

## **СИСТЕМА АДАПТАЦІЇ ДО ЗА КРИТИЧНИХ УМОВ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ**

*Анотація:* в даній статті запропоновано удосконалення системи керування польотом (СКП) безпілотним літальним апаратом (БПЛА). В сучасних умовах вимоги до СКП підвищуються у зв'язку із застосуванням БПЛА в закритичних умовах керування. Удосконалення СКП БПЛА полягає у необхідності надійного і своєчасного забезпечення доставки БПЛА у заданий район.

*Ключові слова:* система керування польотом, пеленг об'єкту, адаптивні команди керування.

### **Вступ**

Останнім часом БПЛА знайшли своє завойовування у різних сферах цивільного життя. Вони почали застосовуватись у картографії (дронкартографія), для захисту дикої природи, в сільському господарстві, «полюванні» на негативні природні явища, рятуванні, у якості «кур'єра», ЗМІ тощо.

Одним із критеріїв оцінки якості застосування БПЛА є точність виведення його на об'єкт. Що забезпечується СКП БПЛА. І в сучасних умовах вимоги до СКП підвищуються у зв'язку із застосуванням БПЛА в закритичних умовах керування.

Тому, актуальність задачі удосконалення СКП БПЛА полягає у необхідності надійного і своєчасного забезпечення доставки БПЛА у заданий район.

### **Постановка задачі**

Вирішення задачі підвищення ефективності застосування БПЛА зводиться до удосконалення СКП, які застосовуються на існуючих БПЛА. Розроблені раніше оптимальні алгоритми функціонування СКП БПЛА достатньо ефективні при виконанні жорстких вимог по точності вимірювання параметрів траєкторії.

Метою роботи є підвищення ефективності застосування БПЛА шляхом забезпечення необхідної точності наведення в закритичних умовах керування (інформаційної невизначеності). Для реалізації поставленої мети в роботі вирішуються наступні наукові задачі:

– розроблена методика ідентифікації вхідної ситуації і виробітки керуючих рішень у системі керування польотом БПЛА із використанням апарата нечіткої математики;

– розроблені алгоритми керування польотом БПЛА, що забезпечують необхідну імовірність забезпечення доставки БПЛА у заданий район (ціль) в умовах обмеженого об'єму інформації про параметри траєкторії на борту БПЛА.

Рішення поставлених задач здійснювалося на основі системного підходу з

використанням аналітичних методів технічної кібернетики, динаміки польоту БПЛА, із використанням математичного апарата операторів, що зрівнюють, теорії математики нечітких множин, теорії чисельних методів моделювання на ЕОМ.

Для одержання кількісних результатів і оцінки ефективності синтезованої СКП БПЛА використовувалася математична модель СКП БПЛА на ПЕОМ.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- удосконалена методика ідентифікації вхідної ситуації і виробітки керуючих рішень у СКП БПЛА із використанням апарата нечіткої математики;
- удосконалено алгоритми керування польотом БПЛА, що забезпечують необхідну імовірність доставки БПЛА у заданий район в умовах обмеженого об'єму інформації про параметри траєкторії на борту БПЛА;
- одержала подальший розвиток методика синтезу алгоритмів керування польотом БПЛА, що дозволяє реалізувати розроблені алгоритми на математичній моделі з оцінкою працездатності й ефективності синтезованої СКП БПЛА.

Практичну значимість роботи представляють:

- алгоритми керування польотом БПЛА в умовах обмеженого об'єму інформації про параметри об'єкту (цілі) на борту БПЛА;
- структурні схеми пристроїв, що реалізують розроблені алгоритми;
- методика дослідження працездатності й ефективності синтезованої СКП БПЛА;
- рекомендації по використанню розроблених алгоритмів керування БПЛА і результати математичного моделювання.

Відзначається, що підвищення ефективності застосування БПЛА в закритичних умовах керування обмежується складністю технічної реалізації отриманих оптимальних алгоритмів керування польотом через відсутність усієї необхідної інформації на борту БПЛА, що, у свою чергу, обумовлено інформаційною невідомістю про об'єкт.

Таким чином, задачею дослідження є підвищення точності наведення БПЛА в умовах обмеженого об'єму інформації.

У якості об'єкта дослідження обрана СКП БПЛА. Характеристика контуру керування польотом, що реалізує метод пропорційного зближення дана в роботі [1].

Керуючись основними принципами системного підходу, за критерій ефективності СКП БПЛА прийнята імовірність доставки БПЛА у заданий район за оптимальною траєкторією. Стосовно до розв'язуваної задачі приріст імовірності  $\Delta P_1$  визначається виразом:

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_{1шт}}{P_{1шт}} * 100\% \quad (1)$$

де  $P_1$  - імовірність доставки БПЛА к заданий район за оптимальною траєкторією

із синтезованою СКП БПЛА; Р1шт- імовірність доставки БПЛА в заданий район з вихідною (штатною) СКП БПЛА.

Отже, цільова функція буде мати вид:

$$i = \max_{th} a1(th), \quad (2)$$

де  $th$  - математичне чекання промаху БПЛА.

Динаміка СКП, з обліком прийнятих допущень, описується наступним рівнянням:

$$\tau y'' + (3 - \tau)y' + (kV/d - 2)y = V\Delta\Theta/D, \quad (3)$$

де  $\tau = D/DT$  - безрозмірний час, що відраховується від моменту доставки БПЛА В заданий район в зворотному напрямку;

$$n = k/D - 2 \quad (4)$$

$y = VL$ ,  $\Delta\Theta/D = \text{const}$  - часткове рішення рівняння (3).

Рівняння (3), коли параметр  $k$  є цілим і позитивним числом, дозволяє одержати рішення в загальному виді:

$$y(\tau) = Y1(\tau, \tau0) \cdot y0 + Y2(\tau, \tau0) + y0 + [1 - Y1(\tau, \tau0)] \cdot \bar{y}, \quad (5)$$

де функції  $Y1(\tau, \tau0)$ ,  $Y2(\tau, \tau0)$  залежать від початкових умов СКП.

На рисунку 1 зображено сімейство кривих перехідних процесів СКП, з якого видно, що якість її функціонування, в значному ступені, залежить від параметрів відносного руху БПЛА і об'єкту (цілі) та зокрема, від часу польоту. З рисунку 1 видно, що система має кращим показники якості при великих значеннях  $\tau0$ . Обравши в якості бажаної одну із сімейства можливих траєкторій, наприклад, із  $\tau01$ , що проходить через точку з координатами  $Y1(\tau, \tau0)ж$ ,  $(\tau/\tau0)ж$ , можна забезпечити рух системи по заданій траєкторії і для довільних значень  $\tau$ . Для цього необхідно здійснити переведення системи в просторі фазових координат у момент часу  $t=(\tau/\tau0)ж$  на дану траєкторію шляхом зміни початкових умов.

Методика синтезу адаптивних алгоритмів керування містить у собі наступні етапи:

- визначення рівняння динаміки об'єкта оптимізації;
- оцінка обмежень, накладених на об'єкт керування;
- визначення руху системи, що задовольняє необхідному критерію якості функціонування системи;
- розрахунок умов, що забезпечують рух системи по обраній траєкторії;
- аналіз отриманих результатів, оцінка їхньої точності і достовірності.

Проведені дослідження синтезованих по запропонованій методиці алгоритмів керування польотом БПЛА показали, що їх використання забезпечує зменшення ділянки наведення на об'єкт (ціль) в порівнянні зі штатною СКП БПЛА, дозволяючи скоротити відхилення від заданого району.

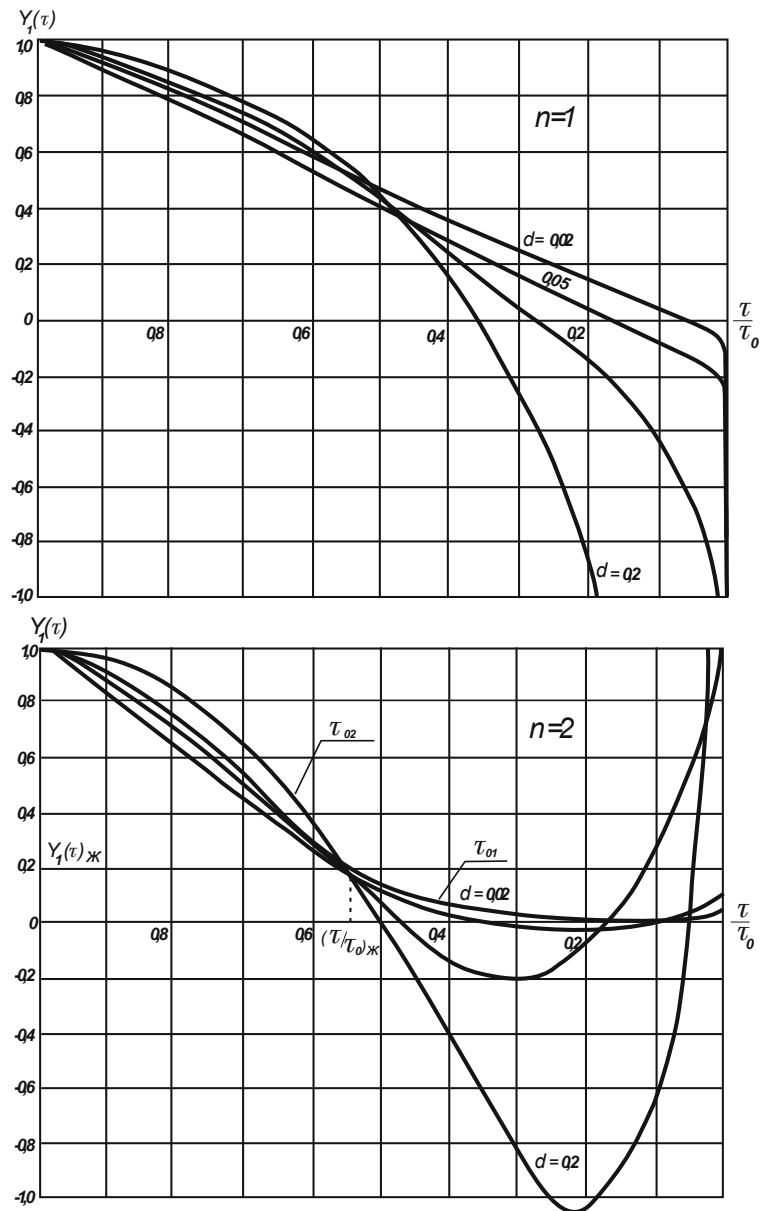


Рис. 1. Перехідні процеси в СКП.

СКП працює в умовах інформаційної невизначеності, а отже, може бути оптимізована з використанням апарату теорії нечітких множин. Зокрема, теорію адаптивних алгоритмів, що реалізуються нечіткими логічними регуляторами і використовують евристичні правила прийняття рішень.

Узагальнена структура СКП з нечітким логічним регулятором та логіка її роботи приведена на рис.2-4, де:

- функцію виробітки керуючих впливів виконує блок виробітки керуючих впливів;
- функцію збору даних від датчиків - блок оцінки станів і функції навчання;
- збереження даних і виробітки керуючих рішень - блок прийняття рішень.

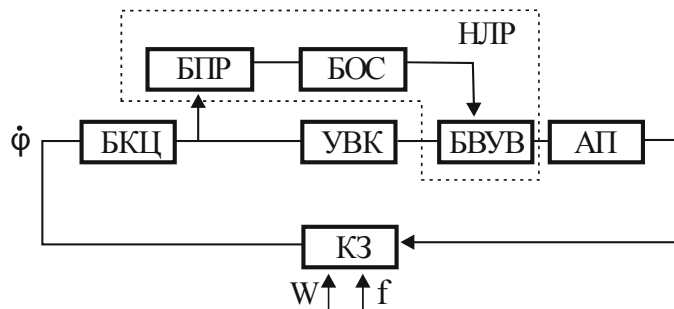


Рис. 2. Структурна схема СКП з нечітким логічним регулятором.

Блок оцінки станів на основі інформації, що надходить на вхід об'єкта регулювання будує формалізований опис виниклої ситуації. Для оцінки семантики нечітких понять використані лінгвістичні перемінні, при цьому кожному нечіткому поняттю ставиться у відповідність нечітка множина по детермінованій функції приналежності.

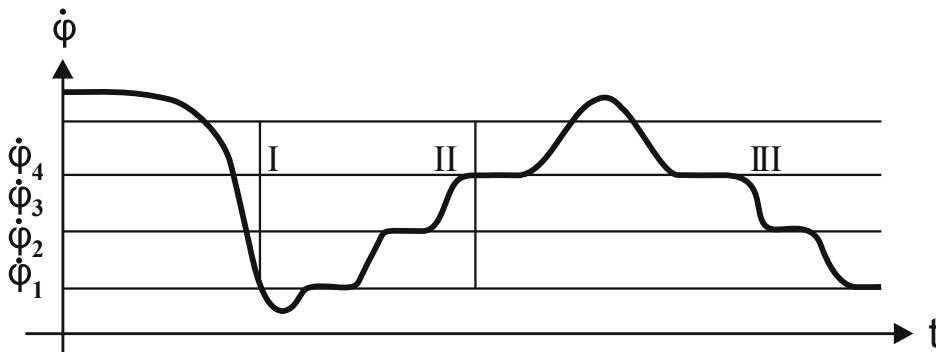


Рис. 3. Алгоритм роботи НЛР

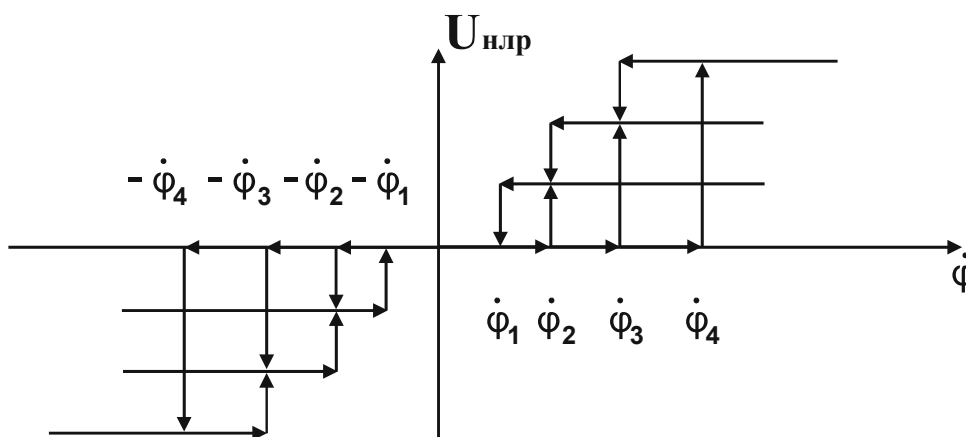


Рис. 4. Логіка роботи БПР

Всі можливі стани об'єкту керування описуються набором типових ситуацій, кожна з яких представляє сукупність лінгвістичних значень ознак. Таким чином, стан об'єкту керування описується набором ознак.

Траєкторія БПЛА прогнозується по обмірюваних значеннях кутової швидкості лінії візування БПЛА - об'єкт, при цьому маневр БПЛА, що фактично є безупинною функцією, розділений на сім рівнів, що обумовлено флуктуаційними помилками вимірів.

У даній системі не дається однозначного висновку по фактичним даним, а вводиться нечіткість, що виражається показником достовірності по кожному рівню за допомогою відповідної функції приналежності.

На рисунку 5 приведена функція приналежності ознаки "Кутова швидкість лінії візування БПЛА - об'єкт, побудована з використанням прямого методу.

При визначенні стану об'єкта керування вхідна нечітка ситуація  $so$  порівнюється з набором типових нечітких ситуацій  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ . У якості міри для визначення ступеня близькості нечіткої ситуації  $\hat{s}_i \in S (i \in K = \{1, 2, \dots, N\})$  використовується ступінь нечіткого вмикання ситуації  $\hat{s}_o$  в нечітку ситуацію  $\hat{s}_i$ .

В основу функціонування блока прийняття рішень нечіткої моделі СКП БПЛА покладений принцип визначення по системі продукцій, необхідних при даній вхідній ситуації керуючих рішень. Продукційна система ставить у відповідність кожній ситуації  $\hat{s}_i$  з типового набору ситуацій  $S$ , що характеризує всі можливі стани об'єкта керування, деяке керуюче рішення  $R_i$ .

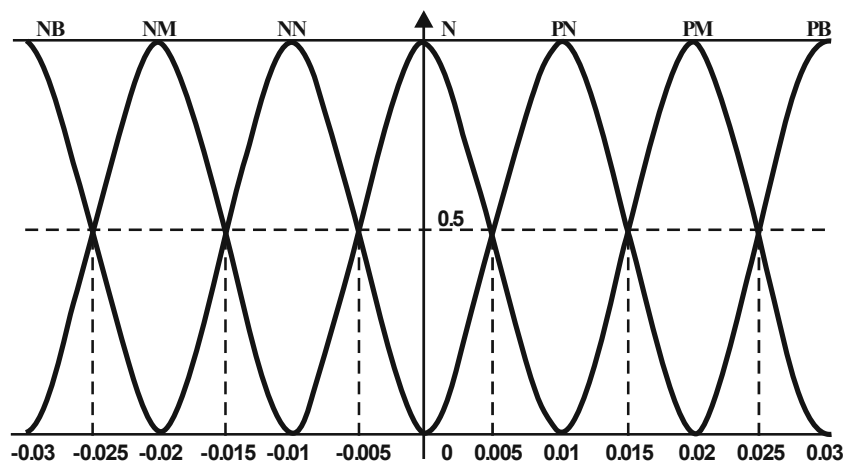


Рис. 5. Функція приналежності

Після визначення продукції, що відповідає поточному стану об'єкта керування, тобто має в якості умови істинності еталонну нечітку ситуацію, визначається нечітка ситуація, у яку переходить об'єкт керування під впливом заданих керуючих рішень. Для цього виконується композиція поточної нечіткої ситуації і нечітких відношень, що описують керуючі рішення в знайденій продукції і реалізованих у БЦОМ БПЛА.

Далі визначається різниця між кількісними значеннями ознак і поточною ситуацією, що і задає необхідні для переходу кількісні зміни значень ознак поточної ситуації.

Нечітка модель алгоритмів керування, що реалізуються у СКП БПЛА має вид:

R1: if/  $\varphi_l=PB$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SPB$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 1$ ;

R2: if/  $\varphi_l=PM$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SPB1$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 5$ ;

R3: if/  $\varphi_l=PN$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SPN1$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 0$ ;

R4: if/  $\varphi_l=N$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SN$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 1$ ;

R5: if/  $\varphi_l=NN$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SNN$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 0$ ;

R6: if/  $\varphi_l=NM1$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SNM1$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 0$ ;

R7: if/  $\varphi_l=NB$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SNB$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 2$ ;

R8: if/  $\varphi_l=PM$ , then (ifF = 0), then  $S_i = SPM2$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 3$ ;

R9: if/  $\varphi_l=PN$ , then (ifF = 1), then  $S_i = SPN2$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 0$ ;

R10: if/  $\varphi_l=NM$ , then (ifF = 3), then  $S_i = SNM2$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 4$ ;

R11: if/  $\varphi_l=NN$ , then (ifF = 2), then  $S_i = SNN2$  and  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  and  $F = 0$ ;

де  $P = f(K_1, K_1, K_1)$  - функція адаптації до умов польоту,  $F$  - ознака стану системи керування.

Для реалізації отриманих продукцій задаються керуючі рішення, відповідно до розробленої в другому розділі роботи методики.

Структурна схема СКП з блоком адаптації до маневру цілі приведена на рис. 6

де  $W_{pt}(p, t)$  - оператор радіотракту датчика (координатора);  $w_{np}(p, t)$  - оператор приводу антени датчика (координатора);  $w_{жыс+ф}(p, t)$  - оператор датчиків кутових швидкостей і фільтрів;  $G$  - оператор автономного виміру власного руху;  $M$  - оператор кінематичної ланки;  $L$  - математична модель процесу зміни швидкості польоту БПЛА;  $E, F, P, S, C$  - оператори бортової цифрової обчислювальної машини (БЦВМ).  $I, K$  - оператори системи автопілот - БПЛА.

Основною метою математичного моделювання була оцінка працездатності синтезованої системи керування та одержання кількісних значень характеристик розподілу показника якості системи керування, що надалі є основою для одержання імовірності наведення на об'єкт.

Деякі результати порівняльної оцінки ефективності вихідної СКП БПЛА і синтезованої на її основі системи керування з адаптивними алгоритмами подані на рисунках 7-13.

На рисунку 7 показані вертикальні і горизонтальні перетини зони виводу в заданий район, отримані для максимальної швидкості БПЛА по траєкторії у горизонтальній площині типу "віраж" за 3 секунди до виводу у район з перевантаженнями 8 і 12 одиниць.

На рисунках 12-13 показані гістограми ймовірностей виводу БПЛА в заданий район при траєкторії БПЛА типу "віраж" і за 3 секунди до виводу у потрібний район по траєкторії "зниження".

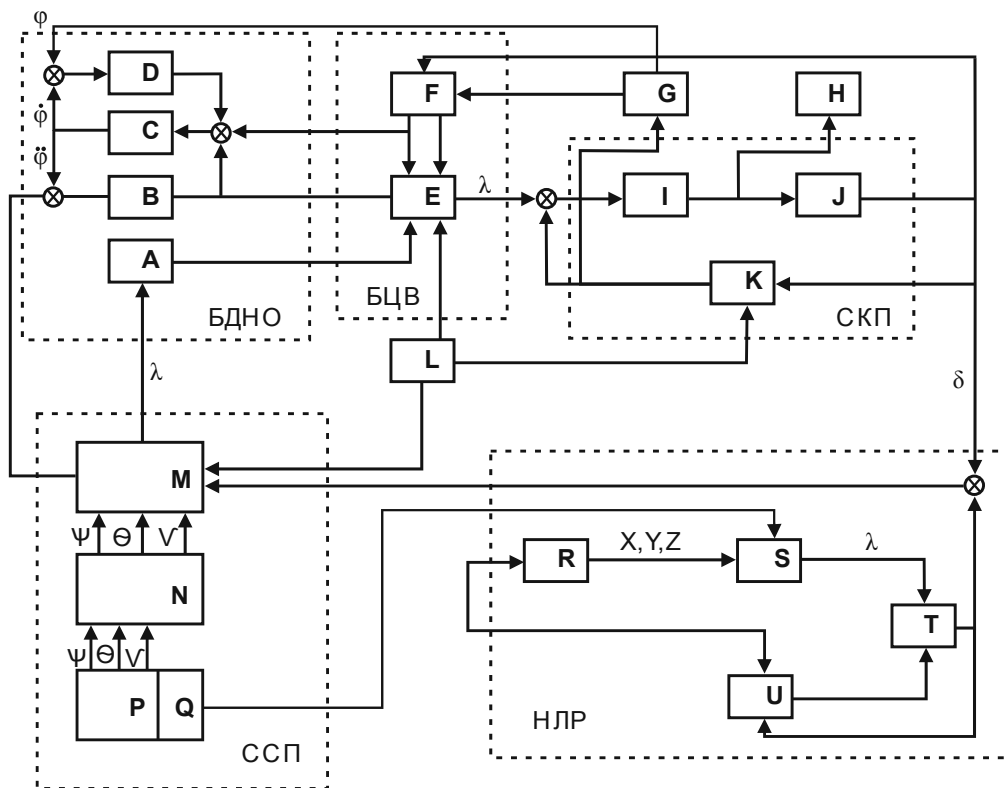


Рис. 6. Функціональна схема синтезованої СКП БПЛА

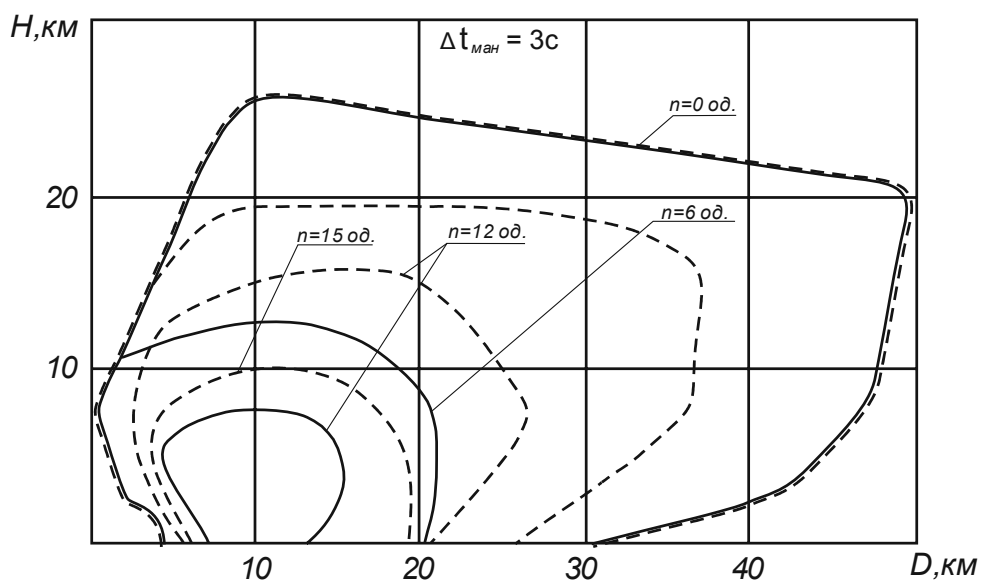
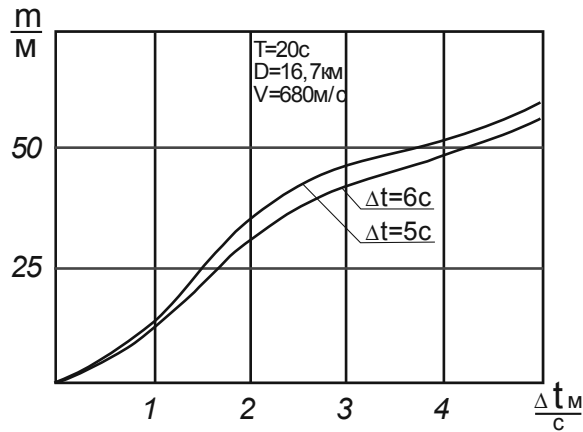
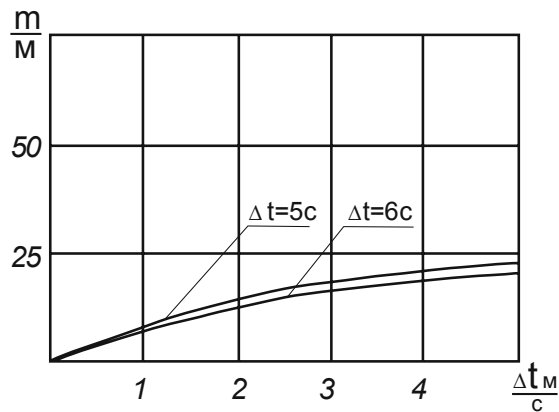


Рис. 7 – Вертикальний розтин зони пеленгування об'єкту (« ————— » - штатна СКП, «-----» - синтезована СКП).

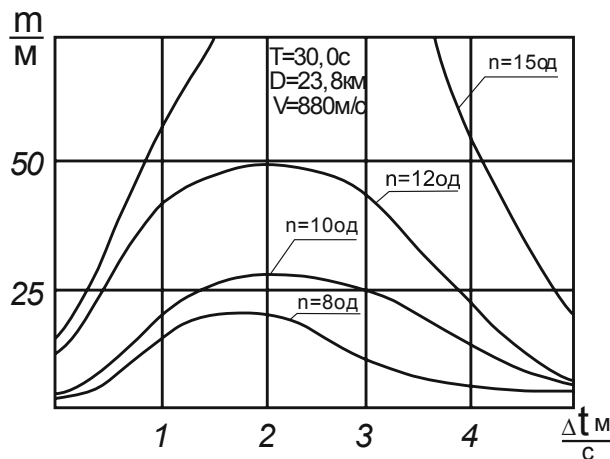




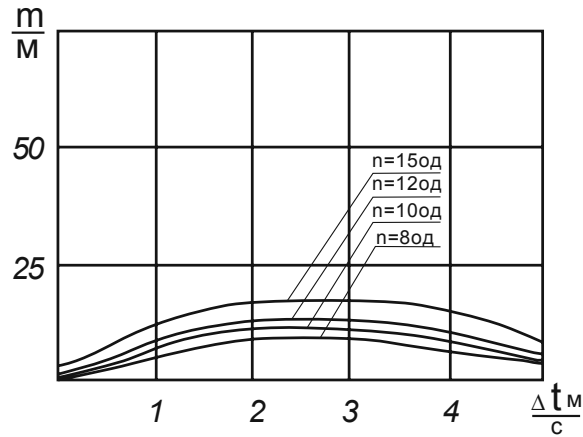
**Рис. 8.** Розподіл динамічної помилки визначення координат об'єкту існуючої СКП при траєкторії БПЛА «Спіраль».



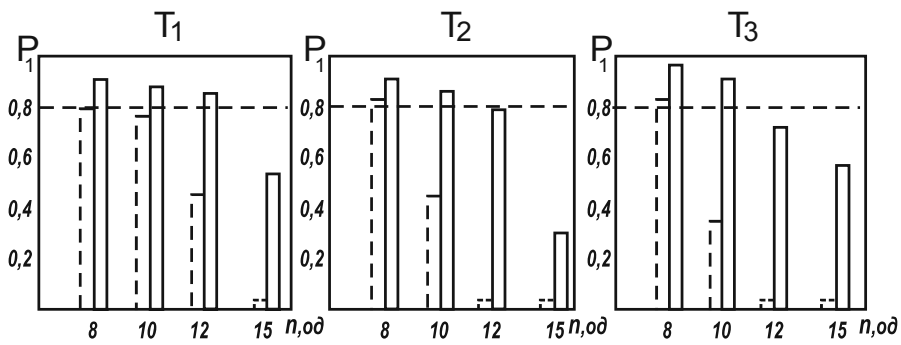
**Рис. 9.** Розподіл динамічної помилки визначення координат об'єкту синтезованої СКП при траєкторії БПЛА «Спіраль».



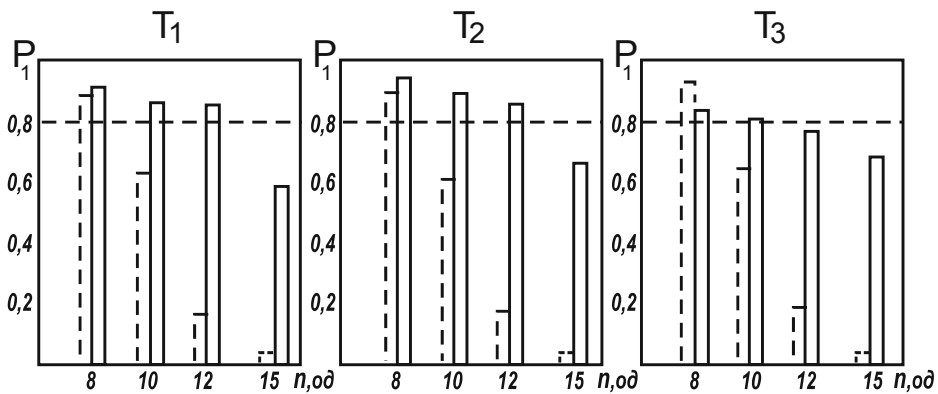
**Рис. 10.** Розподіл динамічної помилки визначення координат об'єкту існуючої СКП при траєкторії БПЛА «Набір висоти».



**Рис. 11.** Розподіл динамічної помилки визначення координат об'єкту синтезованої СКП при траєкторії БПЛА «Набір висоти».



**Рис. 12.** Гістограми імовірності доставки БПЛА при траєкторії «Зниження» («-----») - штатна СКП, «—————» - синтезована СКП).



**Рис. 13.** – Гістограми імовірності доставки БПЛА БПЛА при траєкторії «Віраж» («-----») - штатна СКП, «—————» - синтезована СКП).

Результати експериментальної оцінки якості функціонування синтезованої СКП БПЛА показали працездатність системи і слухність обраного шляху рішення поставленої задачі. Таким чином, застосування синтезованої СКП при проектуванні перспективного БПЛА є перспективним напрямком.

На основі апарата нечіткої математики, що дозволяє вирішити задачу оптимізації в умовах інформаційної невизначеності синтезований адаптивний нечіткий логічний регулятор, що ідентифікує стан об'єкта керування) і видає керуючий вплив у виді вектору команд керування.

Розроблено методику синтезу системи керування польотом з алгоритмами керування на основі математики нечітких множин. По цій методиці синтезована СКП, що забезпечує необхідну можливість виводу БПЛА у заданий район в умовах впливу помилкової складової параметру розголошу.

Оцінка параметричної чутливості синтезованої СКП БПЛА на математичній моделі, реалізованої за допомогою ПЕОМ, показує достатній ступінь "грубості" до похибок виміру параметрів, використовуваних на борту БПЛА.

Дослідження системи з керуванням за допомогою синтезованих алгоритмів показує, що застосування розробленої методики дозволяє зменшити розміри заданої зони на 13-30%, скоротивши ділянку маневрування за рахунок оптимізації по обраному критерію якості траєкторії прямування. Це дозволяє підвищити можливості БПЛА щодо виводу БПЛА в малі за розміром райони, підвищити завадостійкість СКП.

Дослідження системи керування польотом з розробленими алгоритмами керування показує, що їхнє використання дозволяє забезпечити необхідну ефективність виводу БПЛА в заданий район при виникненні перекручувань вхідної інформації, розширяючи потенційні можливості СКП під час виконання маневру із перевантаженнями до 12-14 одиниць, у той час як існуюча СКП БПЛА забезпечує політ із заданою траєкторією та маневром із перевантаженнями до 8-10 одиниць.

Запропонований у роботі підхід до рішення задачі підвищення ефективності СКП БПЛА, отримані теоретичні і практичні результати можуть бути використані як при модернізації існуючих СКП літальних апаратів так і при проектуванні перспективних БПЛА.

### **Список використаної літератури**

1. Лемешко А.Д., Писаренко И.В., Пархомей И.Р.. К вопросу оптимизации процессов наведения ЗКР на маневрирующие цели в условиях информационной неопределенности о параметрах движения цели на борту ракеты.: Науч.-техн.сб.2. – Киев: ЦНИИ МО Украины, 1995. – с. 53.-58.