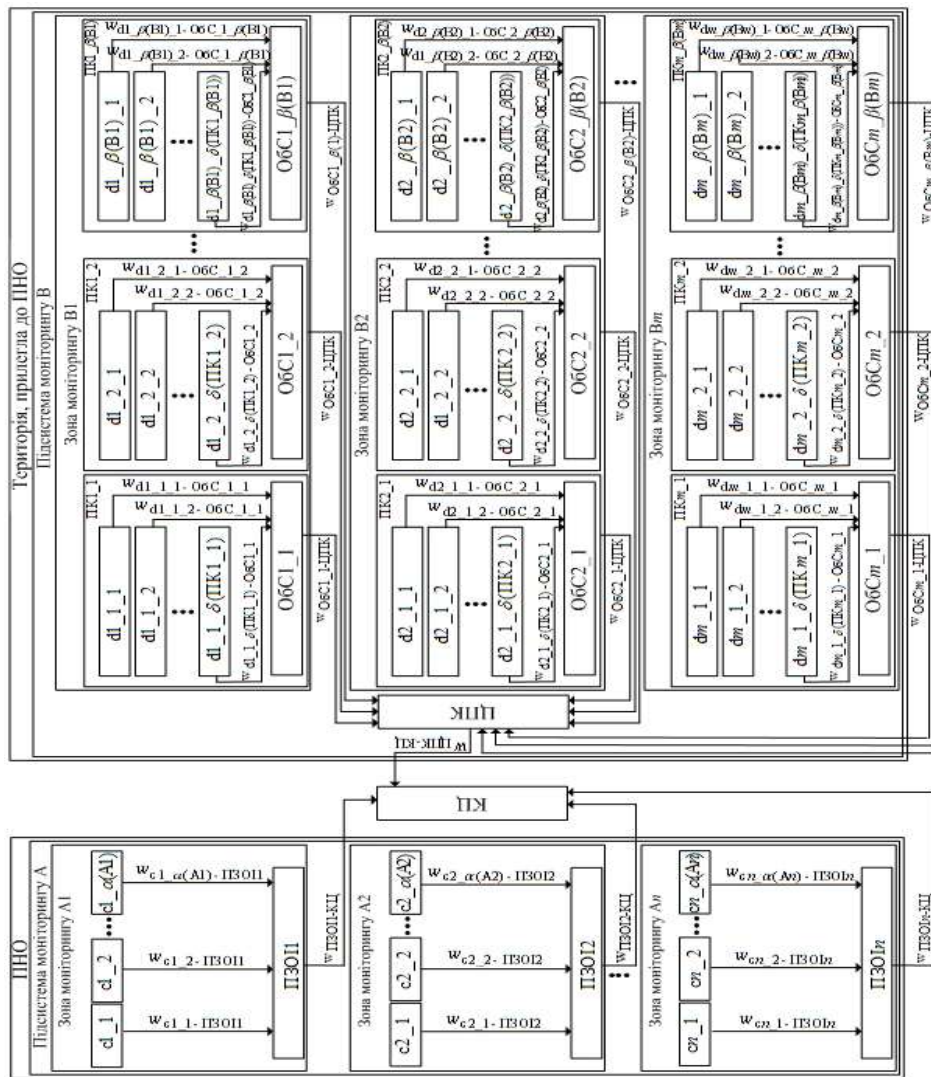


Рис. 1. Структурна схема СМ ПНО

$ПК$  – множина ПК у складі ПСМ В:

$$ПК = \{ПК_j_b(B_j)\}, \quad (8)$$

де  $b(B_j) = \overline{1, b(B_j)}$ ;

$D$  – множина ЗВ ПК ПСМ В:

$$D = \{dj\_b(Bj)\_k(ПКj\_b(Bj))\}, \quad (9)$$

де  $k(ПКj\_b(Bj)) = 1, d(ПКj\_b(Bj))$ ;

ОбС – множина обчислювальних систем (ОбС) ПК ПСМ В:

$$ОбС = \{ОбСj\_b(j)\}; \quad (10)$$

$W_{D-ОбС}$  – множина каналів зв'язку між ЗВ та ОбС ПК:

$$W_{D-ОбС} = \{w_{dj\_b(Bj)\_k(ПКj\_b(Bj))-ОбСdj\_b(Bj)}\}; \quad (11)$$

$W_{ОбС-ЦПК}$  – множина каналів зв'язку між ОбС ПК та центральним пунктом контролю (ЦПК) ПСМ В:

$$W_{ОбС-ЦПК} = \{w_{ОбСj\_b(Bj)-ЦПК}\}; \quad (12)$$

$w_{ЦПК-КЦ}$  – канал зв'язку між ЦПК та КЦ.

У разі виникнення аварії на ПНО для підвищення живучості, надійності та розширення функцій його СМ може розгортатися багатоцільовий флот БПЛА (БЦФ).

Застосування БЦФ дозволяє одиничним БПЛА або їх групам у повному обсязі або частково брати на себе функції певних засобів вимірювання та каналів зв'язку, які відмовили внаслідок аварії.

Варто відзначити, що, як правило, одиничний БПЛА може брати на себе функції декількох непрацездатних ЗВ, а група БПЛА – забезпечувати утворення одного та більше бездротових каналів зв'язку (в тому числі з використанням різних бездротових технологій або їх комбінацій) замість одного непрацездатного дротового (радіо) каналу. Для реалізації вказаних функцій відповідні елементи СМ ПНО оснащуються необхідним комунікаційним обладнанням.

Для визначення якісного та кількісного складу БПЛА у складі БЦФ необхідно, як правило, володіти наступною інформацією:

– функції яких саме засобів вимірювання дозволяє виконувати бортове обладнання конкретного БПЛА;

– яку кількість бездротових каналів зв'язку й з використанням яких технологій необхідно утворити між ПЗОІ / ЦПК / ОбС і КЦ та між ОбС і ЦПК;

– якою є відстань між ПЗОІ / ЦПК / ОбС і КЦ та між ОбС і ЦПК (для визначення кількості БПЛА у складі групи, що забезпечує бездротовий канал між ними);

---

– які саме додаткові функції післяаварійного моніторингу покладаються на БЦФ з урахуванням можливості виконання одним БПЛА декількох таких функцій;

– якою повинна бути кількість змін БПЛА для забезпечення безперебійної роботи утворюваних ними бездротових каналів та виконання інших завдань післяаварійного моніторингу;

– види резервування БПЛА та їх груп тощо.

У разі розгортання БЦФ в інтересах СМ ПНО теоретико-множинна модель, представлена виразом (1), потребуватиме корегування шляхом введення до неї груп БПЛА розгорнутого БЦФ, а також шляхом позначення ЗВ та каналів зв'язку СМ ПНО, що перебувають у непрацездатному стані, знаком інверсії « $\bar{\quad}$ ».

Проілюструємо процес розробки теоретико-множинної моделі та здійснення її корегування після розгортання БЦФ БПЛА на прикладі СМ Запорізької АЕС (ЗАЕС).

Нехай внаслідок аварії на ЗАЕС у робочий час виникла техногенна надзвичайна ситуація місцевого рівня, що обумовила переведення ЗАЕС у стан загальної аварійної ситуації, що відповідає:

– режиму комунальної аварії Системи аварійної готовності та реагування експлуатуючої організації і АЕС;

– режиму надзвичайної ситуації регіонального рівня Єдиної державної системи цивільного захисту [11].

Такий стан АЕС згідно [11] передбачає активацію внутрішнього кризового центру (ВКЦ) (через 30 хвилин) і зовнішнього кризового центру (через 2,5 години).

Структурна схема СМ ЗАЕС представлена на рис. 2.

Як ми можемо бачити, у якості ПСМ А на ЗАЕС виступає ПАМС, що призначена для контролю параметрів безпеки й стану систем реакторної установки (РУ) за допомогою технічних засобів контролю рівня (ТЗКР), температурного (ТЗТК) та радіоактивного контролю (ТЗРК).

Інформація від засобів вимірювання цих засобів надходить до ПЗОІ по основному та резервному дротових каналах.



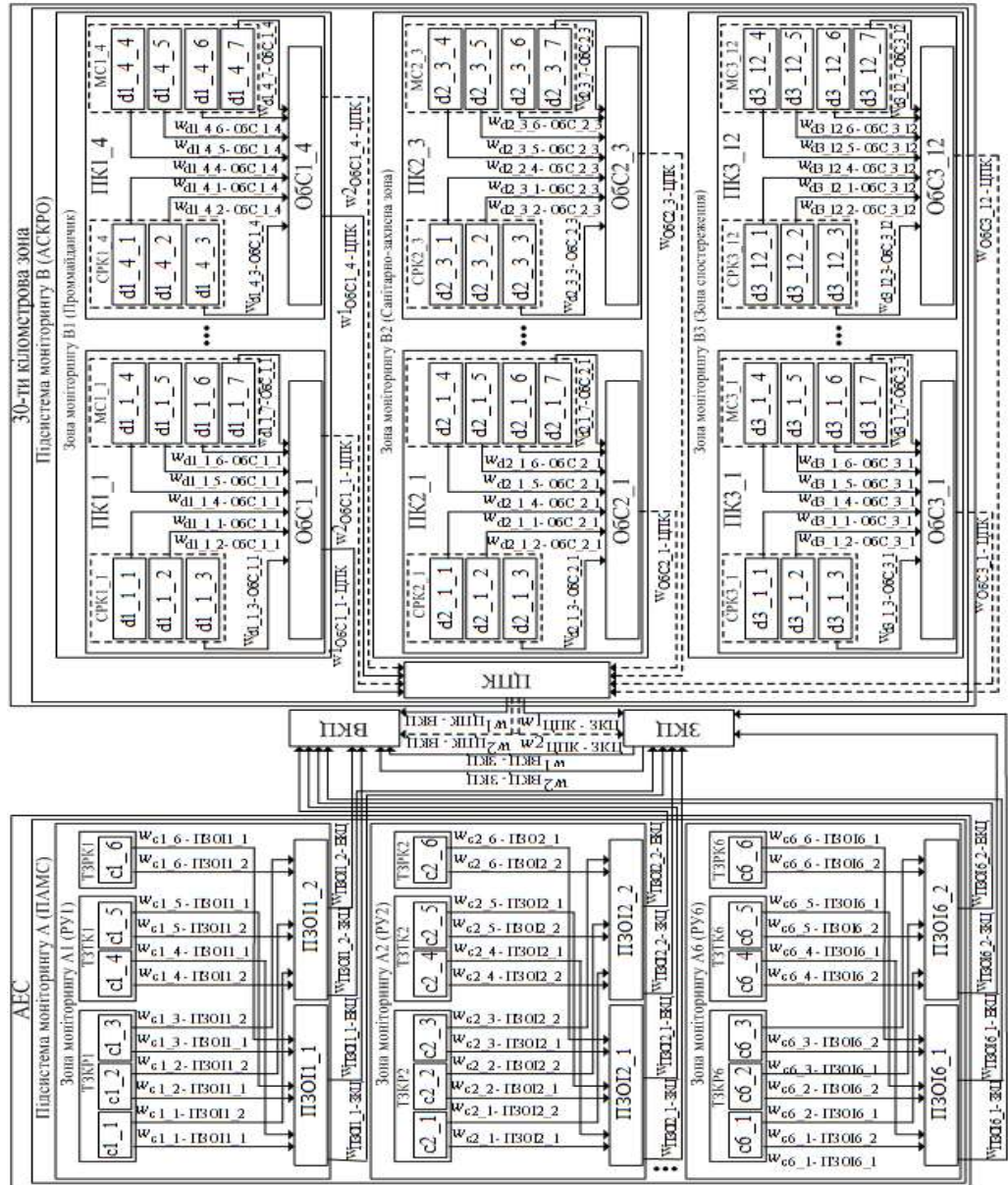


Рис. 2. Структурна схема СМ Запорізької АЕС

Усього маємо шість ЗМ, визначених за кількістю РУ АЕС.

У якості ПСМ В виступає АСКРО, що призначена для автоматичного моніторингу радіаційної обстановки (РО) на:

---

– проммайданчику (ПМ) (ЗМ В1), на території якого розташовані основні джерела радіоактивного забруднення;

– у санітарно-захисній зоні (СЗЗ) (ЗМ В2), яка виконує функції додаткового бар'єру, що зменшує можливий радіаційний вплив на населення;

– у зоні спостереження (ЗС) (ЗМ В3), що є зоною з радіусом 30 км з населеними пунктами, розташованими в межах цієї зони.

У кожній із цих зон спеціальні ПК забезпечують реалізацію комплексу завдань радіаційного й метеорологічного контролю, використовуючи для цього наявні у них метеорологічні системи (МС) та системи радіаційного контролю (СРК). Дані від ЗВ, що входять до складу МС і СРК, передаються до ОБС і далі до ЦПК, ВКЦ та ЗКЦ. Радіоканали зв'язку на рис. 2 показано пунктирною лінією.

По аналогії з виразом (1) СМ ЗАЕС може бути описана наступною множиною елементів:

$$СМ ЗАЕС = \left\langle \begin{array}{l} ПСМ А(ПАМС), ПСМ В(АСКРО), ВКЦ, ЗКЦ, \\ ЦПК, ЗМ А, ЗМ В, ТЗКР, ТЗТК, ТЗРК, С, \\ ПЗОІ, W_{С-ПЗОІ}, W_{ПЗОІ-КЦ}, ПК, D, ОБС, W_{D-ОБС}, \\ W_{ОБС-ЦПК}, W_{ЦПК-ВКЦ}, W_{ЦПК-ЗКЦ}, W_{ЗКЦ-ВКЦ} \end{array} \right\rangle, \quad (13)$$

де ПСМ А(ПАМС) – підсистема моніторингу, що здійснює моніторинг на території АЕС;

ПСМ В(АСКРО) – підсистема моніторингу, що здійснює моніторинг у 30-ти кілометровій зоні навколо АЕС;

ВКЦ – внутрішній кризовий центр;

ЗКЦ – зовнішній кризовий центр;

ЦПК – центральний пункт контролю;

ЗМ А – множина ЗМ (РУ) ПСМ А (ПАМС):

$$ЗМ А = \{ЗМ А1, ЗМ А2, \dots, ЗМ А6\}; \quad (14)$$

ЗМ В – множина ЗМ ПСМ В (АСКРО):

$$ЗМ В = \{ЗМ В1, ЗМ В2, ЗМ В3\}, \quad (15)$$

де ЗМ В1 – проммайданчик;

ЗМ В2 – санітарно-захисна зона;

ЗМ В3 – зона спостереження;

---

$TЗКР$  – множина технічних засобів контролю рівня ПСМ А (ПАМС):

$$TЗКР = \{TЗКР1, TЗКР2, \dots, TЗКР6\}; \quad (16)$$

$TЗТК$  – множина технічних засобів температурного контролю ПСМ А (ПАМС):

$$TЗТК = \{TЗТК1, TЗТК2, \dots, TЗТК6\}; \quad (17)$$

$TЗРК$  – множина технічних засобів радіаційного контролю ПСМ А (ПАМС):

$$TЗРК = \{TЗРК1, TЗРК2, \dots, TЗРК6\}; \quad (18)$$

$C$  – множина ЗВ ПСМ А (табл. 1):

$$C = \{ci\_a(Ai)\}, \quad (19)$$

Таблиця 1.

**Призначення засобів вимірювання параметрів безпеки і стану систем реакторної установки ПАМС**

Засіб вимірювання	Призначення засобу вимірювання
$ci\_1$	Вимірювання температури зовнішньої поверхні днища корпусу реактора
$ci\_2$	Вимірювання температури в гермооболонці
$ci\_3$	Вимірювання температури в басейні витримки
$ci\_4$	Вимірювання рівня в басейні витримки
$ci\_5$	Контроль рівня теплоносія в корпусі реакторі
$ci\_6$	Вимірювання потужності дози випромінювання в гермооболонці

де  $i = \overline{1,6}$ ;  $a(Ai) = \overline{1,6}$ ,

причому

$$TЗКРi = \{ci\_1, ci\_2, ci\_3\}; \quad (20)$$

$$TЗТКи = \{ci\_4, ci\_5\}; \quad (21)$$

$$TЗРКи = \{ci\_6, ci\_7\}; \quad (22)$$

$ПЗОІ$  – множина ПЗОІ ПСМ А (ПАМС):

$$ПЗОІ = \{ПЗОІ_1, ПЗОІ_2, \dots, ПЗОІ_6\}; \quad (23)$$

$W_{C-ПЗОІ}$  – множина каналів зв'язку між ЗВ ПСМ А й ПЗОІ:

$$W_{C-ПЗОІ} = \{W_{C_{i_a(Ai)-ПЗОІ_1}}, W_{C_{i_a(Ai)-ПЗОІ_2}}\}, \quad (24)$$

де  $W_{C_{i_a(Ai)-ПЗОІ_1}}$  – підмножина каналів між ЗВ ПСМ А й ПЗОІ<sub>1</sub>;

$W_{C_{i_a(Ai)-ПЗОІ_2}}$  – підмножина каналів між ЗВ ПСМ А й ПЗОІ<sub>2</sub>;

$W_{ПЗОІ-ВКЦ}$  – множина каналів зв'язку між ПЗОІ й ВКЦ:

$$W_{ПЗОІ-ВКЦ} = \{w_{ПЗОІ_1-ВКЦ}, w_{ПЗОІ_2-ВКЦ}\}, \quad (25)$$

де  $w_{ПЗОІ_1-ВКЦ}$  – підмножина каналів між ПЗОІ<sub>1</sub> та ВКЦ;

$w_{ПЗОІ_2-ВКЦ}$  – підмножина каналів між ПЗОІ<sub>2</sub> та ВКЦ;

ПК – множина ПК ПСМ В (АСКРО):

$$ПК = \{ПК_{3М В1}, ПК_{3М В2}, ПК_{3М В3}\}, \quad (26)$$

де  $ПК_{3М В1}$  – підмножина ПК, розташованих на ПП:

$$ПК_{3М В1} = \{ПК1_1, ПК1_2, ПК1_3, ПК1_4\}; \quad (27)$$

$ПК_{3М В2}$  – підмножина ПК, розташованих у СЗЗ:

$$ПК_{3М В2} = \{ПК2_1, ПК2_2, ПК2_3\}; \quad (28)$$

$ПК_{3М В3}$  – підмножина ПК, розташованих у ЗС:

$$ПК_{3М В3} = \{ПК3_1, ПК3_2, \dots, ПК3_{12}\}; \quad (29)$$

МС – множина МС у складі ПК:

$$МС = \{МС_{3М В1}^{ПК}, МС_{3М В2}^{ПК}, МС_{3М В3}^{ПК}\}, \quad (30)$$

де  $МС_{3М В1}^{ПК}$  – підмножина МС у складі ПК, розташованих на ПП:

$$МС_{3М В1}^{ПК} = \{МС1_1, МС1_2, МС1_3, МС1_4\}; \quad (31)$$

$МС_{3М В2}^{ПК}$  – підмножина МС у складі ПК, розташованих у СЗЗ:

$$МС_{3М В2}^{ПК} = \{МС2_1, МС2_2, МС2_3\}; \quad (32)$$

$МС_{3М В3}^{ПК}$  – підмножина МС у складі ПК, розташованих у ЗС:

$$МС_{3М В3}^{ПК} = \{МС3_1, МС3_2, \dots, МС3_{12}\}; \quad (33)$$

СРК – множина СРК у складі ПК:

$$CPK = \{CPK_{3M B1}^{PK}, CPK_{3M B2}^{PK}, CPK_{3M B3}^{PK}\}, \quad (34)$$

де  $CPK_{3M B1}^{PK}$  – підмножина CPK у складі ПК, розташованих на ПП:

$$CPK_{3M B1}^{PK} = \{CPK1\_1, CPK1\_2, CPK1\_3, CPK1\_4\}; \quad (35)$$

$CPK_{3M B2}^{PK}$  – підмножина CPK у складі ПК, розташованих у СЗЗ:

$$CPK_{3M B2}^{PK} = \{CPK2\_1, CPK2\_2, CPK2\_3\}; \quad (36)$$

$CPK_{3M B3}^{PK}$  – підмножина CPK у складі ПК, розташованих у ЗС :

$$CPK_{3M B3}^{PK} = \{CPK3\_1, CPK3\_2, \dots, CPK3\_12\}; \quad (37)$$

$D$  – множина ЗВ у складі ПК ПСМ В (табл. 2):

$$D = \{D_{3M B1}^{PK}, D_{3M B2}^{PK}, D_{3M B3}^{PK}\}, \quad (38)$$

Таблиця 2.

**Призначення засобів вимірювання ПК АСКРО**

Система поста контролю	Засіб вимірювання	Призначення засобу вимірювання
$CPKj\_b(j)$	$dj\_b(Bj)\_1$	потужність дози гама-випромінювання
	$dj\_b(Bj)\_2$	об'ємна активність радіоактивних аерозолів
	$dj\_b(Bj)\_3$	об'ємна активність радіонукліда йоду ( $I^{131}$ )
$MCj\_b(j)$	$dj\_b(Bj)\_4$	вимірювання швидкості і напрямку вітру
	$dj\_b(Bj)\_5$	вимірювання температури повітря
	$dj\_b(Bj)\_6$	вимірювання відносної вологості
	$dj\_b(Bj)\_7$	вимірювання атмосферного тиску

де  $D_{3M B1}^{PK}$  – підмножина ЗВ у складі ПК, розташованих на ПП:

$$D_{3M B1}^{PK} = \{d1\_b(B1)\_k(ПК1\_b(B1))\}, \quad (39)$$

де  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $k(ПК1\_b(B1)) = \overline{1,7}$ ,

причому

$$CPK_{3M B1}^{PK} = \{d1\_b(B1)\_1, d1\_b(B1)\_2, d1\_b(B1)\_3\}; \quad (40)$$

$$MC_{3M B1}^{ПК} = \{d1\_b(B1)\_4, d1\_b(B1)\_5, \dots, d1\_b(B1)\_7\}; \quad (41)$$

$D_{3M B2}^{ПК}$  – підмножина ЗВ у складі ПК, розташованих у СЗЗ:

$$D_{3M B2}^{ПК} = \{d2\_b(B2)\_k(ПК2\_b(B2))\}, \quad (42)$$

де  $d2\_b(B2) = \overline{1,3}$ ;  $k(ПК2\_b(B2)) = \overline{1,7}$ ,

причому

$$CPR_{3M B2}^{ПК} = \{d2\_b(B2)\_1, d2\_b(B2)\_2, d2\_b(B2)\_3\}; \quad (43)$$

$$MC_{3M B2}^{ПК} = \{d2\_b(B2)\_4, d2\_b(B2)\_5, \dots, d2\_b(B2)\_7\}; \quad (44)$$

$D_{3M B3}^{ПК}$  – підмножина ЗВ у складі ПК, розташованих у ЗС:

$$D_{3M B3}^{ПК} = \{d3\_b(B3)\_k(ПК3\_b(B3))\}, \quad (45)$$

де  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;  $k(ПК3\_b(B3)) = \overline{1,7}$ ,

причому

$$CPR_{3M B3}^{ПК} = \{d3\_b(B3)\_1, d3\_b(B3)\_2, d3\_b(B3)\_3\}; \quad (46)$$

$$MC_{3M B3}^{ПК} = \{d3\_b(B3)\_4, d3\_b(B3)\_5, \dots, d3\_b(B3)\_7\}; \quad (47)$$

ОбС – множина ОбС у складі ПК:

$$ОбС = \{ОбС_{3M B1}^{ПК}, ОбС_{3M B2}^{ПК}, ОбС_{3M B3}^{ПК}\}, \quad (48)$$

де  $ОбС_{3M B1}^{ПК}$  – підмножина ОбС у складі ПК, розташованих на ПП:

$$ОбС_{3M B1}^{ПК} = \{ОбС1\_1, ОбС1\_2, ОбС1\_3, ОбС1\_4\}; \quad (49)$$

$ОбС_{3M B2}^{ПК}$  – підмножина ОбС у складі ПК, розташованих у СЗЗ:

$$ОбС_{3M B2}^{ПК} = \{ОбС2\_1, ОбС2\_2, ОбС2\_3\}; \quad (50)$$

$ОбС_{3M B3}^{ПК}$  – підмножина ОбС у складі ПК, розташованих у ЗС:

$$ОбС_{3M B3}^{ПК} = \{ОбС3\_1, ОбС3\_2, \dots, ОбС3\_12\}; \quad (51)$$

$W_{ОбС-ЦПК}$  – множина каналів зв'язку між ОбС ПК та ЦПК:

$$W_{ОбС-ЦПК} = \{w_{ОбСj\_b(Bj)-ЦПК}\}; \quad (52)$$

$W_{ЦПК-ВКЦ}$  – множина каналів зв'язку між ЦПК та ВКЦ:

$$W_{ЦПК-ВКЦ} = \{w1_{ЦПК-ВКЦ}, w2_{ЦПК-ВКЦ}\}; \quad (53)$$

де  $w1_{ЦПК-ВКЦ}$  – основний канал зв'язку між ЦПК та ВКЦ;

$w2_{ЦПК-ВКЦ}$  – резервний канал зв’язку між ЦПК та ВКЦ;

$W_{ВКЦ-ЗКЦ}$  – множина каналів зв’язку між ВКЦ та ЗКЦ:

$$W_{ВКЦ-ЗКЦ} = \{w1_{ВКЦ-ЗКЦ}, w2_{ВКЦ-ЗКЦ}\}, \quad (54)$$

де  $w1_{ВКЦ-ЗКЦ}$  – основний канал зв’язку між ВКЦ та ЗКЦ;

$w2_{ВКЦ-ЗКЦ}$  – резервний канал зв’язку між ВКЦ та ЗКЦ.

У разі виникнення відмов окремих ЗВ та каналів зв’язку СМ ЗАЕС має у своєму розпорядженні БЦФ здатний:

- виконувати функції окремих ЗВ ПК ПСМ В (АСКРО) (табл. 3);
- утворювати 2-х каналні мережі бездротового зв’язку (табл. 4), використовуючи БПЛА мультироторного (М-БПЛА) і літакового (Л-БПЛА) типів, а також технології Wi-Fi (IEEE 802.11) та LoRaWAN у порядку, представленому у [12];
- виконувати за необхідності додаткові функції післяаварійного моніторингу (табл. 5).

Таблиця 3.

**Закріплення за БПЛА функцій засобів вимірювання постів контролю АСКРО**

Система	Засіб вимірювання	БПЛА, що буде виконувати функцію групи засобів вимірювання певної системи
$СРКj\_b(j)$	$dj\_b(Bj)\_1$	$M$ - БПЛА <sup><math>СРКj\_b(j)</math></sup> або повітряна система радіаційного контролю $ПСРКj\_b(j)$
	$dj\_b(Bj)\_2$	
	$dj\_b(Bj)\_3$	
$МСj\_b(j)$	$dj\_b(Bj)\_4$	$M$ - БПЛА <sup><math>МСj\_b(j)</math></sup> або повітряна метеорологічна система $ПМСj\_b(j)$
	$dj\_b(Bj)\_5$	
	$dj\_b(Bj)\_6$	
	$dj\_b(Bj)\_7$	

Таблиця 4.

**Можливості БЦФ БПЛА щодо утворення 2-х каналних мереж бездротового зв'язку та обов'язковість їх утворення**

Бездротова мережа зв'язку	Умова обов'язкового утворення
$ПЗОі_1 - ВКЦ$	$\overline{w_{ПЗОі_1 - ВКЦ}}$
$ПЗОі_2 - ВКЦ$	$\overline{w_{ПЗОі_2 - ВКЦ}}$
$ПЗОі_1 - ЗКЦ$	$\overline{w_{ПЗОі_1 - ЗКЦ}}$
$ПЗОі_2 - ЗКЦ$	$\overline{w_{ПЗОі_2 - ЗКЦ}}$
$ОбСj_b(Bj) - ЦПК$	$\begin{cases} \overline{w_{ОбСj_b(Bj) - ЦПК}^1} \wedge \overline{w_{ОбСj_b(Bj) - ЦПК}^2}, j = 1; \\ \overline{w_{ОбСj_b(Bj) - ЦПК}}, j = 2, 3 \end{cases}$
$ОбСj_b(Bj) - ВКЦ$	$\overline{ЦПК}$
$ОбСj_b(Bj) - ЗКЦ$	$\overline{ЦПК}$
$ПСРКj_b(Bj) - ЦПК$	$(\exists dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj))) \in \overline{\in ПСРКj_b(j)(dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj)))}$
$ПСРКj_b(Bj) - ВКЦ$	$(\exists dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj))) \in \overline{\in ПСРКj_b(j)(dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj)))}$
$ПСРКj_b(Bj) - ЗКЦ$	$(\exists dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj))) \in \overline{\in ПСРКj_b(j)(dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj)))}$
$ПМСj_b(Bj) - ЦПК$	$(\exists dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj))) \in \overline{\in ПМСj_b(j)(dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj)))}$
$ПМСj_b(Bj) - ВКЦ$	$(\exists dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj))) \in \overline{\in ПМСj_b(j)(dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj)))}$
$ПМСj_b(Bj) - ЗКЦ$	$(\exists dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj))) \in \overline{\in ПМСj_b(j)(dj_b(Bj)_k(ПКj_b(Bj)))}$
$ЦПК - ВКЦ$	$\overline{w_{ЦПК - ВКЦ}^1} \wedge \overline{w_{ЦПК - ВКЦ}^2}$
$ЦПК - ЗКЦ$	$\overline{w_{ЦПК - ЗКЦ}^1} \wedge \overline{w_{ЦПК - ЗКЦ}^2}$
$ВКЦ - ЗКЦ$	$\overline{w_{ВКЦ - ЗКЦ}^1} \wedge \overline{w_{ВКЦ - ЗКЦ}^2}$



**Закріплення за БПЛА додаткових функцій післяаварійного моніторингу**

Додаткові функції післяаварійного моніторингу	БПЛА, що буде виконувати функцію
Фотомоніторинг	$M - БПЛА_w^{ФВТ}$ , $w = \overline{1, \omega}$
Відеомоніторинг	
Тепловізійний моніторинг	

Здійснимо теоретико-множинний опис груп, що утворюють бездротові мережі зв'язку (табл. 4).

1) Мережа бездротового зв'язку  $ПЗОі\_1-ВКЦ$  утворюється групою БПЛА

$$G^{ПЗОі\_1-ВКЦ} = \left\{ G_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)}^{ПЗОі\_1-ВКЦ} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)}^{ПЗОі\_1-ВКЦ}) \right\}, \quad (55)$$

де  $i = \overline{1, 6}$ ,  $\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ) = \overline{1, 2}$ ;

$G_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)}^{ПЗОі\_1-ВКЦ}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $ПЗОі\_1-ВКЦ$  :

$$G_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)}^{ПЗОі\_1-ВКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)\_ \varphi(\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ))}^{ПЗОі\_1-ВКЦ} \\ L - БПЛА_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)}^{ПЗОі\_1-ВКЦ} \end{array} \right\}, \quad (56)$$

де  $\varphi(\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ))}$ ,

$\gamma(\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)$  -го бездротового каналу зв'язку та бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)}^{ПЗОі\_1-ВКЦ}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)}^{ПЗОі\_1-ВКЦ}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(ПЗОі\_1-ВКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку.

2) Мережа бездротового зв'язку  $П ПЗОі\_2-ВКЦ$  утворюється групою БПЛА

$$G^{ПЗОі\_2-ВКЦ} = \left\{ G_{\varepsilon(ПЗОі\_2-ВКЦ)}^{ПЗОі\_2-ВКЦ} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ПЗОі\_2-ВКЦ)}^{ПЗОі\_2-ВКЦ}) \right\}, \quad (57)$$

де  $i = \overline{1, 6}$ ,  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}) = \overline{1, 2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}$  :

$$G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}} = \left\{ \begin{array}{l} M - \text{БПЛА}_{M\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})-\varphi(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}))}^{\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}} \\ L - \text{БПЛА}_{L\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}} \end{array} \right\}, \quad (58)$$

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}))}$ ,

$\gamma(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_2\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку.

3) Мережа бездротового зв'язку  $\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}$  утворюється групою БПЛА

$$G^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}} = \left\{ G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}} \cdot \eta(G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}}) \right\}, \quad (59)$$

де  $i = \overline{1, 6}$ ,  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}) = \overline{1, 2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}$  :

$$G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}} = \left\{ \begin{array}{l} M - \text{БПЛА}_{M\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})-\varphi(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}))}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}} \\ L - \text{БПЛА}_{L\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}} \end{array} \right\}, \quad (60)$$

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}))}$ ,

$\gamma(\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})}^{\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ПЗО}i\_1\text{-ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку.

4) Мережа бездротового зв'язку  $ПЗОі_2 - ЗКЦ$  утворюється групою БПЛА

$$G^{ПЗОі_2-ЗКЦ} = \left\{ G_{\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)}^{ПЗОі_2-ЗКЦ} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)}^{ПЗОі_2-ЗКЦ}) \right\}, \quad (61)$$

де  $i = \overline{1,6}$ ,  $\varepsilon(ПЗОі_2 - ЗКЦ) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)}^{ПЗОі_2-ЗКЦ}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ПЗОі_2 - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $ПЗОі_2 - ЗКЦ$ :

$$G_{\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)}^{ПЗОі_2-ЗКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{M\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)\_ \varphi(\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ))}^{ПЗОі_2-ЗКЦ} \\ L - БПЛА_{L\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)}^{ПЗОі_2-ЗКЦ} \end{array} \right\}, \quad (62)$$

де  $\varphi(\varepsilon(ПЗОі_2 - ЗКЦ)) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(ПЗОі_2 - ЗКЦ))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(ПЗОі_2 - ЗКЦ))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(ПЗОі_2 - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються.

$\eta(G_{\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)}^{ПЗОі_2-ЗКЦ}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(ПЗОі_2-ЗКЦ)}^{ПЗОі_2-ЗКЦ}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(ПЗОі_2 - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку.

5) Мережа бездротового зв'язку  $ОбСj_b(Vj) - ЦПК$  утворюється групою БПЛА

$$G^{ОбСj_b(Vj)-ЦПК} = \left\{ G_{\varepsilon(ОбСj_b(Vj)-ЦПК)}^{ОбСj_b(Vj)-ЦПК} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ОбСj_b(Vj)-ЦПК)}^{ОбСj_b(Vj)-ЦПК}) \right\}, \quad (63)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(ОбСj_b(Vj) - ЦПК) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(ОбСj_b(Vj)-ЦПК)}^{ОбСj_b(Vj)-ЦПК}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ОбСi_b(Vj) - ЦПК)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $ОбСi_b(Vj) - ЦПК$ :

$$G_{\varepsilon(ОбСj_b(Vj)-ЦПК)}^{ОбСj_b(Vj)-ЦПК} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{M\varepsilon(ОбСj_b(Vj)-ЦПК)\_ \varphi(\varepsilon(ОбСj_b(Vj)-ЦПК))}^{ОбСj_b(Vj)-ЦПК} \\ L - БПЛА_{L\varepsilon(ОбСj_b(Vj)-ЦПК)}^{ОбСj_b(Vj)-ЦПК} \end{array} \right\}, \quad (64)$$

де  $\varphi(\varepsilon(ОбСj_b(Vj) - ЦПК)) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(ОбСj_b(Vj) - ЦПК))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЦПК}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ОбСi}_b(\text{Vj})\text{-ЦПК})$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЦПК})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЦПК}}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЦПК})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЦПК}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ОбСi}_b(\text{Vj})\text{-ЦПК})$  -го бездротового каналу зв'язку.

б) Мережа бездротового зв'язку  $\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}$  утворюється групою БПЛА

$$G^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}} = \left\{ G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}} \cdot \eta(G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}}) \right\}, \quad (65)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ОбСi}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $\text{ОбСi}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}$ :

$$G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}} = \left\{ \begin{array}{l} M\text{-БПЛА}_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}} \\ L\text{-БПЛА}_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}} \end{array} \right\}, \quad (66)$$

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ОбСi}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ОбСi}_b(\text{Vj})\text{-ВКЦ})$  -го бездротового каналу зв'язку.

7) Мережа бездротового зв'язку  $\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЗКЦ}$  утворюється групою БПЛА

$$G^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЗКЦ}} = \left\{ G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЗКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЗКЦ}} \cdot \eta(G_{\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЗКЦ})}^{\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЗКЦ}}) \right\}, \quad (67)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(\text{ОбСj}_b(\text{Vj})\text{-ЗКЦ}) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ОбСi\_b(Vj)-ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $ОбСi\_b(Vj)-ЗКЦ$  :

$$G_{\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ} \\ L - БПЛА_{\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ} \end{array} \right\}, \quad (68)$$

де  $\varphi(\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ)) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(ОбСi\_b(Vj)-ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ОбСj\_b(Vj)-ЗКЦ}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(ОбСi\_b(Vj)-ЗКЦ)$  -го бездротового каналу зв'язку.

8) Мережа бездротового зв'язку  $ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК$  утворюється групою БПЛА

$$G^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК} = \left\{ \begin{array}{l} ПСРКj\_b(Vj) \cdot \eta(ПСРКj\_b(Vj)), \\ G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК}) \end{array} \right\}, \quad (69)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ПСРКi\_b(Vj)-ЦПК)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $ПСРКi\_b(Vj)-ЦПК$  :

$$G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК} \\ L - БПЛА_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК} \end{array} \right\}, \quad (70)$$

де  $\varphi(\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(ПСРКi\_b(Vj)-ЦПК)$ -го бездротового каналу зв'язку та бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(ПСРКj\_b(Vj))$  – кількість (ПСРКj\\_b(Vj)), які в режимі чергування забезпечують безперебійний радіаційний контроль;

$\eta(G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК})$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЦПК}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(ПСРКi\_b(Vj)-ЦПК)$ -го бездротового каналу зв'язку.

9) Мережа бездротового зв'язку ПСРКj\\_b(Vj)-ВКЦ утворюється групою БПЛА

$$G^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} ПСРКj\_b(Vj) \cdot \eta(ПСРКj\_b(Vj)), \\ G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ}) \end{array} \right\}, \quad (71)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ПСРКi\_b(Vj)-ВКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі ПСРКi\\_b(Vj)-ВКЦ :

$$G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} М - БПЛА_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ} \cdot \varphi(\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)), \\ Л - БПЛА_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ} \end{array} \right\}, \quad (72)$$

де  $\varphi(\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(ПСРКi\_b(Vj)-ВКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(ПСРКj\_b(Vj))$  – кількість (ПСРКj\\_b(Vj)), які в режимі чергування забезпечують безперебійний радіаційний контроль;

$\eta(G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ})$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ВКЦ}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(ПСРКi\_b(Vj)-ВКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку.

10) Мережа бездротового зв'язку ПСРКj\\_b(Vj)-ЗКЦ утворюється групою БПЛА

$$G^{ПСРКj\_b(Vj)-ЗКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} ПСРКj\_b(Vj) \cdot \eta(ПСРКj\_b(Vj)), \\ G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЗКЦ} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ПСРКj\_b(Vj)-ЗКЦ)}^{ПСРКj\_b(Vj)-ЗКЦ}) \end{array} \right\}, \quad (73)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})}^{\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ПСРК}i\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $\text{ПСРК}i\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}$ :

$$G_{\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})}^{\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}} = \left\{ \begin{array}{l} M - \text{БПЛА}_{\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})}^{\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}} \\ L - \text{БПЛА}_{\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})}^{\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}} \end{array} \right\}, \quad (74)$$

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ПСРК}i\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(\text{ПСРК}j\_b(Bj))$  – кількість ( $\text{ПСРК}j\_b(Bj)$ ), які в режимі чергування забезпечують безперебійний радіаційний контроль;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})}^{\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}})$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})}^{\text{ПСРК}j\_b(Bj) - \text{ЗКЦ}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ПСРК}i\_b(Bj) - \text{ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку.

11) Мережа бездротового зв'язку  $\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}$  утворюється групою БПЛА

$$G^{\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ПМС}j\_b(Bj) \cdot \eta(\text{ПМС}j\_b(Bj)), \\ G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}} \cdot \eta(G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}}) \end{array} \right\}, \quad (75)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ПМС}i\_b(Bj) - \text{ЦПК})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $\text{ПМС}i\_b(Bj) - \text{ЦПК}$ :

$$G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}} = \left\{ \begin{array}{l} M - \text{БПЛА}_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}} \\ L - \text{БПЛА}_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}} \end{array} \right\}, \quad (76)$$

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК})) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj) - \text{ЦПК}))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ЦПК}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ПМС}i\_b(Bj)\text{-ЦПК})$ -го бездротового каналу зв'язку та бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(\text{ПМС}j\_b(Bj))$  – кількість  $(\text{ПМС}j\_b(Bj))$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійний радіаційний контроль;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ЦПК}})$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ЦПК})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ЦПК}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ПМС}i\_b(Bj)\text{-ЦПК})$ -го бездротового каналу зв'язку.

12) Мережа бездротового зв'язку  $\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}$  утворюється групою БПЛА

$$G^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{ПМС}j\_b(Bj) \cdot \eta(\text{ПМС}j\_b(Bj)), \\ G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}} \cdot \eta(G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}}) \end{array} \right\}, \quad (77)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ПМС}i\_b(Bj)\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $\text{ПМС}i\_b(Bj)\text{-ВКЦ}$ :

$$G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{М - БПЛА}_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}} \cdot \varphi(\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})), \\ \text{Л - БПЛА}_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}} \end{array} \right\}, \quad (78)$$

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})) = 1, \gamma(\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}))$ ;

$\gamma(\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ПМС}i\_b(Bj)\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку та бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(\text{ПМС}j\_b(Bj))$  – кількість  $(\text{ПМС}j\_b(Bj))$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійний радіаційний контроль;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}})$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ})}^{\text{ПМС}j\_b(Bj)\text{-ВКЦ}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ПМС}i\_b(Bj)\text{-ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку.



13) Мережа бездротового зв'язку  $ПМСj\_b(Bj) - ЗКЦ$  утворюється групою БПЛА

$$G^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} ПМСj\_b(Bj) \cdot \eta(ПМСj\_b(Bj)), \\ G_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ}) \end{array} \right\}, \quad (79)$$

де  $j = \overline{1,3}$ ;  $b(B1) = \overline{1,4}$ ,  $b(B2) = \overline{1,3}$ ,  $b(B3) = \overline{1,12}$ ;

$\varepsilon(ПМСj\_b(Bj) - ЗКЦ) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ПМСi\_b(Bj) - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $ПМСi\_b(Bj) - ЗКЦ$ :

$$G_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ} \cdot \varphi(\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)), \\ Л - БПЛА_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ} \end{array} \right\}, \quad (80)$$

де  $\varphi(\varepsilon(ПМСj\_b(Bj) - ЗКЦ)) = \overline{1, \gamma(\varepsilon(ПМСj\_b(Bj) - ЗКЦ))}$ ;

$\gamma(\varepsilon(ПМСj\_b(Bj) - ЗКЦ))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(ПМСi\_b(Bj) - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку та бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(ПМСj\_b(Bj))$  – кількість  $(ПМСj\_b(Bj))$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійний радіаційний контроль;

$\eta(G_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ})$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ)}^{ПМСj\_b(Bj)-ЗКЦ}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(ПМСi\_b(Bj) - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку.

14) Мережа бездротового зв'язку  $ЦПК - ВКЦ$  утворюється групою БПЛА

$$G^{ЦПК-ВКЦ} = \left\{ G_{\varepsilon(ЦПК-ВКЦ)}^{ЦПК-ВКЦ} \cdot \eta(G_{\varepsilon(ЦПК-ВКЦ)}^{ЦПК-ВКЦ}) \right\}, \quad (81)$$

де  $\varepsilon(ЦПК - ВКЦ) = \overline{1,2}$ ;

$G_{\varepsilon(ЦПК-ВКЦ)}^{ЦПК-ВКЦ}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(ЦПК - ВКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку мережі  $ЦПК - ВКЦ$ :

$$G^{ЦПК-ВКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{\varepsilon(ЦПК-ВКЦ)}^{ЦПК-ВКЦ} \cdot \varphi(\varepsilon(ЦПК-ВКЦ)), \\ Л - БПЛА_{\varepsilon(ЦПК-ВКЦ)}^{ЦПК-ВКЦ} \end{array} \right\}, \quad (82)$$

---

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ВКЦ})) = 1, \gamma(\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ВКЦ}))$ ;

$\gamma(\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ВКЦ}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку й бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ВКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ВКЦ}}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ВКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ВКЦ}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ВКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку.

15) Мережа бездротового зв'язку *ЦПК - ЗКЦ* утворюється групою БПЛА

$$G^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}} = \left\{ G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}} \cdot \eta(G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}}) \right\}, \quad (83)$$

де  $\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}) = \overline{1, 2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі *ЦПК - ЗКЦ* :

$$G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}} = \left\{ \begin{array}{l} \text{М - БПЛА}_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}} \cdot \varphi(\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})), \\ \text{Л - БПЛА}_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}} \end{array} \right\}, \quad (84)$$

де  $\varphi(\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})) = 1, \gamma(\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}))$ ;

$\gamma(\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку та бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ}}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(\text{ЦПК} - \text{ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку.

16) Мережа бездротового зв'язку *ВКЦ - ЗКЦ* утворюється групою БПЛА

$$G^{\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ}} = \left\{ G_{\varepsilon(\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ}} \cdot \eta(G_{\varepsilon(\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ}}) \right\}, \quad (85)$$

де  $\varepsilon(\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ}) = \overline{1, 2}$ ;

$G_{\varepsilon(\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ})}^{\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ}}$  – підгрупа БПЛА, що забезпечує функціонування  $\varepsilon(\text{ВКЦ} - \text{ЗКЦ})$ -го бездротового каналу зв'язку мережі *ВКЦ - ЗКЦ* :

$$G^{BKЦ-ЗКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} M - БПЛА_{\varepsilon(BKЦ-ЗКЦ)}^{BKЦ-ЗКЦ} \\ L - БПЛА_{\varepsilon(BKЦ-ЗКЦ)}^{BKЦ-ЗКЦ} \end{array} \right\}, \quad (86)$$

де  $\varphi(\varepsilon(BKЦ - ЗКЦ)) = 1, \gamma(\varepsilon(BKЦ - ЗКЦ))$ ;

$\gamma(\varepsilon(BKЦ - ЗКЦ))$  – кількість М-БПЛА, що визначається в залежності від протяжності  $\varepsilon(BKЦ - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку та бездротових технологій, що застосовуються;

$\eta(G_{\varepsilon(BKЦ-ЗКЦ)}^{BKЦ-ЗКЦ}) = 2$  – кількість підгруп  $G_{\varepsilon(BKЦ-ЗКЦ)}^{BKЦ-ЗКЦ}$ , які в режимі чергування забезпечують безперебійну роботу  $\varepsilon(BKЦ - ЗКЦ)$ -го бездротового каналу зв'язку.

У разі необхідності (табл. 5) може бути розгорнута наступна група БПЛА для здійснення додаткових функцій – фото, відео та тепловізійного моніторингу:

$$G^{\Phi BT} = \{ M - БПЛА_1^{\Phi BT}, M - БПЛА_2^{\Phi BT}, \dots, M - БПЛА_o^{\Phi BT} \}. \quad (87)$$

Кількість  $M - БПЛА^{\Phi BT}$  залежить від кількості об'єктів (місць, маршрутів), що підлягають моніторингу.

Припустимо, що після аварії на ЗАЕС її СМ характеризується наступною множиною непрацездатних елементів:

$$\overline{E} = \left\{ \begin{array}{l} \overline{W_{Обсз\_8-ЦПК}}, \overline{W_{Обсз\_9-ЦПК}}, \overline{W_{ПЗОГ2\_1-ЗКЦ}}, \\ \overline{d2\_1\_1}, \overline{d2\_1\_2}, \overline{d2\_1\_3} \end{array} \right\}. \quad (88)$$

Крім того, сценарій розвитку аварії обумовлює необхідність здійснення фото, відео та тепловізійного моніторингу у 30-ти кілометровій зоні ЗАЕС на п'яти маршрутах з призначенням на кожний маршрут по одному М-БПЛА.

Враховуючи можливості БЦФ, представлені в табл. [3] - [5], протяжність бездротових каналів та бездротові технології, що застосовуються, було розгорнуто БЦФ БПЛА у складі:

1) ПСРК2\_1 для реалізації функцій засобів вимірювання  $\overline{d2\_1\_1}$ ,  $\overline{d2\_1\_2}$ ,  $\overline{d2\_1\_3}$ ;

2) групи БПЛА  $G^{ПСРК2\_1-ЦПК}$  для організації бездротової мережі  $ПСРК2\_1-ЦПК$  з метою передачі даних радіаційного контролю після відмови  $\overline{d2\_1\_1}, \overline{d2\_1\_2}, \overline{d2\_1\_3}$ :

$$G^{ПСРК2\_1-ЦПК} = \left\{ \begin{array}{l} 2М - БПЛА_{1\_1}^{ПСРК2\_1-ЦПК}, \\ 2М - БПЛА_{1\_2}^{ПСРК2\_1-ЦПК}, \dots, 2М - БПЛА_{1\_5}^{ПСРК2\_1-ЦПК}, \\ 2М - БПЛА_{2\_1}^{ПСРК2\_1-ЦПК}, 2М - БПЛА_{2\_2}^{ПСРК2\_1-ЦПК}, \dots, \\ 2М - БПЛА_{2\_3}^{ПСРК2\_1-ЦПК}, Л - БПЛА^{ПСРК2\_1-ЦПК} \end{array} \right\};$$

3) групи БПЛА  $G^{Обс3\_8-ЦПК}$  для організації бездротової мережі  $Обс3\_8-ЦПК$  замість  $w_{Обс3\_8-ЦПК}$ :

$$G^{Обс3\_8-ЦПК} = \left\{ \begin{array}{l} 2М - БПЛА_{1\_1}^{Обс3\_8-ЦПК}, 2М - БПЛА_{1\_2}^{Обс3\_8-ЦПК}, \dots, \\ 2М - БПЛА_{1\_6}^{Обс3\_8-ЦПК}, 2М - БПЛА_{2\_1}^{Обс3\_8-ЦПК}, \\ 2М - БПЛА_{2\_2}^{Обс3\_8-ЦПК}, \dots, 2М - БПЛА_{2\_6}^{Обс3\_8-ЦПК}, \\ Л - БПЛА^{Обс3\_8-ЦПК} \end{array} \right\};$$

4) групи БПЛА  $G^{Обс3\_9-ЦПК}$  для організації бездротової мережі  $Обс3\_9-ЦПК$  замість  $w_{Обс3\_9-ЦПК}$ :

$$G^{Обс3\_9-ЦПК} = \left\{ \begin{array}{l} 2М - БПЛА_{1\_1}^{Обс3\_9-ЦПК}, 2М - БПЛА_{1\_2}^{Обс3\_9-ЦПК}, \dots, \\ 2М - БПЛА_{1\_9}^{Обс3\_9-ЦПК}, 2М - БПЛА_{2\_1}^{Обс3\_9-ЦПК}, \\ 2М - БПЛА_{2\_2}^{Обс3\_8-ЦПК}, \dots, 2М - БПЛА_{2\_9}^{Обс3\_8-ЦПК}, \\ Л - БПЛА^{Обс3\_8-ЦПК} \end{array} \right\};$$

5) групи  $ПЗОІ2\_1-ЗКЦ$  для організації бездротової мережі замість  $w_{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}$ :

$$G^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ} = \left\{ \begin{array}{l} 2М - БПЛА_{1\_1}^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}, 2М - БПЛА_{1\_2}^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}, \\ 2М - БПЛА_{1\_3}^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}, 2М - БПЛА_{2\_1}^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}, \\ 2М - БПЛА_{2\_2}^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}, 2М - БПЛА_{2\_3}^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}, \\ Л - БПЛА^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ} \end{array} \right\};$$

б) групи БПЛА  $G^{ФВТ}$  для виконання завдань фото, відео та тепловізійного моніторингу ЗАЕС на п'яти маршрутах патрулювання:

$$G^{ФВТ} = \{M - БПЛА_1^{ФВТ}, M - БПЛА_2^{ФВТ}, \dots, M - БПЛА_5^{ФВТ}\}.$$

Відзначимо, що роль  $L - БПЛА^{Обс3\_8-ЦПК}$  та  $L - БПЛА^{Обс3\_9-ЦПК}$  виконує один і той же Л-БПЛА. Отже маємо:

$$G^{Обс3\_8-ЦПК} \cap G^{Обс3\_9-ЦПК}.$$

Таким чином, скорегована теоретико-множинна модель СМ ЗАЕС після розгортання вказаного флоту набуде наступного вигляду:

$$СМ ЗАЕС = \left\langle \begin{array}{l} ПСМ А(ПАМС), ПСМ В(АСКРО), ВКЦ, ЗКЦ, \\ ЦПК, ЗМ А, ЗМ В, ТЗКР, ТЗТК, ТЗРК, С, \\ ПЗОІ, W_{С-ПЗОІ}, W_{ПЗОІ-КЦ}^{кор}, ПК, D^{кор}, ОбС, W_{D-ОбС}, \\ W_{ОбС-ЦПК}^{кор}, W_{ЦПК-ВКЦ}, W_{ЦПК-ЗКЦ}, W_{ЗКЦ-ВКЦ}, БЦФ^{роз} \end{array} \right\rangle.$$

Як ми можемо бачити модель тепер містить:

– скореговані множини:

$$W_{ПЗОІ-КЦ}^{кор} \ni \overline{W_{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}};$$

$$W_{ОбС-ЦПК}^{кор} \ni \left[ \overline{W_{ОбС3\_8-ЦПК}, W_{ОбС3\_9-ЦПК}} \right];$$

$$D^{кор} \ni \left\{ \overline{d2\_1\_1}, \overline{d2\_1\_2}, \overline{d2\_1\_3} \right\};$$

– розгорнутий БЦФ БПЛА:

$$БЦФ^{роз} = \left\{ ПСРК2\_1, G^{ПСРК2\_1-ЦПК}, G^{Обс3\_8-ЦПК}, \right. \\ \left. G^{Обс3\_9-ЦПК}, G^{ПЗОІ2\_1-ЗКЦ}, G^{ФВТ} \right\}.$$

**Висновки та перспективи подальших досліджень у даному напрямі.** Побудована загальна структурна схема системи моніторингу ПНО та розроблена теоретико-множинна модель на її основі. Сформульовані рекомендації щодо корегування моделі у разі розгортання багатоцільового флоту БПЛА. Показано процес розробки теоретико-множинної моделі та здійснення її корегування після розгортання багатоцільового флоту БПЛА на прикладі системи моніторингу Запорізької АЕС. Визначені можливості багатоцільового флоту та показано варіант його розгортання у складі п'яти груп БПЛА і однієї повітряної станції радіаційного контролю для виконання функцій засобів вимірювання та каналів зв'язку, що відмовили внаслідок аварії на

---

АЕС. Подальшого дослідження потребують різні варіанти розгортання багатопроцесного флоту в умовах великої кількості відмов елементів системи моніторингу ПНО.

Результати досліджень отримані в рамках науково-дослідних робіт «Методологічні засади та технології оцінювання та забезпечення безпеки (захисту) критичних інформаційних інфраструктур» (державний реєстраційний номер: 0119U100979) та «Методологія сталого розвитку та інформаційні технології зеленого комп'ютерингу та комунікацій» (державний реєстраційний номер: 0118U003822), які виконуються Національним аерокосмічним університетом ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

#### **Список використаних джерел:**

1. Babak, S.: Radiation monitoring of environment using unmanned aerial complex. *The Advanced Science Journal* 12, 41-44 (2014).

2. Connor, D. T., Martin, P. G., Scott, T. B.: Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems. *International Journal of Remote Sensing* 37, 5953-5987 (2016). doi: 10.1080/01431161.2016.12524.

3. Жукаускас С. В. Системы мобильного экологического мониторинга обращения с опасными отходами с использованием беспилотных летательных аппаратов / С. В. Жукаускас, К. В. Сметанін // *Аерокосмічні технології*. – 2017. – № 2 (2). – С. 66-76.

4. Забулонов Ю. Л. Система для оперативного дистанційного контролю та спостереження за радіаційною обстановкою / Ю. Л. Забулонов, В. М. Буртняк, Л. А. Одукалець // *Наука та інновації*. – 2017. – № 4(13). – С. 46-53. doi:10.15407/scin13.03.046.

5. Арутюнян Р. В. Перспективы развития автоматизированных систем контроля радиационной обстановки в мурманской и архангельской областях за счет комплексного применения мобильных средств / Р. В. Арутюнян, Е. В. Попов, С. Л. Гаврилов // *Арктика : экология и экономика*. – 2017. – № 3(27). – С. 39–48. doi: 10.25283/2223-4594-2017-3-39-48.

6. Система для автономного мониторинга радиационной обстановки вокруг атомной электростанции / [А. Н. Власенко, А. Ю. Ивашева, О. Е. Лапин и др.] // *Экстремальная робототехника*. – 2018. – Том 1. – № 1(1). – С. 139-147.

7. Формування динамічної моделі оперативного моніторингу рівня забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики /

---

[В. В. Тютюник, О. М. Соболев, В. Д. Калугін, Ю. В. Захарченко] // Екологічна безпека та природокористування. – 2020. – № 1(33). – 95-114.

8. Fesenko, H., Kharchenko, V., Sachenko, A., Hiromoto, R., Kochan, V.: An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability. In Kharchenko, V., Kor, A., Rucinski, A. (eds.) Dependable IoT for Human and Industry: Modeling, Architecting, Implementation, pp. 197-217. River Publishers, Denmark, The Netherlands (2018).

9. Фесенко Г. В. Моделі надійності угруповань флотів БПЛА з ковзним резервуванням для моніторингу потенційно небезпечних об'єктів / Г. В. Фесенко, В. С. Харченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019. – № 2(90). – С. 147-156. doi: 10.32620/reks.2019.2.14.

10. Фесенко Г. В. Мінімізація часу початку виконання флотом безпілотних літальних апаратів завдання з радіаційного моніторингу у новій зоні відповідальності / Г. В. Фесенко // Системи та технології. – 2019. – № 1(57). – С. 5-20. doi:10.32836/2521-6643-2019-1-57-1.

11. Про затвердження Вимог до внутрішнього та зовнішнього кризових центрів АЕС [Електронний ресурс] : Наказ Державного комітету ядерного регулювання України від 16.01.2004 № 2. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0136-04#Text>. – Назва з екрана.

12. Kliushnikov I. M. Scheduling UAV fleets for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP monitoring / I. M. Kliushnikov, H. V. Fesenko, V. S. Kharchenko // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2020. – № 1(93). – С. 29-36. doi: 10.32620/reks.2020.1.03.

#### References:

1. Babak, S.: Radiation monitoring of environment using unmanned aerial complex. The Advanced Science Journal 12, 41-44 (2014).

2. Connor, D. T., Martin, P. G., Scott, T. B.: Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems. International Journal of Remote Sensing 37, 5953-5987 (2016). doi: 10.1080/01431161.2016.12524.

3. Zhukauskas S. V., Smetanin K. V.: Systems of mobile environmental monitoring of handling with dangerous waste with the use of unmanned aerial vehicles. Aerospace Technologies 2(2), 66-76 (2017).

4. Zabulonov, Y. L., Burtnyak, V. M., Odukalets, L. A.: System for effective remote control and monitoring of radiation situation based on unmanned aerial vehicle. Science and Innovation 4(13), 46-53 (2017). doi:10.15407/scin13.03.046.

5. Arutyunyan, R. V., Popov, E. V., Gavrilov, S. L.: Prospects for the development of automated radiation monitoring systems in the Murmansk and Ar-

---

khangelsk regions through the integrated use of mobile radiation monitoring devices. *The Arctic: ecology and economy* 3(27), 39-48 (2017). doi: 10.25283/2223-4594-2017-3-39-48.

6. Vlasenko, A. N., Ivasheva, A. Y., Lapin, O. E., Mikutsky, V. G., Semenikhin, P. V.: System for autonomous radiation monitoring around nuclear power plant. *Extreme robotics* 1(1), 139-147 (2018).

7. Tiutiunyk, V., Sobol, O., Kalugin, V., Zakharchenko, J.: Formation of the dynamic model for operative monitoring of the ecosystem's pollution level through emergencies at nuclear power plants. *Ecological Safety and Nature Management* 1(33), 95-114 (2020).

8. Fesenko, H., Kharchenko, V., Sachenko, A., Hiromoto, R., Kochan, V.: An Internet of Drone-based multi-version post-severe accident monitoring system: structures and reliability. In Kharchenko, V., Kor, A., Rucinski, A. (eds.) *Dependable IoT for Human and Industry: Modeling, Architecting, Implementation*, pp. 197-217. River Publishers, Denmark, The Netherlands (2018).

9. Fesenko, H. V., Kharchenko, V. S.: Reliability models of UAV fleet groups with k-out-of-n redundancy for monitoring of potentially dangerous objects. *Radioelectronic and Computer Systems* 2(90), 147-156 (2019). doi: 10.32620/reks.2019.2.14.

10. Fesenko, H. V.: Minimization of the waiting time to start performing a radiation monitoring mission via a fleet of unmanned aerial vehicles in the new zone of responsibility. *Systems and Technologies* 1(57), 5-20 (2019). doi:10.32836/2521-6643-2019-1-57-1.

11. About approval of Requirements to the internal and external crisis centers of the NPP: the Order from the State committee of nuclear regulation of Ukraine No 2 from 01/16/2004, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0136-04#Text>, last accessed: 2020/08/03.

12. Kliushnikov, I. M., Fesenko, H. V.: Scheduling UAV fleets for the persistent operation of UAV-enabled wireless networks during NPP monitoring. *Radioelectronic and Computer Systems* 1(93), 29-36 (2020). doi: 10.32620/reks.2020.1.03.