

**ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ АЛГОРИТМУ ЦИКЛУ
МІЖЕТАПНОГО СИТУАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ КОНФЛІКТНОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ
НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСУ РЕП З МАЛИМИ (ЛЕГКИМИ) БЕЗПІЛОТНИКАМИ**

Вступ

Існують значні труднощі радіоелектронної протидії на тактичному рівні загрозам розвідувально-ударних малих (легких) БПЛА типу Суперкам або Ланцет [1 – 9] при їх проникненні до важливих об'єктів інфраструктури. Це викликає необхідність підвищення результативності наземних комплексів РЕП, зокрема за рахунок вдосконалення алгоритму циклу міжетапного ситуаційного управління [10]. Головна мета такого управління – нейтралізація загроз різних типів малих (легких) БПЛА літакового виду тактичного рівня важливого об'єкту захисту в різних сценаріях конфлікту з урахуванням специфіки типів і тактик застосування БПЛА, комплексування засобів розвідки і постановки комбінацій різних видів активних завад та їх взаємодії для сигнального і прихованого інформаційного придушення БПЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В статтях [1, 6 – 10, 14] аналізуються різні способи та засоби протидії безпілотникам, що пов'язані з необхідністю побудови спеціалізованого наземного комплексу РЕП безпілотників на тактичному рівні. При цьому враховуються: небезпека створюваних ними загроз для об'єктів інфраструктури; їх малопомітність; низькі висоти та швидкість польоту; маневреність; віддаленість від наземного пункту управління (НПУ) та малий час, відведений на надання радіоелектронної протидії на етапах розвідки БПЛА та придушення його радіоліній.

Протидія БПЛА потребує упорядкування керуючих процесів, що полягає:

- в розподілі їх за етапами розвідки та придушення при функціонуванні комплексу РЕП (види внутрішньо етапного ситуаційного управління, що розглянуті в [10, 14], з визначенням мети кожного етапу, алгоритмів його контурів керування з вибором виконавчих засобів згідно з рівнем невизначеності інформаційного опису динамічного стану конфліктної ситуації, оптимізацією режимів та комплексного їх застосування);

- координації послідовності етапів функціонування наземного комплексу РЕП (міжетапне ситуаційне управління) для: забезпечення цілісності та безперервності (динамізму) управління процесами протидії БПЛА на інтервалі робочого часу комплексу; досягнення узгодженості етапів управління комплексом шляхом встановлення раціональних зв'язків та обміну інформацією між ними для приведення їх у відповідність із Головною метою управління; інтеграції засобів розвідки та придушення всередині етапів та між ними.

В статті [11] з посиланнями на ряд інших робіт розглядається підхід до постановки задачі координації в технологічних комплексах безперервного типу (ТК), до яких відноситься наземний комплекс РЕП. Такі комплекси відрізняються з точки зору задач управління багатомірністю, наявністю окремих етапів функціонування, ієрархією етапів та складними зв'язками між етапами. Їх тактико-технічні характеристики (ТТХ) в цілому залежать від ТТХ окремих етапів та від взаємних зв'язків між етапами. Це приводить до необхідності розробки задачі координації роботи на керованих етапах функціонування комплексу. Розв'язанням задачі координації є визначення взаємодії етапів, при яких управління, оптимальне за критеріями ефективності кожного з етапів, є також оптимальним за загальним критерієм для ТК в цілому. Для постановки та вирішення задачі координації необхідно ТК, що досліджується, представити у вигляді пов'язаних між собою окремих етапів його функціонування. Для розв'язання задачі координації складних ТК виникає задача оцінки їх стану, що викликано

неперервною зміною як зовнішнього середовища, так і параметрів об'єкта управління – ТК. Таким чином, об'єкти керування є динамічними, для опису їх стану використовуються динамічні моделі. Методи аналізу динаміки складних динамічних об'єктів включають: детерміновані, статистичні, ймовірнісні, логічні, нечіткі та нейромережеві моделі. Для розпізнавання станів складного динамічного об'єкта керування в умовах неповноти інформації, її невизначеності, нечіткості потрібне отримання та обробка зовнішніх знань з використанням комбінованих методів їх отримання від експертів, з проблемно-орієнтованих текстів природною мовою та баз даних. Основні принципи координації – це взаємозв'язок, ієрархічна підпорядкованість, узгодження, єдність команд і дій, загальна ціль.

Як було згадано вище, вирішення завдань координації часто пов'язано з неможливістю передбачення перешкод, з ризиком, невизначеністю і неточністю інформації. Відомо, що у цьому випадку для пошуку рішення доцільно використовувати нечіткі методи аналізу, які слід адаптувати до системи управління з неповною інформацією та високою складністю у вигляді побудови сучасної технології управління із застосуванням інтегрованих нечітких штучних нейронних мереж [12]. Тобто, використання систем з нечіткою логікою поряд з класичними логіко-оптимальними методами керування, що досить ефективно працюють при повністю детермінованому об'єкті управління і середовищі, потребує використання нечітких змінних.

Виділені частини вирішення загальної проблеми щодо ТК треба адаптувати до наземного комплексу РЕП з метою підвищення його результативності протидії малій безпілотній авіаційній системі (БАС) при захисті важливого інфраструктурного об'єкта.

Для побудови методики оцінки результативності такого комплексу слід враховувати [13]:

- відсутність на теперішній час визначених критеріїв для оцінки завадозахищеності ліній радіозв'язку різних типів;
- відсутність у лініях зв'язку ефективних засобів захисту від ретрансляційних завад;
- обмеження комплексу РЕП частотним ресурсом та діапазонами частот РЕП, які енергетично доступні для його сучасних засобів радіотехнічної (РТР), радіоелектронної (РЕР) розвідки та РЕП;
- відсутність у складі комплексу РЕП ефективних технічних та програмно-апаратних засобів, які вирішували б завдання своєчасного та достовірного виявлення ліній зв'язку, які подавлені завадами з визначенням їх характеру впливу та вразливості.

Аналіз відомих публікацій показав відсутність публікацій, присвячених циклу міжетапного ситуаційного управління процесами радіоелектронної протидії різним типам БПЛА тактичного рівня при зміні етапів функціонування наземного комплексу РЕП.

Мета статті: обґрунтувати і виділити особливості побудови структури алгоритму циклу міжетапного ситуаційного управління наземним комплексом РЕП при сигнальному або прихованому інформаційному придушенні структурних елементів БПЛА літакового типу тактичного рівня з маскуючим і імітуючим ефектами впливу для сценаріїв керованого або автономного польотів БПЛА в умовах дефіциту часу протидії.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до обстановки, що змінюється, розглядається спрощена двостороння динамічна модель конфліктної взаємодії складових частин багатфункціональних структур малого БПЛА та одноцільового наземного комплексу РЕП при захисті важливого інфраструктурного об'єкта. Він базується на визначенні об'єкта управління – динамічного стану КС, заздалегідь цілеспрямованих у напрямку Головної мети управління етапів функціонування комплексу РЕП згідно зі сценаріями протидії та алгоритмом міжетапного ситуаційного управління. Опис узгоджено до уразливості БПЛА, що аналізується на інтервалі робочого часу комплексу РЕП для сценаріїв керованого або автономного польотів БПЛА в умовах дефіциту часу протидії БПЛА.

Побудова алгоритму міжетапного ситуаційного управління реалізує *принципи прогнозування взаємодій у вигляді попередньо заданих етапів, узгодження взаємодій цих етапів та оцінки їх взаємодій*, а також *інтелектуалізації* процесів аналізу стану КС та прийняття

рішень за рахунок залучення штучних інтелектуальних ресурсів. Алгоритм повинен відповідати вимогам керованості, результативності, безперервності керування та мінімізації витрат ресурсів комплексу.

Склад многофункціональної структури сучасного одноцільового наземного комплексу РЕП

Склад наземного комплексу РЕП використовує інтегровані методи і засоби виявлення та нейтралізації загроз малих безпілотників, що мають підвищені ТТХ на відповідних етапах функціонування комплексу РЕП [10]. Він включає такі системи:

- засобів розвідки, що складаються з об'єднання маловисотного широкосмугового (ШС) оглядового радіолокатора з пасивними радіочастотними розвідувальними засобами для більш достовірного виявлення малого БПЛА та точного визначення його частотно-структурних сигнатур для його фізичного сигнального або прихованого інформаційного придушення, а також контролю результату придушення;
- засобів спрямованого радіоелектронного сигнального та прихованого інформаційного придушення радіоліній зв'язку з сигналами управління БПЛА і його супутникової навігації;
- автоматизованого управління протидією БПЛА на етапах його функціонування, де приймається велика кількість різноманітних рішень стосовно видів внутрішньо- та міжетапного ситуаційного управління. Вони різняться за змістом, термінами дії та розробленням, спрямованістю впливу, інформаційною забезпеченістю, використанням ресурсів, рівнем прийняття рішень, тощо. У зв'язку з цим виникає необхідність в упорядкуванні рішень міжетапного ситуаційного управління для підвищення керованості та результативності наземного комплексу РЕП при захисті важливого інфраструктурного об'єкту.

Вхідні та вихідні складові інформаційного опису динамічного стану конфліктної ситуації на етапах функціонування наземного комплексу РЕП

Динаміка конфлікту характеризується інформаційним описом змін станів конфліктної ситуації (КС) під зовнішнім впливом та ситуаційного управління на основних етапах функціонування наземного комплексу РЕП. Описи динамічного стану КС, що є узагальненим об'єктом управління в динаміці конфлікту, містять за потреби його етапів вхідні і вихідні складові КС у різні моменти часу на інтервалі робочого часу комплексу. Вони подаються як протистояння критично важливого переліку показників узагальнених ТТХ БПЛА та комплексу з урахуванням особливостей їх побудови та тактик застосування [10]. Цей перелік на окремих етапах функціонування комплексу складається з співвідношення розвідувальної захищеності сигналів радіоліній зв'язку командної радіолінії управління (КРУ) та радіоліній супутникової навігації БПЛА, їх завадо- та імітозахищеності, з одного боку, та показників результативності взаємного застосування наборів засобів розвідки та сигнального і/або прихованого інформаційного придушення, – з іншого боку. До вхідних складових опису стану КС, як інформаційних еквівалентів вразливостей та узагальнених ТТХ БПЛА, належать сигнатури малих БПЛА як об'єктів спостереження засобами РЛР, РТР та РЕР. Це – локаційна сигнатура (ЛОК) з даними його просторово-часового знаходження в зоні відповідальності комплексу РЕП та траєкторних ознак розпізнавання його типу, структурно-частотний портрет загальної електромагнітної обстановки (ЕМО) та структурно-інформаційний портрет сукупності інформаційних повідомлень та протоколів інформаційного обміну (СППІО) різного ступеня невідзначеності, створених сукупністю його ліній радіозв'язку та супутникової радіонавігації. Вихідні складові опису стану КС представлені ймовірностями успішного вирішення завдань етапів функціонування комплексу, наприклад для сценарію керованого польоту БПЛА, у вигляді P_1, P_2, P_3, P_4 та ймовірності досягнення Головної мети управління – P .

Оскільки з часом уточнюється знання про загрозу БПЛА та результати радіоелектронної протидії, змінюється склад і зміст стану КС в обмеженнях двосторонньої моделі динамічного конфлікту, що розглядається, то це робить необхідним синтезувати і коригувати закони циклів управління процесами вирішення функціональних завдань на етапах функціонування

комплексу РЕП та координації його дій при зміні етапів. Їх метою є адаптація контурів управління до поточної загрози БПЛА та забезпечення найкращих можливостей її нейтралізації, в тому числі нав'язування БПЛА хибних режимів польоту за допомогою імітаційних завад з вбудованими інформаційно-технологічними впливами (ІТВ).

Етапи функціонування наземного комплексу РЕП

Розглянута спрощена двостороння динамічна модель конфлікту характеризується на інтервалі робочого часу комплексу, починаючи з моменту виявлення БПЛА, застосуванням послідовності заздалегідь цілеспрямованих етапів спільного функціонування засобів розвідки та придушення певних елементів структури БПЛА, що об'єднані Головною метою управління. Виконання вибору локально-оптимальної мети управління та умов узгодження при зміні етапів у відповідності до постановки та пошуку рішення задачі координації, що формалізує процеси міжетапного ситуаційного управління. Виконання цих дій зводиться до розподілу наявних ресурсів комплексу РЕП при мінімізації їх витрат в умовах обмеження тривалості робочого часу, невизначеності та неповноти інформації, необхідної для управління.

Системно-процесний підхід до міжетапного ситуаційного управління дозволяє уявити взаємодію етапів для сценаріїв керованого з НПУ та автономного польотів малого БПЛА.

Для цих сценаріїв нижче наведено перелік можливих етапів паралельно-послідовного функціонування комплексу РЕП та їх приватні мети протидії тактичним БПЛА, що заздалегідь орієнтовані на оперативне та скоординоване досягнення Головної мети управління – нейтралізації їх загроз об'єкту захисту. У ймовірностях успішного вирішення завдань етапів та координації їх змін, що приводяться, відображено спрямованість етапів, цілі і зміст завдань координації, характер взаємозв'язків об'єктів придушення в структурі БПЛА, склад засобів їх розвідки і спрямованого за напрямком придушення комбінаціями різних видів точкових завад з наростаючими маскуючим або/та імітуючим ефектами впливу. Впливи узгоджено з вразливістю лінії зв'язку з командами управління БПЛА і його супутникової радіонавігації.

Послідовність з чотирьох основних етапів функціонування наземного комплексу РЕП включає:

етап 1 – пошук, виявлення та визначення параметрів відбитих і випромінюваних БПЛА сигналів, ситуаційного управління засобами розвідки для формування інформаційного опису ситуаційної обізнаності в зоні спостереження через інформаційний опис вхідних і вихідних складових динамічного стану КС з відображенням сукупних вразливостей окремих ліній радіозв'язку та навігації, а також формування даних, необхідних для управління засобами розвідки та придушення на етапах;

етапи ситуаційного управління фізичним сигнальним (2, 3) та прихованим інформаційним (4) видами придушення БПЛА приймачів радіоліній зв'язку управління БПЛА та його супутникової навігації. Види придушення реалізуються, відповідно, шляхом задіяння різних типів засобів розвідки для уточнення даних управління, генерації та постановки комбінацій різних видів загороджувальних за частотою і часом активних завад, імітаційних видів завад або сигналоподібних завад з вбудованими в них інформаційно-технологічними впливами (ІТВ).

Етап 1 пошуку, виявлення та визначення сигнатур малого БПЛА, формування даних, необхідних для ситуаційної обізнаності та управління засобами різних видів розвідки та придушення

Пошук та виявлення випромінювань ліній зв'язку КРУ, радіоліній супутникової навігації БПЛА та розвідка їх частотних та структурних параметрів здійснюються протягом усього інтервалу робочого часу комплексу РЕП після пошуку та виявлення БПЛА. Їх результативність визначається малопомітністю БПЛА на фоні відбитків від підстилаючої поверхні для оглядової ШС РЛС, розвідувальною захищеністю радіоліній від засобів РТР і РЕР. Аналіз цих обставин та можливостей засобів радіоелектронного придушення комплексу РЕП дозволяють зробити висновок, що ймовірність розвідки радіоліній по робочому діапазону, потужності

випромінювання та роду зв'язку буде різною - може бути отримана у різні моменти часу, на різних ступенях їх невизначеності та при різних значеннях рубіжів їх розвідки $R_{розв}$. Це призводить до побудови певної стратегії застосування розвідувальних засобів для уточнення даних розвідки та наповнення сигнатур, що використовуються для виявлення радіоліній БПЛА [10]. Крім того, мають місце вимоги до повноти, достовірності, точності і ступеня невизначеності (розкрита, частково розкрита та розкрита-відкрита – $q = 1, 2, 3$), щоб обґрунтувати вибір для застосування того чи іншого виду сигнального чи прихованого інформаційного придушення цих радіоліній.

Виходячи з того, що ймовірність P_1 успішного застосування засобів оглядової ШС РЛС, РТР та РЕР на етапі 1 є величиною зворотної ефективності застосовуваних методів забезпечення розвідувальної захищеності радіоліній у структурі БПЛА, вона визначається за формулою

$$P_1(t) = [P(t_1)_{ШС\ РЛС-ЛОК, q=3} + P(t_2)_{РТР-ЕМО-пеленг, q=1,2} + P_{РТР-ЕМО, q=2} P(t_3)_{РЕР-СПППО-РЛ, q=3}] (1 - \text{ПР}_{\text{пом навед засобів розвід}}) > [1 - (R_{\text{розвід захищ від ШС РЛС}} R_{\text{розвід захищ від РТР}} R_{\text{розвід захищ від РЕР}})], \quad (1)$$

де для розвідки сигнатур ЕМО, СПППО БПЛА використовуються, відповідно: $R_{ШС\ РЛС-ЛОК, q=3}$, $R_{РТР-ЕМО, q=2}$, $R_{РЕР-СПППО-РЛ, q=3}$ – ймовірності формування вхідних складових інформаційного опису КС, $n = 7$ – кількість радіоліній, $q = 1, 2, 3$ – ступені невизначеності умов спостереження. Розвідувальна інформація з часом накопичується, уточнюється та передається на поточний етап придушення.

При цьому з деталізацією функціональних завдань засобів розвідки:

$$P_{ШС\ РЛС-ЛОК, q=3} = [P_{\text{виявл}} P_{\text{розпізн}} (1 - P_{\text{пом супр}}) (1 - P_{\text{скр}}) (1 - P_a P_f P_t P_{\text{корр}})] \quad (2)$$

де ймовірності: $P_{\text{виявл}}$ – виявлення БПЛА; $P_{\text{розпізн}}$ – розпізнавання класу/типу БПЛА; $P_{\text{пом супр}}$ – помилки супроводу ШС РЛС, $P_{\text{скр}}$ – добуток ймовірностей енергетичної та структурної скритності зондуючого сигналу ШС РЛС; P_a – селекції за напрямом та поляризації, яка проводиться в антенно-фідерному пристрої (АФП) та системі управління ДНА; P_f – частотної селекції у частотно-виборчих засобах приймача; P_t – часової селекції (що забезпечує виділення сприятливих ділянок часу для прийому корисного сигналу, наприклад при супроводі цілі); $P_{\text{корр}}$ – статистичної селекції у кореляційному приймачі.

$P_{РТР-ЕМО-пеленг, q=2}$ – ймовірність визначення пеленгу джерела випромінювання засобами РТР:

$$P_{РТР-ЕМО-пеленг, q=2} = P_{\text{чх}} P_{\text{структура сигн}} (1 - P_{\text{скр від РТР}}) (1 - P_a P_f P_t), \quad (3)$$

де ймовірності: $P_{\text{чх}}$ – виявлення та вимірювання частотних параметрів випромінювання радіолінії; $P_{\text{структура сигн}}$ – розтину структури сигналу радіолінії; $P_{\text{скр від РТР}}$ – скритності від засобів РТР; $(1 - P_a, P_f, P_t)$ – помилок наведення засобів РТР на джерело випромінювання.

$P_{РЕР-СПППО-РЛ, q=3}$ – ймовірність визначення засобами РЕР даних радіолінії для її інформаційного придушення:

$$P_{РЕР-СПППО-РЛ, q=3} = P_{\text{виявл ІП}} P_{\text{шифр ІП}} P_{\text{ППО}} P_{\text{шрозвізн РЛ}}, \quad (4)$$

де ймовірності: $P_{\text{виявл ІП}}$ – виявлення шифрованого сигналу радіолінії з інформаційним повідомленням (ІП); $P_{\text{шифр ІП}}$ – розкриття структури інформаційних повідомлень (ІП); $P_{\text{ППО}}$ – розкриття структури протоколу інформаційного обміну (ППО); $P_{\text{шрозвізн РЛ}}$ – розпізнавання належності виявленої радіолінії.

Порядок взаємодії етапу 1 із етапами придушення елементів структури БПЛА залежить від таких факторів впливу, як:

- пріоритетність розвідки тієї чи іншої радіолінії з урахуванням розміщення її приймальних та обробних пристроїв у структурі безпілотної авіаційної системи (БАС);
- можливості структури наземного комплексу РЕП для максимально комплексного застосування засобів розвідки та придушення як роздільно, так і сумісно, починаючи з радіогоризонту у міру надходження та накопичення розвідувальної інформації;

- потреби виконання завдань координації у вертикальних послідовностях етапів того або іншого об'єкта придушення та горизонтальної координації етапів придушення для різних об'єктів придушення у структурі БПЛА;

- отримання розвідданих щодо початку (їх рубіжів розвідки) і закінчення етапів придушення цих об'єктів у складі БПЛА (їх рубежів придушення) здійснюється у різні моменти часу. Це призводить до:

- динамічних умов спостереження та придушення радіоліній зв'язку КРУ з сигналом управління та супутникової навігації БПЛА, що ускладнює вирішення завдань синхронізації та горизонтальної координації процесів придушення та їх проміжних результатів на етапах. Виникає потреба оцінки рубіжів початку і закінченні етапів придушення цих об'єктів у складі БПЛА на інтервалі робочого часу комплексу, а також в використанні оглядової ШС РЛС для фіксації цих моментів часу, а не тільки для контролю змін траєкторії польоту БПЛА у разі його придушення. Це зумовлено відмінностями кожної радіолінії у властивостях розвідувальної захищеності їх параметрів сигналів та/інформаційних повідомлень, що передаються, а також їх завадо та імітозахищеностей;

- урахування специфіки побудови, ТТХ типу малого (легкого) БПЛА і тактики його застосування, геометрії конфліктної взаємодії складових частин БПЛА та комплексу РЕП, співвідношень просторових та поляризаційних характеристик ДН антен, що застосовуються, енергетичних, частотних, часових, параметрів структурно-сигнальних форм корисних сигналів ліній зв'язку КРУ, радіоліній супутникової навігації БПЛА та засобів РТР, РЕР або засобів постановки різних видів навмисних завад, що застосовуються.

Перелік формування наступних етапів придушення структурних елементів БПЛА для сценарія керованого польоту БПЛА та приклади даних для формалізації цілей їх протидії

До них відносяться етапи сигнального (2, 3) та прихованого інформаційного пригнічення (4) на рубіжах R (керований політ, лінії зв'язку КРУ та радіонавігації у складі БПЛА, завади з маскуючим та імітуючим ефектами впливу), на підставі результатів розвідки оглядової ШС РЛС, засобів РТР і РЕР – інформаційних даних про сигнали радіоліній БАС, геометрію взаємного розташування БПЛА, засобів розвідки та придушення комплексу РЕП.

На інтервалі робочого часу комплексу розглядається заздалегідь скоординована послідовність етапів, виходячи з розвідувальної захищеності радіоліній БПЛА, їх уразливості та можливостей комплексу РЕП створити у міру надходження розвідувальної інформації наростаючі за результативністю завадові впливи на них, щоб гарантовано досягти Головної мети управління. Конфліктні ситуації характеризуються ступенем визначеності вхідних складових динамічного стану КС та виразами для ймовірностей успішного придушення об'єктів придушення у структурі БПЛА змішаними варіантами прицільного за напрямом застосування наступних засобів постановки комбінацій:

видів потужних загороджувальних завад на етапі 2 при досягненні БПЛА радіогоризонту для наземних засобів їх постановки та у разі неповноті інформаційних даних для прицільного до структури сигналу придушення:

- приймачів сигналів радіоліній супутникової навігації;
- приймача радіолінії зв'язку із сигналами управління БПЛА;

$$P_{2.1}(\text{звгородж}, q=1) = (P_{\text{ШС РЛС}, q=3} + P_{\text{РТР-пеленг}, q=1,2}) P_{\text{придуш ЕМО}, q=1, \text{загородж}}$$

$$(1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завад}, m}) = (P_{\text{ШС РЛС}, q=3} + P_{\text{РТР-пеленг}, q=1,2}) \text{ПР}_{\text{придуш БРЛА-ЕМО-РЛ}, q=1, n=5, \text{загородж}}$$

$$(1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завад}, m}) > [1 - (P_{\text{розвідзахищ БПЛА-ЛОК}} P_{\text{розвідзахищ БПЛА-РЛ}, n=5, \text{загородж}})] \quad (5)$$

Зазначимо, що використання гіпотетичних інформаційних даних про частотні діапазони радіоліній змушують постановку завад з розширенням смуги спектра завад і розподілом їх потужності за спектром частот і часом в широких інтервалах, що скорочує дальність дії завад та зменшує результативність використовуваних засобів пригнічення;

видів малопотужних імітаційних завод на етапі 3 одночасно з постановкою потужних видів загороджувальних завод:

- приймачам сигналів радіоліній супутникової навігації;
- приймачу радіолінії зв'язку із сигналами управління БПЛА;

$$P_{2.2} = (P_{\text{ШС РЛС}, q=3} + P_{\text{РТР-пеленг}, q=2}) [(P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО}, q=2, \text{іміт}} + P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО}, q=1, \text{загродж}}) (1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завод, m}})] = (P_{\text{ШС РЛС}, q=3} + P_{\text{РТР-пеленг}, q=2}) [(\text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ}, q=2, n=5, \text{іміт}} + \text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ}, q=2, n=5, \text{загродж}}) (1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завод, m}})] > [1 - (P_{\text{розвідзахищ БПЛА-ЛОК}} P_{\text{розвідзахищ БПЛА-РЛ}, q=2, n=5, \text{іміт}})]. \quad (6)$$

Вплив малопотужних імітаційних видів завод призводить до зривів синхронізації приймачів сигналів, внесення неправдивої інформації та інформаційного перевантаження процедур обробки прийнятої інформації. Через те, що частотно-структурні параметри сигналів об'єктів придушення у складі БПЛА з часом стають відомими, можливо більш прицільно за частотою і часом пригнічувати радіолінії комбінаціями загороджувальних видів завод з підвищенням їх спектральної щільності потужності.

Повинна виконуватися вимога контролю результативності придушення заводо захищених радіоліній комбінаціями імітаційних і загороджувальних видів завод на етапі 3, що відображається у виразі (3) і служить початком наступного більш результативного етапу 4 функціонування засобів придушення комплексу РЕП;

видів малопотужних завод прихованого інформаційного придушення (імітаційними з вбудованими інформаційно-технологічними впливами) на етапі 4 одночасно з імітаційними та загороджувальними видами завод для:

- приймачів сигналів радіоліній супутникової навігації;
- приймача радіолінії зв'язку із сигналами управління БПЛА;

$$P_{2.3} = (P_{\text{ШС РЛС}, q=3} + P_{\text{РТР-ЕМО-пеленг}, q=2} P_{\text{РЕР-СІППІО-РЛ}, q=3}) [(P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ}, q=2, \text{іміт}} + P_{\text{придуш БПЛА-СІППІО-РЛ}, q=3, \text{інф.}} + P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО}, q=2, \text{іміт}} + P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО}, q=1, \text{загродж}}) (1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завод, m}})] = (P_{\text{ШС РЛС}, q=3} + P_{\text{РТР-ЕМО-пеленг}, q=2} P_{\text{РЕР-СІППІО-РЛ}, q=3}) [(\text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ}, q=2, n=5, \text{іміт}} + \text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ}, q=2, n=5, \text{іміт}} + \text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ}, q=2, n=5, \text{загродж}}) (1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завод, m}})] > [1 - (P_{\text{заводо захищ БПЛА-ЛОК}} P_{\text{заводо захищ БПЛА-РЛ}, q=2, n=5, \text{іміт}} P_{\text{іміто захищ БПЛА-РЛ}, q=2, n=5, \text{інф.}})]. \quad (7)$$

Права сторона нерівностей (1) – (7) характеризує вимоги подолання ймовірнісних показників стійкості радіоліній БПЛА на етапах, що обчислюються відповідно до відомих методик їх розрахунку [13, 15].

Кожен етап з наведеної послідовності етапів може змінити за даними засобів розвідки БПЛА, що супроводжується, його траєкторію в процесі сигнального або прихованого інформаційного придушення (якщо розпізнавати і не враховувати маневр БПЛА). Відсутність даних для управління БПЛА після придушення радіоліній зв'язку та супутникової навігації може спричинити перехід БПЛА в автономний режим. І тому виконується перевірка закінчення циклу міжетапного управління при керованому польоті БПЛА з контролем оглядовою ШС РЛС зміни його траєкторії з фіксацією моменту часу придушення або переходу в автономний режим.

Перелік формування наступних етапів придушення структурних елементів БПЛА для сценарія автономного польоту БПЛА та приклади даних для формалізації цілей їх протидії

Автономний політ малого (легкого) БПЛА виконується за підтримки бортової інерціальної навігаційної системи з можливістю разових коригувань траєкторії польоту за сигналами супутникової радіонавігації для підвищення точності його наведення, а також з виконанням

певних завдань управління польотом в бортовому пристрої керування з використанням відео інформації та штучного інтелекту у вигляді нейромережі. Тобто, на етапі 5 доцільно розглянути з урахуванням етапу 1 змішаний варіант прицільного за напрямом застосування наступних засобів постановки комбінацій:

видів малопотужних завад прихованого інформаційного придушення (імітаційними з вбудованими інформаційно-технологічними впливами) одночасно з потужними загороджувальними видами завад для приймачів сигналів радіоліній супутникової навігації;

- видів протидії штучній нейромережі в бортовому пристрої керування;

$$P_{3,1} = (P_{\text{ШС РЛС},q=3} + P_{\text{РТР-ЕМО-пеленг},q=2} P_{\text{РЕР-СІПІО-РЛ},q=3})$$

$$[(P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО},q=2,\text{іміт.}} P_{\text{придуш БПЛА-СІПІО-РЛ},q=3,\text{інф.}} + P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО},q=2,\text{іміт.}} + P_{\text{придуш БПЛА-ЕМО},q=1,\text{загородж.}})(1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завад, m}})]$$

$$= (P_{\text{ШС РЛС},q=3} + P_{\text{РТР-ЕМО-пеленг},q=2} P_{\text{РЕР-СІПІО-РЛ},q=3})$$

$$[(\text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ},q=2,n=4,\text{іміт.}} P_{\text{придуш БПЛА-СІПІО-РЛ},q=3,n=5,\text{інф.}} + \text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ},q=2,n=4,\text{іміт.}} + \text{ПР}_{\text{придуш БПЛА-ЕМО-РЛ},q=2,n=4,\text{загородж.}})]$$

$$(1 - \text{ПР}_{\text{пом навед завад, m}})] + P_{\text{придуш БПЛА-ШІ}} > [1 -$$

$$(P_{\text{завадозахищ БПЛА - ЛОК}} P_{\text{завадозахищ БПЛА - РЛ, q=2, n=4, іміт.}} P_{\text{імітозахищ БПЛА - РЛ, q=2, n=4, інф.}} P_{\text{стійкість ШІ}})], \quad (8)$$

де ймовірності: $P_{\text{стійкість ШІ}}$ – стійкості ШІ в бортовому пристрої керування БПЛА, $P_{\text{придуш ШІ}}$ – придушення ШІ.

Виділення ще одного об'єкта придушення у складі БПЛА пов'язане із застосуванням в структурі БПЛА штучного інтелекту (ШІ) у вигляді машинно-навченої («натренованої») нечіткої штучної нейромережі. Ця нейромережа може гнучко та швидко адаптувати до змін обстановки, що складається, його алгоритми пошуку об'єкта захисту, виявлення і розпізнавання за відео інформацією, наведення на нього і контролю розвідки або враження.

До протидії інтелектуальним БПЛА належать:

1) засоби протидії застосування імітаційних видів точкових завад:

- шифрування навігаційних сигналів, щоб не дати комплексу РЕП увійти в «натреновану» нейромережу з заміною сигналу управління БПЛА;

- використання додаткових засобів для розпізнавання результату впливу імітації або заміни сигналу управління;

- врахування обмежень, що вносяться впливом засобу завадозахисту радіоліній супутникової навігації типу «Комета – М» на можливість заміни даних навігації (створення хибних супутників або спуфінгу);

- ускладнення загороджувальними завадами розпізнавання об'єкта захисту за рахунок підвищення відношення сигнал/завада;

2) введення ШІ в оману шляхом:

- заміни зображення області поверхні, що спостерігає БПЛА;

- непомітної заміни матриці терезів вже налаштованої нейромережі помилковою матрицею;

- зробити об'єкт захисту нерозпізнаним засобами маскування, наприклад використанням імітаторів об'єкта захисту або спотворенням його зображення внесенням яскравих обманок, які перехоплюють увагу та ускладнюють розпізнавання образу об'єкта захисту (підміна характерних базових компонентів образу об'єкта розпізнавання, наприклад застосуванням мультиспектральних аерозолей з високими маскувальними властивостями для придушення сигнатур зображень об'єкта захисту та місцевості його розташування);

Отримані інформаційні дані про траєкторію польоту БПЛА, що супроводжується, доцільно передавати в якості цілевказівки безпілотникам – мисливцям за малими БПЛА та зенітно-артилерійськими засобами ближньої дії.

Таким чином, показано особливості інформаційного опису динамічного стану КС та керування цим станом та послідовності етапів вирішення конфлікту на користь комплексу РЕП. Інформаційний опис складових поточного стану КС у вигляді наведених сигнатур БПЛА залежить від ступенів їх невизначеності, потреб етапів функціонування комплексу РЕП, а також від певних ймовірностей P_j етапів комплексу РЕП та їх співвідношення на окремих етапах.

Інформаційний опис та особливості алгоритму циклу міжетапного ситуаційного управління

Координація являє собою процес розподілу діяльності складових частин контуру міжетапного ситуаційного управління на інтервалі робочого часу наземного комплексу РЕП, забезпечення взаємодії різних його частин в інтересах виконання завдань, що стоять перед ним, призначення нового функціонування шляхом забезпечення умов узгодженості та інтеграції етапів функціонування комплексу, збереження при цьому результативності, підтримки стійкості та вдосконалення режимів його роботи.

Об'єктом координації можуть бути процеси і результати цих процесів. Контур міжетапного ситуаційного управління включає інформаційні, управляючі та виконавчі засоби.

Призначення алгоритму циклу міжетапного ситуаційного управління: розв'язання завдань координації цілепокладанням, ціледосягненням і контролем формування та реалізації етапів функціонування комплексу РЕП через зіставлення цілей, ресурсів засобів розвідки та придушення, способів їх застосування, взаємного їх пристосування до об'єктів придушення БПЛА для досягнення Головної мети управління комплексу РЕП. Найбільш суттєві завдання координації:

- створення умов узгодження етапів при їх зміні через оцінку результативності рішення функціональних завдань внутрішньо- та міжетапного ситуаційного управління, синхронізації процесів інтеграції та її результатів на етапах з урахуванням гнучкої та швидкої перебудови структури комплексу відповідно до керуючих рішень координації;
- комплексування та інтеграція засобів розвідки та придушення всередині етапів та між ними;
- забезпечення безперервності управління поточним контролем умов спостереження та результатів управління для коригування цілей наступної зміни етапів.

Шуканий алгоритм повинен відповідно до його призначення забезпечити рішення задач координації в сценаріях керованого або автономного польоту тактичного БПЛА в умовах кількох об'єктів розвідки та придушення у складі БПЛА, різноманіття засобів розвідки та управління, етапів функціонування комплексу, станів конфліктної ситуації на етапах, цілей, умов спостереження, придушення та прийняття керуючих рішень при зміні етапів, а також подолання труднощів через відмінності часових характеристик етапів пригнічення окремих об'єктів придушення.

Перелік цілей циклу міжетапного ситуаційного управління та порядок управління ними визначається, як показано вище, зростаючою пріоритетністю значимості взаємодії засобів розвідки та придушення у структурі етапів функціонування комплексу РЕП у міру зниження ступеня невизначеності інформаційного опису стану КС, покращення виконання умов узгодження та синхронізації зміни етапів, вибором більш ефективних засобів розвідки та постановки видів завдань об'єктам придушення з потребою контролю результативності дій щодо наближення до Головної мети управління. Алгоритм базується на застосуванні сучасних знань відносно вирішення конфліктних ситуацій методами управління з інформуванням про обмеження ресурсів і орієнтовний час їх виконання та використання можливостей інформаційних технологій.

В залежності від конфліктної ситуації, проміжних і кінцевого результатів алгоритм циклу міжетапного ситуаційного управління повинен постійно коригувати технологію застосування методів та засобів розвідки та придушення на етапах функціонування комплексу РЕП і при їх змінах. Ця робота повинна базуватись на аналізі поточної інформації, її уточненні, визначенні проблем щодо коригуючих рішень, створення інформаційної бази даних про випадки станів КС і способи їх вирішення в тому чи іншому сценарії протидії певному типу БПЛА.

Успіх алгоритму міжетапного управління у здійсненні координації взаємодії етапів функціонування наземного комплексу РЕП у конфліктних ситуаціях можна оцінити по відношенню показників прийняття і реалізації керуючих рішень на окремих етапах функціонування комплексу [10] до Головної мети алгоритму (близькості та швидкості наближення) при мінімізації ресурсних витрат та в умовах невизначеності або неповноти інформації, дефіциту часу для всебічного аналізу обстановки у зоні відповідальності комплексу РЕП.

Особливості формалізації міжетапного ситуаційного управління полягають у виділенні та аналізі впливів загальних та відмінних чинників його процесів. До загальних чинників, що суттєво впливають на побудову алгоритму та його результативність, відносяться:

- склад і багатофункціональна побудова комплексу РЕП, що реалізує базові принципи вирішення проблемних завдань, які розглядаються на основних його етапах роботи, узгоджено до уразливості технічних зразків малого БПЛА;

- цикли внутрішньо етапного ситуаційного управління [10], що є основною складовою побудови алгоритму міжетапного ситуаційного управління;

- подання конфліктних ситуацій на етапах функціонування комплексу РЕП як протидії ймовірнісних показників їх узагальнених ТТХ (ймовірностей розвідувальної захищеності, завадо- та імітозахищеності об'єктів розвідки та придушення, що має відношення до малопомітності БПЛА, сигналів його КРУ, радіонавігації та переданих інформаційних повідомлень ймовірностям їх подолання – P_j , $j = 1, 2, 3, \dots$) з урахуванням впливу особливостей побудови малого (легкого) БПЛА і комплексу РЕП та тактик їх застосування;

- застосування системно-процесного, когнітивного підходу до ситуаційного управління, орієнтованого на інформаційний опис стану КС в межах двосторонньої моделі конфлікту, що розглядається, та застосування рефлексивної і адаптивної форм управління, що спирається на високий рівень професійних компетенцій та креативно-рефлексивні здібності суб'єктів управління (операторів), а також використання у структурі інформаційних та керуючих засобів контуру управління можливостей інформаційних технологій, засобів штучного інтелекту та автоматизації;

- використання методичних переваг постановки та пошуку способів вирішення завдань координації на етапах функціонування наземного комплексу РЕП із застосуванням показників критично важливого переліку узагальнених ТТХ БПЛА та комплексу РЕП в умовах невизначеності стану конфліктних ситуацій та обмежень на витрати ресурсу, а також поточного контролю порівняння фактичних результатів вирішення завдань координації із цільовими;

- вибір напряму радіоелектронної протидії (частини структури комплексу) залежно від сценарію конфлікту між БПЛА та комплексом РЕП;

- створення умов для результативного функціонування засобів розвідки, придушення та їх адаптації до зміни цих умов, координація їх взаємозв'язку.

Відмінні чинники процесів міжетапного ситуаційного паралельно-послідовного управління від локально-оптимізаційних завдань ситуаційного управління на етапах функціонування наземного комплексу РЕП [14, 17, 18] полягають:

- у кількості вертикальних послідовностей етапів (об'єктів придушення, що одночасно пригнічуються), комбінацій видів завад з імітуючим характером впливів, особливостях окремих етапів та труднощах горизонтальної координації етапів через часову розбіжність вертикальних послідовностей етапів;

- забезпеченні безперервності (динамізму) управління, яке досягається на основі поточного контролю порівняння фактичних результатів управління, умов узгодження з

цільовими та використання певної форми зворотного зв'язку для зміни етапів; застосуванні правила закінчення циклу управління при зміні етапів функціонування комплексу, вжитті заходів для усунення відхилень та запобігання їх виникненню в майбутньому; реалізації певних кроків алгоритму.

Виділено за цілепокладанням наданих завдань координації наступні кроки алгоритму, орієнтованого більш на сценарій керованого польоту БПЛА. При цьому алгоритм використовує показники, що наведені у виразах (1) – (8).

К р о к 1. Досягнення цілепокладання на етапі пошуку, виявлення та визначення сигнатур БПЛА, формування даних, необхідних для ситуаційної обізнаності та управління засобами різних видів розвідки та придушення. Розвідувальна інформація з часом накопичується, уточнюється та передається на поточний етап придушення:

$$P_1 \rightarrow P_{1max}, R_1 \rightarrow \min, P_1 \rightarrow P_j \text{ за умови } [(T_{робоче} - (T_1 + \sum T_{j+1}))] \rightarrow \min, j=2,3 \quad (9)$$

Особливості координації на етапі стосуються черговості розкриття структури та параметрів радіоліній в послідовності об'єктів придушення з погляду розвідахищеності радіоліній (зв'язку – відеоінформації, ТМІ, супутникової навігації та радіолінії зв'язку з сигналами управління БПЛА), а також забезпечення вимог до повноти, достовірності, точності і ступеня невизначеності інформації (q).

К р о к 2. Досягнення цілей перевірки умов узгодження зміни етапів.

Це вимагає когнітивного аналізу динамічного стану поточної КС і контролю його змін, відповідності стану КС потребам наступного етапу і упорядкованості етапів протидії та здатності алгоритму циклу міжетапного ситуаційного управління протидією малому БПЛА вирішити задачу координації, а також комплексування процесів управління взаємодією засобів розвідки, придушення та їх проміжних результатів.

З'ясовуються причини відхилення від очікуваних показників результативності етапів функціонування засобів розвідки та придушення. Труднощі виконання умов узгодження можуть виникнути через відмінності цілей, способів та термінів виконання видів усередині етапного управління:

- неузгодженість умов спостереження та прийняття рішень при зміні етапів (коли введені дані одного етапу у вигляді результатів засобів розвідки та придушення є виходом іншого), відмінності термінів виконання функціональних завдань усередині етапного управління ведуть до порушення цілісності процесу управління;
- виконання процедур контролю через нерівні проміжки часу може викликати проблеми синхронізації та інтеграції;
- незадовільне перетворення результатів аналізу відхилень від необхідних цілей внаслідок недостатнього рівня знань або недостатнього контролю;
- обмеженість системи управління, що викликана нестачею визначальних її ресурсів;
- урахування впливу як змін внутрішнього середовища, так і зовнішньої (що також порушує стійкість управління).

Усунення зазначених відхилень від очікуваних показників умов узгодженості зміни етапів функціонування засобів розвідки і придушення пов'язано з визначенням складу можливих додаткових дій, потрібного складу ресурсів і порядку їх виконання на етапах функціонування.

К р о к 3. Досягнення цілей взаємного застосування засобів розвідки та придушення на етапах та при їх зміні.

Постановка завдань управління та пошук рішень здійснюється при взаємодії характеру розвідданих етапу 1 та впливів різних видів завад поточного етапу придушення за виразом

$$Q_{jin}|S^M - S^P|_{jin} \rightarrow \text{extr}, (P_{j+1}/P_j) > 1, P_j \rightarrow P_{jmax}, j = 2,3, \dots, R_j \rightarrow \min, T_j \leq T_{j-доп}$$

$$\text{Перевірка: } (P_{jmax} - P_j) < \Delta P_{jдоп}, (T_{робоче} - \sum T_j) > 0, j = 2,3, \dots \quad (10)$$

та факту зміни траєкторії польоту БПЛА за даними його супроводу оглядовою ШС РЛС.

Якщо відхилення допустимі, то остання версія рішення не коригується і цикл управління продовжується.

К р о к 4. Дія алгоритму завершується після досягнення Головної мети Р, зафіксованої в циклі міжетапного управління, або значення

$$(P - P_j) < \Delta P_{j\text{доп}} (T_{\text{робоче}} - \sum T_j) = 0, j = 2, 3, \dots \quad (11)$$

а також факту зміни траєкторії польоту БПЛА за даними його супроводу ШС РЛС [18, 19].

Тут: $\Delta P_{\text{доп}}$ – допустима міра зближення; $T_{\text{робоче}}$ – тривалість інтервалу робітного часу комплексу; T_j – тривалість операцій на j -му етапі; Q_{jin} – складний критерій якості зміни цілей та умов узгодження при переході на наступний етап з урахуванням його характеристик та особливостей – вирази (5) – (8). Критерій відображає результативність як зіставлення очікуваних значень ймовірнісних показників загальних ТТХ БПЛА і комплексу РЕП, якостей переліку умов узгодження між етапами, що змінюються, та фактично отриманих; j – порядковий номер наступного етапу функціонування комплексу РЕП; i – вхідні та вихідні складові інформаційного опису стану КС і q – ступінь невизначеності умов спостереження та прийняття рішень на j -му етапі, p – той чи інший об’єкт розвідки та придушення); $|S^M - S^P|$ – різниця між очікуваним і фактичним показниками якості інформаційного опису складових поточного стану КС, результативності задіяних засобів розвідки чи придушення на етапі та якостей умов узгодження між змінними етапами, досягнутих на даний момент часу внаслідок реалізації синтезованого закону управління перебудовою структури комплексу РЕП, а також контролю умов спостереження та результату управління із зазначенням кількісних характеристик ступеня досягнення мети управління; R_j – вектор, що характеризує види витрат ресурсів, що є у розпорядженні комплексу РЕП на даний момент часу; $T_{j\text{доп}}$ – допустимий час синтезу та реалізації закону управління та координатії дій при зміні етапів.

Маємо відмінність постановки задач внутрішньо етапного управління [10], що полягає у підтримці динамізму управління та перевірці умов переходу на наступний етап функціонування або умов закінчення циклу управління. Вона стосується контролю на поточному j -му етапі проміжних результатів та факту досягнення Головної мети управління на інтервалі робочого часу $T_{\text{робоче}}$ комплексу РЕП або вичерпання його часу.

На рис. 1 надана структурна схема міжетапного ситуаційного управління відповідно до зазначених його кроків, що здійснюється під наглядом суб’єкта управління (операторів відповідних складових систем комплексу РЕП). Структура алгоритму логічно коригується у випадках керованого або автономного польотів БПЛА.

Рішення завдань управління на кожному етапі виробляються з застосуванням у циклі міжетапного ситуаційного управління принципу спільної реалізації функцій: пізнання стану КС, сумісного керування засобами розвідки та придушення з використанням проблемно-орієнтованих сукупності знань, необхідними для досягнення Головної мети управління на етапах 2, 3, ... з використанням цілей зміни етапів та умов узгодження, зокрема відповідно до виразів (5) – (11) керованого або автономного польоту БПЛА. При цьому до інформаційних та керуючих засобів контуру ситуаційного міжетапного управління пред’являються *типові вимоги* [17, 18], водночас вимоги до виконавчих засобів суттєво відрізняються. Вони залежать від урахування специфіки побудови, ТТХ типу БПЛА і тактики його застосування, геометрії конфліктної взаємодії складових частин БПЛА та комплексу РЕП, співвідношень просторових та поляризаційних характеристик ДН антен, що застосовуються, енергетичних, частотних, часових, параметрів структурно-сигнальних форм корисних сигналів ліній зв’язку КРУ, радіоліній супутникової навігації БПЛА та засобів РТР, РЕР або засобів постановки різних видів навмисних завад, що застосовуються.

Система технічних засобів міжетапного
ситуаційного управління

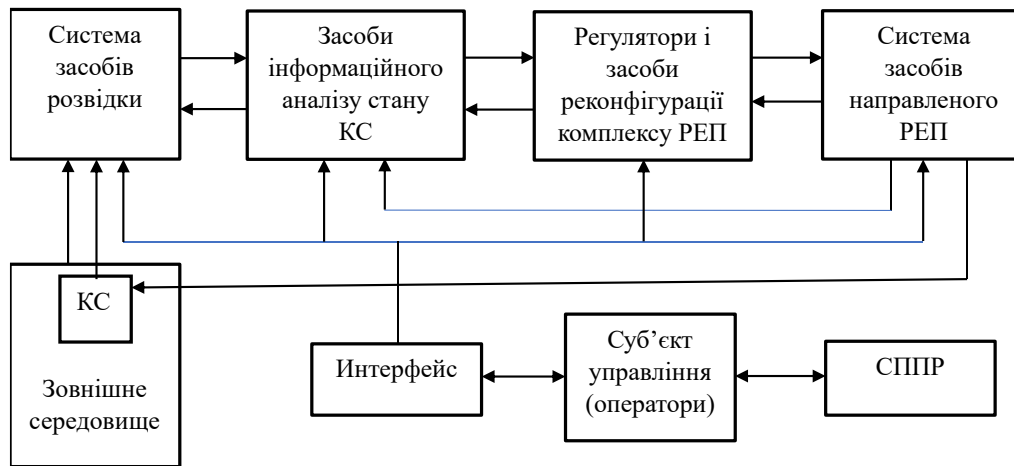


Рис. 1. Структура алгоритму міжетапного ситуаційного управління комплексом РЕП

Шукані матричні рішення керування залежать від n -х об'єктів розвідки та придушення, вхідних та вихідних i -х складових інформаційного опису стану КС, q -х ступенів невизначеності умов спостереження, придушення та прийняття рішень, а також наведених нижче інших вимог до побудови та реалізації алгоритму циклу міжетапного ситуаційного управління.

Керування стосується:

- складу та режимів роботи засобів радіолокаційної, радіотехнічної та радіоелектронної розвідки для виявлення БПЛА, отримання ситуаційної обізнаності, аналізу та прогнозу характеру змін результатів розвідки сигнатур БПЛА, оцінки ступеню його загрози, формування в реальному часі даних, необхідних для цілепокладання та синтезу закону координації інтегрування засобів розвідки та радіоелектронної протидії БПЛА як на етапі, так і при їх зміні;
- вибору комбінацій етапів та відповідних способів придушення, складу і режимів роботи засобів постановки різних видів завад;
- реалізації синтезованих законів координації при створенні умов спільного функціонування засобів розвідки та придушення комплексу, етапів функціонування в різні моменти часу, а також призначення комплексних режимів роботи виконавчих технічних засобів контуру управління, що відбувається за допомогою гнучкої та швидкої перебудови структури комплексу, активації призначених засобів та контролю кількісних характеристик ступеня досягнення якості умов узгодження між змінними етапами та мети управління $|S^M - S^P|_{jin}$ відповідно до прийнятих рішень координації.

Склади комбінацій застосовуваних у різні моменти часу видів завад і рубіжі їх застосування залежать від особливостей конструктивної побудови різних типів тактичного БПЛА, наземного комплексу РЕП, сценаріїв протидії, характеру вразливості розвідувальної, завадо- та імітозахищеності об'єктів придушення від впливів засобів розвідки комплексу, ступеня невизначеності ($q = 1, 2, 3$) вхідних і вихідних складових стану КС для комплексного керування взаємодією засобами розвідки і придушення на поточному етапі функціонування комплексу та при їх зміні, а також ступеня небезпеки завадових впливів на об'єкти придушення.

До технологічних особливостей реалізації алгоритму відноситься: застосування різних методів оптимізації; засобів штучного інтелекту у вигляді нечітких штучних нейромереж в структурі інформаційних та керуючих засобів контуру міжетапного ситуаційного управління; системи підтримки прийняття рішень для рефлексивного пізнання динамічного стану конфліктної ситуації в умовах різного ступеню невизначеності, прийняття адаптивних рішень відповідно до змін обстановки; формування баз еталонів опису динамічних станів кон-

фліктних ситуацій на етапах функціонування комплексу та для розпізнавання типів тактичних БПЛА, а також засобів автоматизації вирішення завдань координації і відповідної гнучкої та швидкої перебудови структури комплексу РЕП.

Так, у разі вирішення формалізованих завдань координації застосовуються: логіко-оптимальні; логіко-лінгвістичні, експертні методи, машинно-навчені нейро-нечіткі мережі;

У разі вирішення важко формалізованих завдань координації – інтерпретаційно-дослідний метод з урахуванням впливу фактору суб'єктності управління.

Перспективним є застосування нечітких штучних нейромереж та алгоритмів їх машинного навчання [12], що зумовлено великими обсягами інформаційних даних, що переробляються у реальному часі, часто змінюваних наборів КС та їх динамічних станів, типів тактичних БПЛА, а також в умовах невизначеності, неповноти інформації та дефіциту часу для протидії. Штучний інтелект як сукупність сучасних інформаційних технологій, що моделюють деякі сторони розумової діяльності людини при розробці та реалізації рішень, значно посилює керованість та результативність виконання завдань координації у складних та змінних умовах, мінімізуючи ризики, що є комбінацією ймовірності певної події та можливих її наслідків. Його спрямованість пов'язана з аналізом ситуаційної обізнаності, розпізнаванням та ідентифікацією типів БПЛА за ознаками їх радіолокаційно-дальнісних, структурно-сигнальних і структурно-інформаційних портретів, підвищенням якості, швидкості вирішення завдань координації, а також адаптувати вибір засобів розвідки та придушення, видів та параметрів завад для зміни стану КС. Штучний інтелект:

- організовує розрахунок та узгодження застосування методів, засобів і часу виконання завдання за обраним варіантом (сценарієм) протидії;
- стежить за узгодженістю виконання завдань алгоритму в контурі міжетапного ситуаційного управління;
- розробляє варіанти коригувань, вибирає найкращий і координує процес виконання завдання для поточної КС та при настанні непередбачених ситуацій, що заважають виконанню завдання;
- вибирає найбільш оптимальний варіант вирішення задачі управління під наглядом суб'єкта управління.

Для зниження рівня суб'єктивності управління та залучення в процеси управління зовнішніх експертних знань і підвищення рівня професійної компетенції операторів комплексу, посилення їх креативно-рефлексивних здібностей, особливо в умовах вирішення завдань координації, що важко формалізуються, також застосовуються системи підтримки прийняття рішень (СППР). Підтримка прийняття рішень має надавати пріоритетний список загроз, який постійно оновлюється в міру зміни конфліктної ситуації, включати доступні виконавчі засоби контуру міжетапного ситуаційного управління та давати рекомендації про те, який засіб розвідки чи придушення використовувати для впливу на складові частини структури виявленого БПЛА певного типу, беручи до уваги їх вразливості та бажаний ефект впливу. Попереднє знання вразливостей типів та ефектів впливу сприяє скороченню часу ухвалення рішень. Слід також враховувати ризик, що вноситься людським фактором при застосуванні виконавчого засобу або їх комплексуванні, щоб мати можливість адаптувати ефект до загрози і поточного стану конфліктної ситуації. Повністю автономне прийняття рішень і втручання операторів можуть розглядатися, коли застосування засобу має низький ризик або рівень загрози високий. СППР повинна зіставляти наявні виконавчі засоби з цілями управління та умовами узгодженості при зміні етапів функціонування комплексу РЕП, мінімізувати ризик помилкових (пропонованих) рішень, скорочувати терміни прийняття рішень, знижувати максимально можливою мірою навантаження на операторів за допомогою засобів інтелектуалізації та автоматизації контуру управління, що розглядається.

Наділення алгоритму циклу міжетапного управління когнітивними властивостями передбачає: отримання в процесі спостереження і придушення знань про КС і результативності окремого та взаємного застосування засобів розвідки і придушення та визначення їх безпосереднього використання; залучення зовнішніх експертних знань у

вигляді експертних підсистем СППР та нечітких штучних нейронних мереж у процеси аналізу та регуляції в умовах невизначеності; можливість динамічно коригувати координацію дій комплексу Рля досягнення наперед поставлених цілей, а також навчатися на основі отриманого досвіду. Інтелектуалізація в алгоритмі процесів аналізу обстановки та вироблення керуючих рішень з необхідними характеристиками в умовах складного конфлікту вимагає розробки алгоритмів машинного навчання засобів штучного інтелекту, які можуть бути предметом подальших досліджень.

До розробки методики оцінки результативності наземного комплексу РЕП

Ефективність алгоритму, що розглядається, характеризується:

- *керованістю* змін стану КС та відповідними рішеннями координації при змінах етапів функціонування комплексу РЕП, що дозволяють перевести КС в потрібний стан шляхом докладання цілеспрямованого впливу, що керує в мінливій обстановці загроз БПЛА процесами взаємодії складових частин комплексу РЕП і БПЛА, на ці компоненти за кінцевий інтервал часу. Вимоги до керованості алгоритму міжетапного ситуаційного управління відображені у виразах (1) – (8), які використовуються в алгоритмі як системний інструмент формалізації;

- *результативністю* – різницею очікуваного результату та фактичного $|S^M - S^F|$ щодо багатофакторної зміни динамічного стану об'єкта управління – КС при зміні етапів функціонування наземного комплексу РЕП. Результативність алгоритму полягає в її приростах при кожній зміні етапів через певне поліпшення показників придушення БПЛА, тобто в тому, щоб якомога раніше отримувати локаційні дані відносно БПЛА, первинну інформацію про кожну радіолінію, що бере участь у процесі управління малим БПЛА з моменту його виявлення, і накопичувати інформацію про неї в процесі спостереження на всьому інтервалі робочого часу комплексу. Цього вимагає ситуаційна поінформованість для прийняття правильних управлінських рішень щодо вибору ефективного, динамічного та спільного застосування засобів розвідки та придушення з урахуванням геометрії взаємного розташування БПЛА та засобів розвідки і придушення комплексу поряд з іншими енергетичними, частотними, часовими факторами, характером вразливості радіоліній та нарощування зусиль протидії в різні моменти часу їх застосування залежно від своєчасності надходження та якості поточної розвідувальної інформації про об'єкти придушення в структурі БПЛА;

- *безперервністю керування*, що забезпечується на основі контролю стану КС, вирішення завдань координації при зміні етапів та перевірці умов закінчення циклу міжетапного управління;

- мінімальними *витратами ресурсу* комплексу РЕП.

Поданий опис спрощеної двосторонньої динамічної моделі конфлікту, зокрема алгоритму координації при зміні етапів функціонування комплексу, є основою побудови методики оцінки його вкладу при досягненні Головної мети управління у сценаріях керованого або автономного польоту БПЛА та в умовах дефіциту часу протидії.

Методика оцінки результативності наземного комплексу РЕП складається з набору окремих методик оцінки його результативності на інтервалі робочого часу, що підлягають розробці:

- для окремих етапів при внутрішньо етапному ситуаційному управлінні у представлених послідовностях етапів застосування засобів розвідки та придушення і для певного складу об'єктів придушення у структурі БПЛА;

- накопиченої результативності взаємодії етапів при міжетапному ситуаційному управлінні з наростаючими ефектами їх впливу внаслідок зростаючої взаємодії засобів розвідки та придушення на етапах для певного складу об'єктів придушення у структурі БПЛА. Накопичення переривається на тому чи іншому етапі послідовності досягненням позначеної в алгоритмі міжетапного ситуаційного управління Головної мети управління фактом придушення БПЛА за локаційними даними оглядової ШС РЛС або закінченням тривалості інтервалу робочого часу. При цьому кожна зміна етапів характеризується певним приростом поліпшення показників придушення БПЛА за більш короткий час функціонування і на більшій

відстані від об'єкту захисту при забезпеченні безперервності управління на етапах їх інтеграцією, взаємодією засобів розвідки і спрямованого за напрямком придушення певних структурних елементів БПЛА комбінаціями різних видів завад з наростаючим маскуючим або/та імітуючим ефектами впливу

Оцінка можливості підвищення результативності наземного комплексу РЕП при протидії БПЛА тактичного рівня вимагає комплексного підходу, методично та кількісно пов'язаного з системним та об'єктивним аналізом показників результативності алгоритму циклу міжетапного управління з урахуванням особливостей конструктивно-функціональної побудови типів БПЛА та комплексу РЕП, специфіки та тактик їх застосування для розвідки, завдання ударів по важливих об'єктах інфраструктури та розглянутих можливостей їх захисту наземним комплексом РЕП. Ця оцінка для різних сценаріїв радіоелектронної протидії безпілотникам остаточно визначає потрібну структуру комплексу РЕП з урахуванням складу об'єктів розвідки та придушення в БПЛА, інформаційних, керуючих та виконавчих засобів контуру циклу міжетапного ситуаційного управління та вимог до складу засобів гнучкої та швидкої автоматичної реконфігурації структури комплексу РЕП при реалізації керуючих рішень координації на інтервалі робітного часу комплексу.

Для досягнення потенційних можливостей придушення малих (легких) БПЛА загалом та підвищення живучості наземного комплексу РЕП слід також передбачити його комплексування за даними алгоритму із застосуванням безпілотників – мисливців за малими БПЛА та зенітно-артилерійськими засобами ближньої дії, використовуючи досвід ведення бойових дій.

Разом з тим, розглянутий наземний комплекс РЕП характеризується малою тривалістю інтервалу робочого часу, якого може не вистачити для реалізації розглянутих можливих етапів протидії при керованому польоті БПЛА. Це і залежність засобів виявлення БПЛА від рельєфу земної поверхні та дальності до радіогоризонту, не зважаючи на застосування високих щогл для підняття антен засобів розвідки та придушення, що обмежують функціональні можливості комплексу. Для реалізації потенційних можливостей протидії різним типам тактичних БПЛА при захисті важливого об'єкта інфраструктури потрібно, наприклад:

- модернізувати структуру наземного комплексу РЕП включенням до його складу прив'язного аеростату та розміщенням на його підвісній повітряній платформі певної частини з його конструктивних модулів та додаткових пристроїв для розвідки та впливу на структуру наземного пункту управління БПЛА;

- провести подальше вдосконалення алгоритмів внутрішньо та міжетапного ситуаційного управління у зв'язку з істотним збільшенням інтервалу робочого часу комплексу, розширенням складу функціональних завдань розвідки та придушення всіх структурних елементів малої безпілотної системи, що раніше були не доступні наземному комплексу РЕП.

Висновки

Надано інформаційний опис структури та особливостей побудови алгоритму циклу міжетапного ситуаційного управління наземним комплексом РЕП у рамках спрощеної двосторонньої динамічної моделі конфліктної взаємодії складових частин багатофункціональних структур малого (легкого) БПЛА тактичного рівня та одноцільового наземного комплексу РЕП при захисті важливого інфраструктурного об'єкта для сценаріїв керованого або автономного польотів БПЛА в умовах дефіциту часу протидії.

Алгоритм готує умови узгодження для ефективного вирішення функціональних завдань внутрішньо етапного ситуаційного управління з максимальними значеннями ймовірностей успішного їх вирішення P_j , $j=1,2,\dots$ на послідовності етапів вирішення конфлікту на користь комплексу РЕП, а також оптимізує вирішення завдань координації взаємодії цих етапів з метою досягнення Головної мети управління – максимуму ймовірності P захисту важливого об'єкта. Це виконується при управлінні динамічним станом конфліктної ситуації на заздалегідь сформованій послідовності цілеспрямованих етапів, узгоджених за цілями, умовами

спостереження та придушення, синхронізованих у часі постановок та розв'язань завдань циклу координації взаємодії етапів функціонування комплексу РЕП при їх зміні через синергію цих процесів і їх результатів та швидко і гнучко реконфігурацію його структури. Показано специфіку критеріїв, постановки та вирішення завдань циклу координації міжетапного ситуаційного управління. Вони засновані на органічному зв'язку радіоліній зв'язку КРУ та супутникової навігації БПЛА з керованими засобами розвідки та засобами придушення їх приймальних пристроїв (об'єктів придушення), а також на залежності координуючих керувань від своєчасності надходження повної, достовірної та точної розвідувальної інформації з урахуванням уразливості об'єктів придушення та упорядкованих певним чином взаємних дій засобів розвідки та придушення при зміні етапів.

Показано особливості інформаційного опису та управління вхідними складовими поточного стану конфліктної ситуації у вигляді наведених сигнатур БПЛА, що залежать від ступенів їх невизначеності, потреб етапів функціонування комплексу РЕП, а також від складу певних ключових загальних ТТХ БПЛА і комплексу РЕП та їх співвідношення на окремих етапах.

Особливості побудови алгоритму криються також у спільному використанні на інтервалі робочого часу комплексу засобів розвідки і засобів придушення для нарощування зусиль за зміни етапів комбінаціями різних видів точкових завад для сигнального і прихованого інформаційного придушення БПЛА у міру накопичення та надходження розвідувальної інформації щодо його сигнатур, а також у технологічних особливостях його реалізації. Останні пов'язані із необхідністю застосування різних методів оптимізації в залежності від ступеня невизначеності умов спостереження та прийняття рішень, засобів штучного інтелекту та автоматизації перебудови структури комплексу РЕП відповідно до потреб координації.

Накопичувальна результативність алгоритму, що розглядається, характеризується її приростами при зміні етапів, що ведуть до певного поліпшення показників придушення БПЛА за більш короткий час функціонування і на більшій відстані від об'єкту захисту при забезпеченні безперервності керування на етапах контролем комплексування та інтеграції засобів розвідки і спрямованого за напрямком придушення певних структурних елементів БПЛА комбінаціями різних видів точкових завад з наростаючим маскуючим або/та імітуючим ефектами впливу.

Наведено обмеження, властиві наземному комплексу РЕП, розуміння яких відкриває шлях до їх подолання. Наприклад, включення до його складу прив'язного аеростату веде до досягнення потенційної результативності протидії різним типам тактичних БПЛА за рахунок суттєвого розширення функціональних можливостей комплексу, збільшення його інтервалу робочого часу, появи нових об'єктів розвідки та придушення в нових умовах протидії, де використовується вся структура малої безпілотної системи, яка раніше була недоступна наземному комплексу РЕП.

Список літератури:

1. Generation of Counter UAS Systems to Defeat of Low Slow and Small (LSS) Air Threats. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1152139.pdf>
2. Певцов Г.В., Олещук М.М. Аналіз спроможностей оглядових РЛС РТВ щодо виявлення, супроводження та ідентифікації безпілотних літальних апаратів // Системи озброєння і військова техніка. 2021. № 3(67). С. 24–30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.03>.
3. Миценко І.М., Педенко Ю.О., Роєнко О.М. Про можливість захисту БПЛА від придушення сигналів управління // Радіотехніка. 2024. Вип. 217. С. 133–138.
4. Методичні рекомендації «Щодо радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам «Ланцет» / Головне управління радіоелектронної та кіберборотьби Генерального штабу Збройних Сил України, Житомир. військ. ін-т ім. С. П. Корольова, 2023. 23 с. <https://sprotvyg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/03/>
5. Sukharevsky O., Orlenko V., Vasylets V., Ryapolov I. Radar scattering characteristics of a UAV model in X-band // IET Radar, Sonar & Navigation. 2020. Vol. 14. Iss. 4. P. 532–537.
6. Ярош С.П., Гур'єв Д.О. Впровадження специфічних способів і засобів протидії безпілотним літальним апаратам в угрупованні зенітних ракетних військ // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2022. № 2(47). С. 47–61. DOI: 10.30748/nitps.2022.47.05

7. Лещенко С. П., Адаменко А. А., Лупандін В. А., Мегельбей Г. В. Система інформаційного забезпечення протидії безпілотним літальним апаратам противника при комплексному застосуванні засобів радіоелектронної боротьби // 36. наук. пр. Харків. нац. ун-ту Повітряних Сил. 2022. № 3 (73). С. 31–37. <https://doi.org/10.30748/zhups.2022.73.05>.
8. Лупандін В. А., Сотніков О. М., Мегельбей Г. В., Танцюра О. Б. Модель захисту об'єктів і військової техніки від роїв безпілотних літальних апаратів // Системи обробки інформації. 2022. № 4 (171). С. 41–47. <https://doi.org/10.30748/soi.2022.171.04>.
9. Kaidenko M. M., Kravchuk S. O. Protection against the effect of different classes of attacks on UAV control channels // Information and telecommunication sciences. 2022. Vol. 13, №1. P. 35–43.
10. Канцедал В.М. Поліпшення рівня формалізації процесів управління на основних етапах радіоелектронної протидії малій безпілотній авіаційній системі для отримання конфліктних переваг // Радіотехніка. 2024. Вип. 219. С. 68–81. DOI:10.30837/rt.2024.4.219.08
11. Ладанюк А.П., Шумигай Д.А., Бойко Р.О. Системна задача координації в технологічних комплексах неперервного типу. Київ : НУХТ. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3191308c-9d12-4a63-82fe-008604669899/content>
12. Сахно Е.В., Мороз Н.В., Пономаренко С.І. Пономаренко. Використання теорії нечіткої логіки при управлінні проектами // Наук. вісник Полісся. 2021. № 3(15). С. 119–126. [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2018-3\(15\)-119-126](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2018-3(15)-119-126)
13. Заславець В.П., Долина М.П., Чечуй О.В. Особливості розрахунку завадозахищеності ліній радіозв'язку в умовах радіоподавлення (радіоелектронного конфлікту) // Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 1(61). С. 7–12. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.01>.
14. Kantsedal V. Features of the formalization of situation management cycles of the ground specialized complex of radio electronic countermeasures for small drones // Book of proceedings of the XX International Scientific Conference on Electronics and Applied Physics (APHYS 2024). 22–25 October 2024. Kuiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. P. 220–221.
15. Канцедал В.М., Могила А.А. Особливості управління завадою захищеністю оглядової РЛС при її придушенні активними завадами та інформаційними впливами, що заважають // Радіотехніка. 2021. Вип. 207. С. 89–101.
16. Kantsedal V., Mogyla A. System advantages and features of the use of stochastic periodic complex pulse radio signals in the sensing modes of a surveillance radar // Book of proceedings of the 19th International Scientific Conference on Electronics and Applied Physics (APHYS 2023). 17–21 October 2023. Kuiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. P. 89 –90.
17. Kantsedal V., Mogyla A. A Multifactorial Approach to Building a System for Automated Control of Radar Information Stability // IEEE Ukrainian Microwave Week (MRRS) Kharkov, Ukraine, September 21 – 25, 2020. Vol. 2. P. 373–378. https://drive.google.com/file/d/1mRSc1SV_I6hJ--uhjkQPhxZ6FDzLY8/view?usp=sharing (Пароль для распаковки zip-файла сборника трудов совпадает с именем файла – «UkrMW-2020».)
18. Kantsedal V. Rationale for construction of the structure of the system for cognitive control of types of signal resource surveillance radar // Book of proceedings of the 19th International Scientific Conference on Electronics and Applied Physics (APHYS 2023). 17–21 October 2023. Kuiv, Ukraine, Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of Radio Physics, Electronics and Computer Systems. P. 91–92.

Надійшла до редколегії 11.03.2025

Відомості про авторів:

Канцедал Валерій Михайлович – канд. техн. наук, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усікова НАН України, старший науковий співробітник; Україна; e-mail: kantsedalvaleri@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4008-917X>.

Могила Анатолій Андрійович – канд. фіз.-мат. наук, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усікова НАН України, завідувач відділу; Україна; e-mail: moganat1196@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1726-6265>.