
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 574.08): 504

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.2>

ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Бондар О.І.¹, Машков О.А.¹, Міхеєв В.С.², Жукаускас С.В.³, Нігородова С.А.⁴

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

²Державне космічне агентство України
вул. Московська, 8, 01010, м. Київ

³Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ

⁴Координаційний центр програм малих грантів Глобального екологічного фонду
Кловський Узвіз, 1, 01021, м. Київ

mashkov_oleg_52@ukr.net, yd@nkau.gov.ua, S.Zhukauskas@gmail.com, SvitlanaN@unops.org

Наукові дослідження присвячені обґрунтуванню технології побудови автоматизованої системи екологічного моніторингу з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів. Визначено, що синтез систем автоматизованого управління екологічним моніторингом неможливий при застосуванні наявних методів розподілу функцій управління між оператором та автоматичними пристроями, узгодження психофізіологічних характеристик оператора й автоматичних пристроїв, оцінювання психофізіологічної напруженості оператора. Запропоновано враховувати процеси взаємодії оператора й технічних засобів екологічного спостереження на більш високому рівні – інформаційному. При побудові системи автоматизованого управління екологічним моніторингом пропонується комплексний підхід, що передбачає оцінювання інформаційного навантаження на оператора дистанційно пілотованого літального апарата при формуванні управління. Для оцінювання інформаційної напруженості функціонування оператора при синергетичному синтезі автоматизованих систем управління екологічним моніторингом адекватним показником є навантаження системи масового обслуговування, що включає оператора й автоматичні пристрої елементів системою екологічного моніторингу. На інформаційному рівні взаємодії оператора й автоматичних систем екологічного моніторингу доцільно розглядати моделі у вигляді систем масового обслуговування. Застосування цього виду моделей дасть змогу виявити основні інформаційно-структурні закономірності взаємодії оператора й автоматичних систем при реалізації синергетичної схеми формування управління екологічним моніторингом із застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів. При реалізації синергетичної схеми формування управління пропонується поділ функцій, за якого людина забезпечує рух літальних апаратів екологічного спостереження, а автоматика реалізує всі функції руху елементів комплексу всередині цього макрооб'єкта та управління роботою апаратури екологічного спостереження. Визначено, що перспективним напрямом використання результатів дослідження є включення оператора дистанційно пілотованого літального апарата екологічного спостереження в контур контролю за роботою апаратури спостереження з метою корекції управлінських рішень в умовах нештатних аварійних ситуацій. *Ключові слова:* автоматизована система, дистанційно пілотований літальний апарат, екологічне спостереження, екологічний моніторинг, екологічне спостереження, ергатичний процес, людина-оператор, психофізіологічна напруженість оператора, розподілу функцій управління, система масового обслуговування.

Technology of construction of automated ecological monitoring system using remotely piloted aircraft. Bondar O., Mashkov O., Mikheev V., Zhukauskas S., Nigrodova S.

Scientific researches are devoted to substantiation of technology of construction of the automated system of ecological monitoring with use of remotely piloted aircrafts. It is determined that the synthesis of automated control systems of environmental monitoring system is impossible with the application of existing methods of distribution of control functions between the operator and automatic devices, coordination of psychophysiological characteristics of the operator and automatic devices, assessment of psychophysiological stress of the operator. It is proposed to take into account the processes of interaction between the operator and technical means of environmental monitoring at a higher level – information. When building an automated control system for environmental monitoring, a comprehensive approach is proposed, which involves assessing the information load on the operator of a remotely piloted aircraft in the formation of management. To assess the information intensity of the operator in the synergistic synthesis of automated control systems for environmental monitoring, an adequate indicator is the load of the queuing system, which includes the operator and automatic devices of the elements of the environmental monitoring system. At the information level of interaction between the operator and automatic environmental monitoring systems, it is advisable to consider models in the form of queuing systems. The use of this type of models will reveal the basic information and structural patterns of interaction between the operator and automatic systems in the implementation of a synergetic scheme for the formation of environmental monitoring management using remotely piloted aircraft. When implementing a synergetic scheme of control formation, a division of functions is proposed, in which a person sets the motion of environmental observation aircraft, and automation implements all the functions of the complex elements

within a given macroobject and control the operation of environmental monitoring equipment. It is determined that a promising area of use of the research results is the inclusion of the operator of a remotely piloted environmental surveillance aircraft in the control circuit of the surveillance equipment in order to correct management decisions in emergency situations. *Key words*: automated system, remotely piloted aircraft, ecological observation, ecological monitoring, ecological observation, ergatic process, human operator, psychophysiological tension of the operator, distribution of control functions, queuing system.

Постановка проблеми. Процеси глобалізації та суспільних трансформацій підвищили пріоритетність проблем збереження довкілля, які потребують ужиття в Україні термінових заходів щодо їх розв'язання. Протягом тривалого часу економічний розвиток держави супроводжувався незбалансованою експлуатацією природних ресурсів, низьким рівнем захисту довкілля, що унеможливило досягнення збалансованого (сталого) розвитку [1].

Одним із механізмів оптимізації природого-сподарювання під час переходу до стійкого розвитку екосотіотехнополісної системи є створення єдиної загальнодержавної системи моніторингу навколишнього природного середовища як складника світової інформаційної екологічної системи. Загальнодержавна система моніторингу має будуватися з урахуванням особливостей регіональних екосистем, з опрацюванням підходів до створення регіональних систем моніторингу на територіях з надмірним техногенним навантаженням. Вирішення цього актуального науково-практичного завдання спрямоване на підвищення ефективності оцінювання екологічних загроз і ризиків у регіонах. Для цього пропонується комплексне застосування аерокосмічних технологій та експертних оцінок, а також використання дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного спостереження (ДПЛА) [2]. Їх застосування між людиною-оператором і дистанційно пілотованими літальними апаратами й визначення рівня «проникнення» автоматичних пристроїв або систем у процес управління об'єктом людиною. При цьому єдиного підходу до розгляду такого синтезу автоматизованих систем поки що не вироблено [3–5].

Актуальність дослідження. Включення автоматичних систем у контур ергатичного управління вимагає розмежування та узгодження функцій автоматичного й «людського» складників загальної системи управління. Від адекватності розподілу функцій управління між людиною й суміжними автоматичними пристроями істотно залежить ефективність загальної системи управління, її функціональні можливості, стійкість, точність реалізації управління й достовірність екологічної інформації. Цей важливий напрям побудови людино-машинних систем управління відзначався багатьма дослідниками [6; 7], які вивчали закономірності розподілу функцій управління між оператором та автоматичними пристроями в керуванні природними ресурсами. Аналіз результатів таких досліджень показав, що загальною особливістю розуміння методологічної сутності поділу функцій управління між людиною й техніч-

ними пристроями є варіант поділу функцій управління в процесі управління об'єктом людиною. Але єдиного підходу до розгляду такого синтезу автоматизованих систем поки що не вироблено [3; 5].

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Наукові дослідження авторів спрямовані на розв'язання важливих наукових і практичних завдань відповідно до Основних засад (стратегії) державної екологічної політики України на період до 2030 року. Одним із інструментів реалізації екологічної політики є моніторинг довкілля та природоохоронний контроль. Системне вирішення завдань щодо розподілу функцій управління між оператором (операторами) та автоматичними пристроями при реалізації синергетичної схеми управління екологічним моніторингом спрямоване на підвищення ефективності моніторингу стану довкілля, зменшення ризиків планової діяльності та сприятиме запобіганню негативного впливу на довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій засвідчує, що деякі автори під рівнем поділу функцій управління в людино-машинних системах розуміють кількісну міру як відношення кількості контурів управління, замкнених оператором (льотчиком, екіпажем) до загальної кількості контурів управління об'єктом [6; 7]. При цьому підходи до виділення контурів для отримання конкретних кількісних характеристик рівня поділу функцій управління можуть бути різними.

Наприклад, В.В. Козарук [6; 7] запропонував характеризувати поділ функцій управління числом в діапазоні $[0, \dots, 1]$:

$$y_a = 1 - \zeta(t), \quad (1)$$

де $\zeta(t)$ – завантаженість членів екіпажу (операторів), яка визначається відношенням часу, необхідного для формування управління, до загального часу руху керованого об'єкта.

В.Г. Денисов, А.А. Терешкин, В.І. Христюк [8; 9] використовували для кількісної характеристики ступеня автоматизації функціонування льотчиків методику, яка базується на розгляді відносин «заходи – труднощі в управлінні» контурами, у яких бере участь автоматика, до загальної «міри труднощів» усіх контурів досліджуваного літака.

Найбільш повно й глибоко психологічний аналіз особливостей операторської діяльності представлений у фундаментальних роботах Б.Ф. Ломова, В.Ф. Венді; Е.А. Мілеряна; В.П. Зінченко; В.А. Пономаренко й Н.Д. Завалова; Ю.Г. Фокіна; В.А. Таран та інших [6–8; 10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Дослідники по-різному підходять до вирішення завдань синтезу людино-машинних систем. Існують варіанти вирішення їх за рахунок розробки адекватних моделей поведінки людини-оператора й використання їх замість людини для забезпечення необхідної якості управління (техноцентричний підхід). Інші вчені (антропоцентричний підхід) пропонують шукати рішення за рахунок розширення фізіологічних можливостей людини-оператора з управління в умовах невизначеності, протидії, неповної й суперечливої інформації від засобів автоматки. Ці підходи пояснюються різною точкою зору на ідеологію побудови та функціонування людино-машинних систем, мають право на існування. У статті розглядається антропоцентричний підхід до синтезу систем керування літальними апаратами екологічного моніторингу [6–8].

Результати проведених досліджень свідчать, що синтез систем автоматизованого управління системою екологічного моніторингу (у рамках синергетичної схеми формування управління) неможливий при застосуванні наявних методів розподілу функцій управління між оператором та автоматичними пристроями, узгодження психофізіологічних характеристик оператора й автоматичних пристроїв, оцінювання психофізіологічної напруженості оператора. Тому авторами запропоновано враховувати процеси взаємодії оператора й технічних засобів екологічного спостереження на більш високому рівні – інформаційному.

Новизна підходу полягає в тому, що запропонована технологія побудови автоматизованої системи синергетичного управління системою екологічного моніторингу автоматизованої системи екологічного моніторингу за гомеостазисним критерієм передбачає використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Оцінювання ефективності діяльності людини в конкретній системі є завершальною процедурою, за результатами якої вдосконалюються її експлуатаційні та інші характеристики, підвищується якість функціонування в різних умовах, що досягається за рахунок повного й своєчасного аналізу роботи людини в системі «людина-машина», виявлення тенденцій зміни якості функціонування системи в разі появи різного роду несприятливих умов і факторів зовнішнього середовища. Достовірність результатів такого аналізу істотно залежить від обґрунтованого вибору критеріїв оцінювання ефективності одиночної та групової діяльності людей, а також ефективності окремих видів діяльності людини при вирішенні комплексних завдань управління й контролю.

Виклад основного матеріалу. Постійне вдосконалення апаратури для виконання екологічного моніторингу та необхідність формування траекто-

рії просторового руху техніки в реальних умовах може призвести до збільшення кількості помилок, що допускаються льотчиком у процесі екологічного моніторингу [11–13]. Ці факти дають змогу зробити висновок, що методи, які традиційно використовувалися для оцінювання рівня навантаження на оператора, не є адекватними при розгляді процесів його функціонування на інформаційному рівні взаємодії оператора з технічними пристроями екологічного спостереження. Це зумовлює необхідність пошуку нових, адекватних методів оцінювання психофізіологічного навантаження на людину-оператора.

З позицій системного аналізу функцій людини й автоматки «розподіл функцій управління між людиною й технічними підсистемами» можна охарактеризувати етапом, де ще застосовується автоматка. Це означає, що система автоматизованого управління, у якій автоматичні підсистеми реалізують функції визначення об'єкта для досягнення поставленої оператором мети, є більш досконаліми, ніж система управління, де автоматка застосовується тільки для відпрацювання завдань стабілізації на заданій програмній траєкторії руху об'єкта.

Проведений аналіз показав, що найбільш поширеними методами математичної формалізації операторської діяльності є застосування теорії інформації; теорії алгоритмів; теорії графів і мереж; евристичного програмування та ситуаційного управління; теорії масового обслуговування; загальної теорії систем і нечітких множин [3; 5]. Кожен із таких методів має специфічні переваги й недоліки, а їх використання визначається колом завдань екологічного моніторингу, де необхідно формалізувати діяльність оператора, і рівнем вимог до вирішення завдань екологічного моніторингу.

Систему автоматизованого управління елементами системи екологічного моніторингу можна уявити як систему масового обслуговування, у якій обслуговуючим елементом є оператор, а потік заявок – це запити на зміну алгоритмів автономного управління кожного із сукупності елементів екологічного спостереження. На обробку кожного запиту на екологічний моніторинг потрібен певний час, що в загальному випадку може бути охарактеризоване деяким математичним очікуванням і дисперсією (перший і другий випадки). Крім часу обробки, потік заявок – запитів на зміну управління загалом є випадковими.

Необхідно відзначити, що застосування моделей у вигляді систем масового обслуговування для дослідження людино-машинних систем не є новим. Такий вид моделей багаторазово (і досить успішно) застосовувався дослідниками в галузі технічної кібернетики. Але використання можливостей цього математичного інструмента дослідження людино-машинних систем для обліку психофізіологічних факторів при реалізації нелінійних синергетичних закономірностей руху літальних апаратів екологіч-

ного спостереження в умовах екологічних загроз, ризиків, аварій, катастроф (на думку авторів) є елементом наукової новизни.

Розв'язання проблеми синтезу автоматизованих систем управління екологічним моніторингом можна розглядати як знаходження компромісу між особливостями кожного з джерел управління. Сутність вирішення проблеми полягає в пошуку компромісу між методами автоматичного управління й управління операторами, коли можна буде об'єднати можливості кожного з двох джерел управління, щоб зробити систему управління більш ефективною. Системи автоматичного управління реалізують жорстке програмне управління, дають широкі можливості управління динамікою об'єктів управління, а людина, навпаки, має можливість реалізувати «гнучке» управління, але при цьому має обмежені динамічними можливостями реалізації управління. Принциповим допущенням, яке необхідно для проведення дослідження людино-машинної системи екологічного моніторингу методами масового обслуговування, є умова «марковості»: для будь-якого моменту часу ймовірнісні характеристики процесу в майбутньому повинні залежати тільки від його стану на цей момент і не залежати від того, коли і як система опинилася в цьому стані [3; 5].

У теорії ймовірностей визначається, що умова стаціонарного пуассонівського потоку подій еквівалентна виявленню в нього трьох властивостей: стаціонарності, ординарності й відсутності післядії [3; 5]. Порівняння обставин та умов роботи оператора системи екологічного моніторингу з обставинами та умовами роботи льотчиків розвідувальної авіації дає змогу зробити висновок, що потоки подій під час проведення екологічного моніторингу мають властивості ординарності, відсутності післядії і стаціонарності. Отже, доцільно прийняти допущення, що потоки запитів на зміну установок управління елементами системи екологічного моніторингу представляються у вигляді стаціонарного пуассонівського потоку подій з ймовірністю надходження k -запитів у проміжку часу T [3; 5]:

$$P(k, T) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}, \quad (2)$$

де λ – інтенсивність потоку запитів на здійснення екологічного спостереження.

Отже, для умов функціонування оператора автоматизованої системи управління системою екологічного моніторингу можна коректно прийняти припущення щодо існування стаціонарного пуассонівського потоку подій та уявити функціонування оператора у вигляді системи масового обслуговування.

При надходженні заявок на зміну установок управління від елементів системи екологічного моніторингу оператор здійснює попередню обробку й відбір (сортування) інформації. Насамперед він реагує на запити, що надходять від найбільш кри-

тичних у поточний час обставин (екологічні загрози й ризики, можливість техногенних аварій), які обслуговуються терміново. Отже, в конкретних умовах може існувати черга заявок та існує певна система пріоритетів їх обслуговування. При цьому середній час перебування заявки в системі $W_{сис}$ дорівнює відношенню середнього числа заявок $L_{сис}$ до інтенсивності потоку заявок λ :

$$W_{сис} = \frac{1}{\lambda} \cdot L_{сис}. \quad (3)$$

Показник інформаційної завантаженості оператора може кількісно характеризувати ступінь напруженості функціонування оператора при реалізації управління елементами системи екологічного моніторингу. Фізичний стан цього показника полягає в тому, що він характеризує середню кількість заявок, що надходять за середній час обслуговування однієї заявки.

Застосування моделей у вигляді систем масового обслуговування залежить від умов отримання інформаційного узгодження апаратури екологічного спостереження й оператора (операторів) в автоматизованих системах управління системою екологічного моніторингу:

$$\rho(x, u, t) < 1. \quad (4)$$

Зміст цієї умови полягає в тому, що значення показника напруженості функціонування оператора, рівне нулю $\rho(x, u, t) = 0$, відповідатиме розіркненим щодо оператора контуру управління: він не бере ніякої участі у формуванні керування літальним апаратом екологічного спостереження (спостереження здійснюється автоматично за програмою) і тому немає навантаження. Значення показника більше одиниці $\rho(x, u, t) > 1$ відповідає умовам, коли середнє число заявок на здійснення екологічного моніторингу заданих об'єктів виявляється більшим, ніж кількість заявок, яке може обслужити оператор за цей час. У цьому разі оператор працює за межею своїх можливостей, тобто неефективно. Випадок $\rho(x, u, t) = 1$ є прикордонним: оператор працює на кордоні можливостей.

Проведений аналіз показав, що застосування логіко-математичного опису функціонування оператора систем автоматизованого управління елементами системи екологічного моніторингу у вигляді систем масового обслуговування дає змогу визначити можливі системотехнічні напрями зменшення психофізіологічної навантаження на оператора при реалізації синергетичної схеми формування управління системою екологічного моніторингу.

Практика показала, що вдосконалення технічних пристроїв екологічного спостереження, з якими взаємодіє оператор при здійсненні екологічного моніторингу, є несистемним підходом до вирішення виникаючих проблем формування управління системою екологічного моніторингу [10–12].

Поява багатофункціональних індикаторів (рис. 1) як нового технологічного засобу побудови систем відображення інформації приймалося багатьма дослідниками як революційний прорив у галузі побудови високоефективних автоматизованих систем управління складними динамічними об'єктами.

Незважаючи на отримані позитивні результати подібного підходу до вирішення проблеми синтезу адекватних систем автоматизованого управління (ергачних систем управління) (рис. 2), проведені дослідження чітко показали характерні обмеження цього підходу [13; 14].

Традиційний показник операційної напруженості функціонування людини є невизначеним, так як кількість інформації, що «переробляє» оператор в оди-



Рис. 1. Формування інтерфейсу оператора із застосуванням багатофункціональних індикаторів

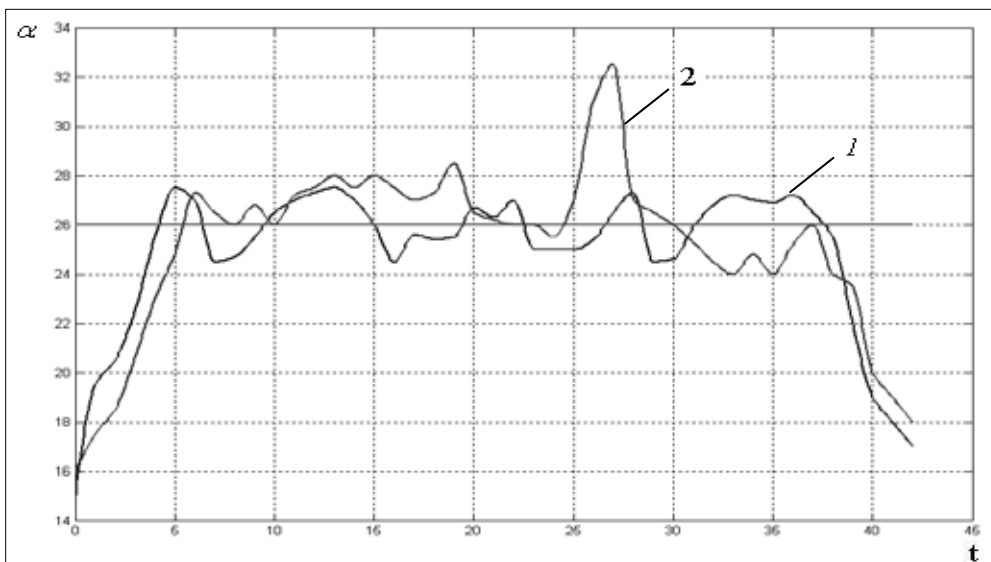


Рис. 2. Відхилення кута атаки від допустимого значення при використанні багатофункціональних індикаторів як засобів відображення інформації (1) і без їх використання (2)

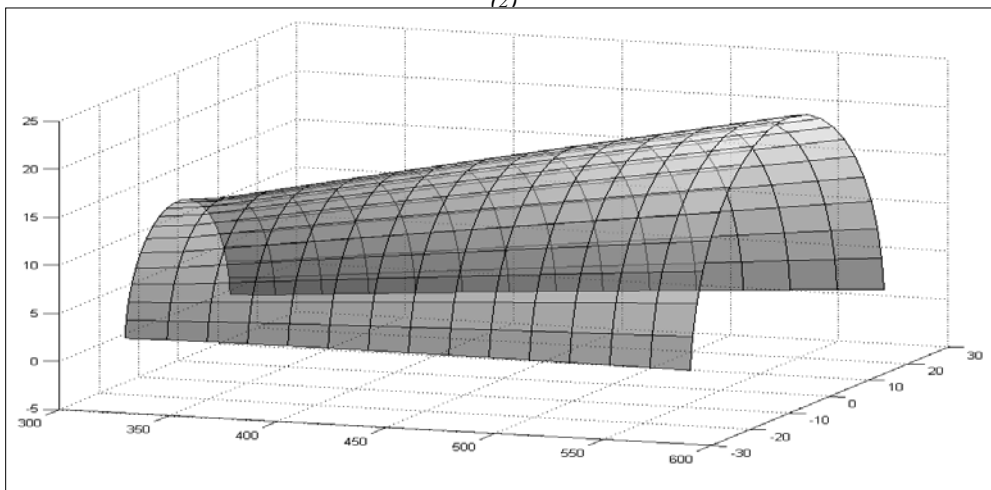


Рис. 3. Характеристична поверхня $(V, \theta, \psi) = f(\alpha, \gamma)$

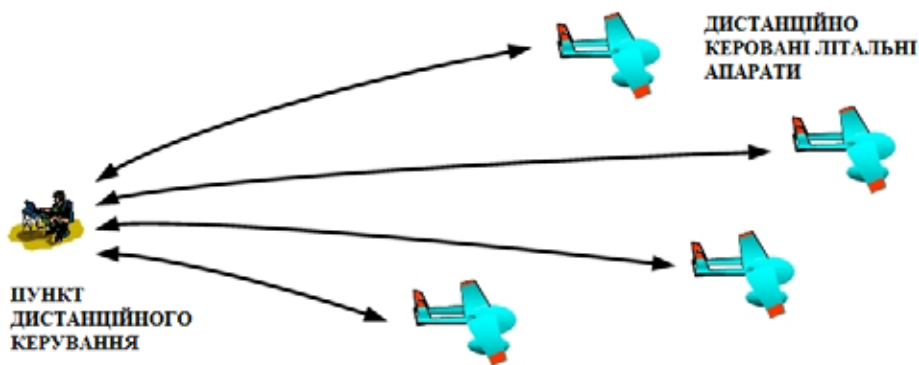


Рис. 4. Традиційна схема керування групою літальних апаратів

ницю часу, неможливо визначити, тому що оператор виключений із контуру управління об'єктом у силу своїх психофізіологічних обмежень.

Подолати цю невідповідність можна перекладом фазових координат об'єкта управління (систему екологічного моніторингу) у новий базис $\{X, Y, Z\}$ для забезпечення інформаційного узгодження оператора й об'єкта управління за допомогою перетворення:

$$X = X(u, \vartheta); \quad Y = Y(u, \vartheta); \quad Z = Z(u, \vartheta), \quad (5)$$

де X, Y, Z – значення відповідних осей координат, u, ϑ – криволінійні координати.

Уявлення точки руху об'єкта управління у фазовому просторі у вигляді зміни виду характеристичних поверхонь у просторі u, ϑ (рис. 3) дає змогу узгодити людину й технічні пристрої системи управління лише у відносно невеликому діапазоні умов, що явно недостатньо для реалізації управління системою екологічного моніторингу.

Отже, удосконалення технічної частини системи автоматизованого управління системою екологічного моніторингу без зміни самого принципу формування управління є несистемним шляхом вирішення проблематики побудови систем управління екологічним моніторингом.

Системне рішення полягатиме в реалізації нових підходів до формування управління об'єктом, щоб максимально узгодити потреби оператора з можливостями системи управління екологічним моніторингом. Для цього пропонується змінити системотехнічний принцип реалізації управління елементами системи екологічного моніторингу.

Традиційний підхід передбачає використання схеми управління, за якою кожним окремим об'єктом (елементом моніторингового комплексу) керує оператор у рамках окремого замкненого контуру управління (рис. 4).

Такий принцип реалізації управління здійснено в системі дистанційного керування наявних літальних апаратів. Аналогічні технічні рішення реалізовані в системі управління космічними кораблями й підводними човнами [15–17]. Однак якщо інформаційний потік від об'єктів управління (моніторинг у разі виникнення техногенних та екологічних аварій, катастроф) буде перевищувати фізіологічні можливості переробки його оператором ($\rho(x, u, t) > 1$), то це системотехнічне рішення буде неприйнятним.

Схемотехнічними рішеннями можна забезпечити зниження психофізіологічної напруженості функціонування оператора при управлінні системою еко-

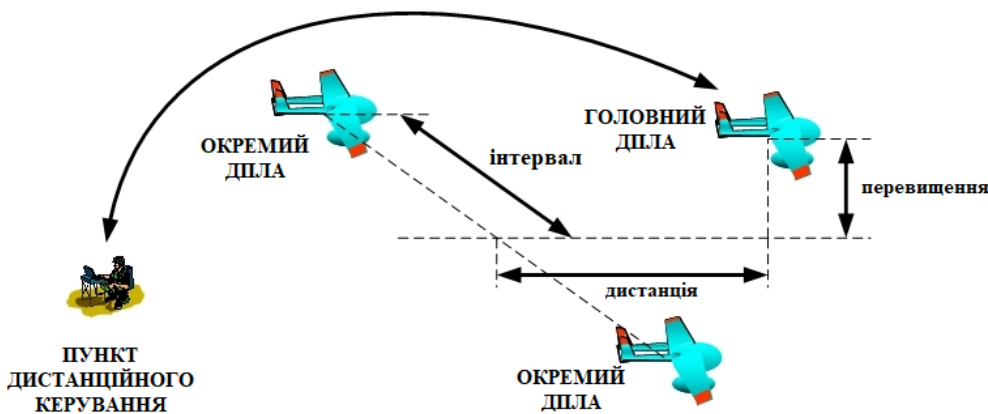


Рис. 5. Схема витримування групового режиму польоту літальних апаратів

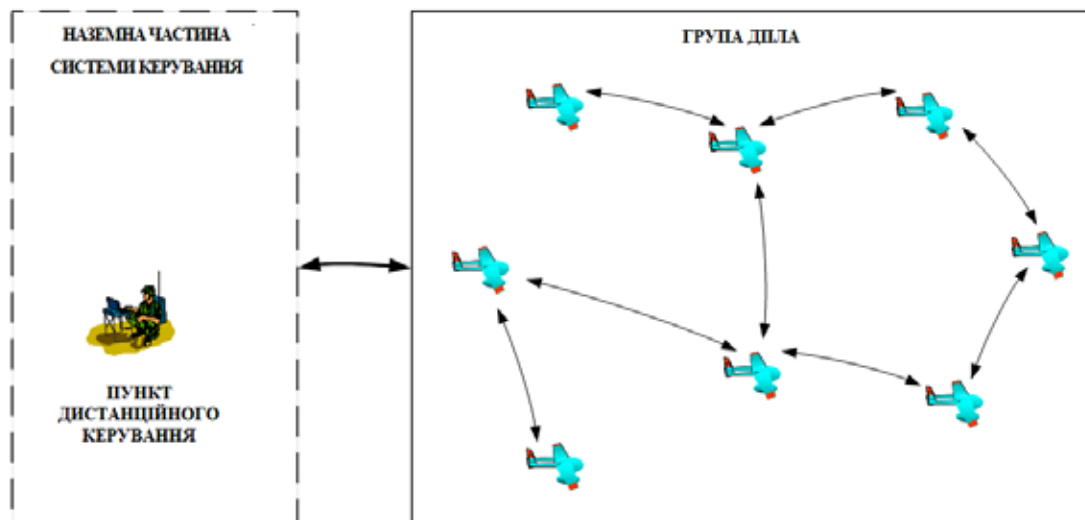


Рис. 6. Схема витримування групового режиму польоту ДПЛА екологічного моніторингу

логічного моніторингу в умовах екологічних загроз і ризиків у рамках двох напрямів.

Перший напрям полягає в реалізації схеми розподілу функцій управління між людиною й технічними пристроями, за якої оператор здійснює управління просторовими порядками елементів системи екологічного моніторингу, а автоматика реалізує всі функції для стабілізації становища елементів у заданому просторовому порядку (рис. 5).

Інформаційна напруженість функціонування оператора (операторів) у цьому випадку характеризується залежністю:

$$\rho^{en}(x, u, t) = \sum_{j=1}^M \left(\frac{\tau_j(u, t)}{N_j} \cdot \sum_{i=1}^M \lambda_{ij}(x, t) \right), \quad (6)$$

де M – кількість груп елементів системи екологічного моніторингу з однаковими функціональними властивостями (наприклад, групи візуального, спектрального, теплового спостереження); N_j – кількість елементів у j -ої групі ($\sum_{j=1}^M N_j = N$); $\lambda_{ij}(x, t)$ – інтенсивності потоків запитів на заміну установок управління від кожного i -ого елемента системи екологічного моніторингу j -ої групи; $\tau_{ij}(u, t)$ – середній час обслуговування оператором запиту i -ого елемента системи екологічного моніторингу j -ої групи.

Другий напрям полягає в реалізації схеми розподілу функцій управління й узгодження характеристик людини й технічних пристроїв, за якої оператор здійснює управління макрооб'єктами, що включає елементи системи екологічного моніторингу, а автоматика реалізує всі функції управління елементами цього макрооб'єкта (у тому числі управління роботою апаратури екологічного спостереження (рис. 6)). Тому завдання автоматизації управління об'єктами виду «макросистема» можна формалізувати так. Припустимо, що замкнений контур управління описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F(X, U, a, \xi, t) \\ Y(t) = H(X, \eta, t) \\ U_o(t) = g_o(Y, t) \\ U(t) = f(X, Y, U_o, t) \end{cases}, \quad (7)$$

де $\tilde{O}(t)$ – n -мірний вектор стану системи; $U(t)$ – m -мірний вектор управління макросистемою; $Y(t)$ – l -мірний вектор вимірювань; $U_o(t)$ – m_o -мірний вектор управління оператора, $m > m_o$, $n > m_o$; $F(\dots)$ – багатовимірна нелінійна функція, що описує динамічні властивості макросистеми; $H(\dots)$ – нелінійна функція, що описує властивості інформаційно-вимірювальної підсистеми; $g_o(\dots)$ – нелінійна функція, що описує інформаційний інтерфейс оператора; $f(\dots)$ – власне алгоритм формування управління підсистемами, складовими макросистему; a – відомі параметри макросистеми.

Розглядаються умови конфлікту, де метою функціонування є досягнення максимального значення деякої функції виграшу (повнота й достовірність отриманої екологічної інформації):

$$U : \max C(X, U, t), \quad (8)$$

при виконанні обмежень $X \in \Omega_x, U \in \Omega_u, t \in [t_0, \dots, t_k]$.

Невизначеність полягає в тому, що апріорно невідома інформація про об'єкт спостереження (інформація про вектор стану об'єктів екологічного спостереження $X'(t)$), або функція зміни стану об'єктів екологічного спостереження $F'(X, U, a, \xi, t)$. Крім того, наявні обурення стану – $\zeta(t)$ – випадковий вектор гаусівських збурень стану системи з нульовим вектором середніх і кореляційною матрицею $Q(t)$:

$$\xi(t) \in \Omega_\xi : M[\xi(t)] = 0; M[\xi(t) \cdot \xi^T(t')] = Q(t)\delta(t - t')$$

і перешкоди вимірювання – $\eta(t)$ – випадковий l -мірний вектор гаусівських перешкод вимірів з нульовим вектором середніх і кореляційною матрицею $R(t)$:

$$\eta(t) \in \Omega_{\xi} : M[\eta(t)] = 0; M[\eta(t) \cdot \eta^T(t')] = R(t)\delta(t-t').$$

У цих умовах необхідно синтезувати систему управління екологічним моніторингом (визначити алгоритм функціонування інформаційного інтерфейсу оператора g_o та алгоритм управління підсистемами f):

$$g_o, f : \max C(X, U, t), \quad (9)$$

які б забезпечували значення функції виграшу не менше заданої $C(X, U, t) \geq C^*$ з урахуванням стохастичного обмеження:

$$P(C(X, U, t) \geq C^*) \geq P^*. \quad (10)$$

Це обмеження визначає якість синтезованого управління – забезпечення ймовірності одержання заданого виграшу не менше заданої (P^* і C^* є константами).

З погляду класичної теорії автоматичного управління це завдання має рішення тільки в тому випадку, коли виконуються умови повної керованості й спостережливості. Складність перевірки навіть достатніх умов керованості по відомих рангових критеріях [3; 5] вимагає розгляду інших умов. Однак наявність алгоритмів управління в кожній з підсистем, складників макросистеми гарантує повну спостережливість і керованість такого об'єкта управління, відповідно принципу можливість вирішення. Інформаційна напруженість функціонування оператора (операторів) у разі управління групою літальних апаратів екологічного спостереження представляється залежністю:

$$\rho^{mo}(x, u, t) = \tau^{mo}(u, t) \cdot \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \lambda_{ij}(x, t)}{N}, \quad (11)$$

$$\text{де } \tau^{mo}(u, t) \in \left[\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \tau_{ij}}{N}, \max(\tau_{ij}) \right]$$

– середній час обслуговування оператором запитів на зміну завдань екологічного моніторингу (управління макрооб'єктами – системою екологічного моніторингу).

Реалізація управління макрооб'єктами потребує задання оператором двох параметрів: $x^*(t)$ – прогнозоване положення об'єктів дослідження та $\tilde{u}(t)$ – стратегії дій (включення апаратури спостереження), що враховує передбачувану стратегію розвитку екологічних аварій і катастроф $\hat{u}'(t)$.

Отже, розподіл функцій управління системою екологічного моніторингу, коли оператор управляє елементами комплексу як єдиним макрооб'єктом, а автоматичні системи здійснюють узгодження руху елементів комплексу (окремі літальні апарати й апаратура екологічного спостереження) у складі всієї системи (макрооб'єктами), відповідає вирішенню

завдання послідовної процедури оптимізації автоматизованої системи управління системою екологічного моніторингу із застосуванням ДПЛА.

Головні висновки. Синтез систем автоматизованого управління системою екологічного моніторингу (у рамках синергетичної схеми формування управління) неможливий при застосуванні наявних методів розподілу функцій управління між оператором та автоматичними пристроями, узгодження психофізіологічних характеристик оператора й автоматичних пристроїв, оцінювання психофізіологічної напруженості оператора. Запропоновано враховувати процеси взаємодії оператора й технічних засобів екологічного спостереження на більш високому рівні – інформаційному.

Для оцінювання напруженості функціонування оператора систем автоматизованого управління системою екологічного моніторингу, що реалізує синергетичну схему формування управління ДПЛА, адекватним є комплексний підхід до оцінювання, що передбачає розгляд показників з характеристикою інформаційного навантаження на оператора при формуванні управління.

Для оцінювання інформаційної напруженості функціонування оператора при синергетичному синтезі автоматизованих систем управління екологічним моніторингом адекватним показником є навантаження системи масового обслуговування, що включає оператора й автоматичні пристрої елементів у системі екологічного моніторингу.

На інформаційному рівні взаємодії оператора й автоматичних систем екологічного моніторингу адекватною математичною моделлю дослідження процесів управління є модель у вигляді систем масового обслуговування. Застосування цього виду моделі дасть змогу виявити основні інформаційно-структурні закономірності взаємодії оператора й автоматичних систем при реалізації синергетичної схеми формування управління екологічним моніторингом із застосуванням ДПЛА.

Мінімальне значення гомеостазисного критерію оптимізації систем автоматизованого управління системою екологічного моніторингу при реалізації синергетичної схеми формування управління відповідає поділу функцій між оператором (операторами), за якого людина визначає рух макрооб'єктів (група літальних апаратів екологічного спостереження), а автоматика реалізує всі функції руху елементів комплексу всередині цього макрооб'єкта й управління роботою апаратури екологічного спостереження.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним напрямом використання результатів дослідження є включення оператора ДПЛА в контур контролю роботи апаратури спостереження з метою корекції управлінських рішень.

Література

1. Машков О.А., Мамчур Ю.В., Жукаускас С.В. Загрози у сфері екологічної безпеки та їх вплив на стан національної безпеки. *Науковий часопис Академії національної безпеки*. 2018. № 2 (18). С. 8–28.
2. Машков О.А., Кононов О.А., Самборський І.І. Проблематика совершенствования способов совместного применения беспилотных авиационных комплексов. *Арсенал*. Київ, 2007. С. 23–28.
3. Теорія автоматичного керування / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, М.С. Сівов. Львів : УАД, 2004. 272 с.
4. Машков О.А., Кононов О.А., Самборський І.І. Особливості організації синергетичного управління процесом застосування перспективних безпілотних авіаційних систем. *Труди академії*. Київ : НАОУ, 2008. № 2 (82). С. 65–74.
5. Теоретичні основи технічної кібернетики / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, О.А. Плащенко. Львів : Українська академія друкарства, 2004. 120 с.
6. Павлов В.В. Основы теории эргатических систем. Київ : Вища школа, 1979. 230 с.
7. Шеридан Т.Б., Феррелл У.Р. Системы человек-машина / пер. с англ. под ред. Н.В. Фролова. Москва : Машиностроение, 1981. 400 с.
8. Сложные технические и эргатические системы / А.Н. Воронин, Ю.К. Зиятдинов, А.В. Харченко, В.В. Осташевский. Харьков : Факт, 1997. 240 с.
9. Машков О.А., Кононов О.А., Пастушенко В.П. Методи забезпечення функціональної стійкості авіаційних ергатичних систем. *Стан та шляхи вдосконалення технічної експлуатації, капітального ремонту, розробки та модернізації авіаційної техніки Збройних Сил України* : збірник тез доповідей та виступів науково-практичної конференції, 22–23 вересня 2005 р. Київ : ДНДІА, 2005. С. 45.
10. Korobchynskiy M., Mashkov O. Construction method of optimal control system of a group of unmanned aerial vehicles. *Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska*. Lublin : Centrum Innowacji i Transferu Technologii Lubelskiego Parku Naukowo-Technologicznego, 2014. № 1. P. 41–43.
11. Korobchynskiy M., Mashkov O. Design of dynamic structural models of information management system of owing objects. *Informatyka Automatyka Pomiar w Gospodarce I Ochronie Środowiska / Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection*. 2013. № 4. P. 78–80.
12. Korobchynskiy M., Mashkov O. Design of dynamic structural models of information management system of moving objects. *Informatyka, automatyka, pomiary w gospodarce i ochronie środowiska*. Lublin : Centrum Innowacji i Transferu Technologii Lubelskiego Parku Naukowo-Technologicznego, 2013. № 4. P. 78–80.
13. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Обоснование синергетической схемы управления группой дистанционно пилотируемые летательными аппаратами. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту* : матеріали Міжнародної наукової конференції. Херсон : Вид. ХНТУ, 2018. С. 181–190.
14. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Проблеми розвитку державної системи моніторингу навколишнього природного середовища з використанням аерокосмічних та геоінформаційних технологій. *Сучасні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу* : матеріали доповідей науково-практичного семінару, м. Київ, 27 листопада 2017 р. Київ : ДЕА, 2017. С. 8–9.
15. Машков О.А., Кононов О.А. Применение теории функционально устойчивых систем для решения задач навигации и управления объектами вида «макросистема». *Системи управління, навігації та зв'язку*. Київ : ЦНДІ навігації та зв'язку, 2007. Вип. № 3. С. 15–19.
16. Машков О.А., Кононов О.А. Аналіз результатів досліджень функціонально-стійких технічних систем. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. Житомир : ЖДТУ, 2006. № 3 (38). С. 93–103.
17. Машков О.А., Жукаускас С.В., Нігородова С.А. Прогнозування надзвичайних ситуацій щодо зменшення екологічних загроз та оцінювання ризиків з використанням аерокосмічних технологій. *Екологічні науки* : науково-практичний журнал. Київ : ДЕА, 2019. № 4 (27). С. 201–206.