

УДК 623.451.74

В.І. Нікітченко

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

## МЕТОДИКА СИНТЕЗУ АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАЄКТОРНОГО УПРАВЛІННЯ КЕРОВАНИМИ АВІАЦІЙНИМИ БОМБАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНИХ КІНЦЕВИХ УМОВ НАВЕДЕННЯ

*В статті пропонується методика синтезу алгоритмів оптимального траєкторного управління керованими авіаційними бомбами для забезпечення заданих кінцевих умов наведення. Алгоритми управління побудовані на основі методу пропорціонального наведення, що дозволяє забезпечити необхідну якість управління.*

**Ключові слова:** алгоритм траєкторного управління, задані параметри, керована авіаційна бомба, метод пропорціонального наведення, оптимізація.

### Вступ

Світовими тенденціями розвитку Збройних Сил є зміна стратегії ведення збройних конфліктів. Основними особливостями є відмова від масових операцій по всьому фронту та перехід до точених ударів по елементарним цілям [1]. Відповідно до даних тенденцій змінюються і вимоги до озброєння і військової техніки. А саме, зросла доля використання високоточної зброї (ВТЗ). Сучасна ВТЗ характеризується не тільки високою точністю та ймовірністю ураження цілей але й такою властивістю як вибірковість, тобто спроможністю ураження тільки тієї частини об'єкту, при ураженні якої весь об'єкт припиняє виконувати свої функціональні та тактичні завдання.

Аналіз застосування ВТЗ в останніх локальних конфліктах показав стійкий напрямок на розвиток керованих авіаційних бомб (КАБ). Так як, КАБ можуть з високою точністю уражати ціль, володіють властивістю вибіркової та у порівнянні з керованими авіаційними ракетами можуть доставити до цілі майже в двічі більшу бойову частину (БЧ) [2].

Водночас, характерними особливостями останніх локальних конфліктів є присутність на полі бою значної кількості елементарних легкоуразливих цілей, що розташовані на деякій площі [3]. Це такі як: позиція зенітно-ракетних комплексів (ЗРК), аеродроми, склади, стоянка техніки та ін. За функціональну приналежність даних об'єктів відповідає позиція наведення та пункт управління, стоянка літальних апаратів (ЛА), ємності з паливом, автомобілі та ін. При ураженні яких необхідно забезпечити не тільки високу ймовірність ураження а й вибірковість.

**Аналіз матеріалів.** Забезпечення заданої ймовірності ураження легко уразливих цілей, що розташовані на деякій площі, розширити початкові умови скидання та забезпечити принцип вибіркової для КАБ можливе в рамках сучасного розвитку теорії

оптимального управління. В даній області добре розроблена загальна методологічна база [4 – 6].

Але методи теорії оптимального управління не є універсальними, для даної задачі необхідно враховувати особливості КАБ, їх початкові та кінцеві умови застосування, особливості цілі та дистанційної дії БЧ.

Разом з тим, у відомих роботах, при розгляді задачі наведення, коли на вектор кінцевих параметрів наведення накладаються жорсткі вимоги застосовуються програмні методи наведення [4, 5], які не є оптимальними.

**Метою статті** є розробка методики синтезу алгоритмів оптимального траєкторного наведення КАБ на наземну ціль при забезпеченні заданих кінцевих умов наведення. Алгоритми повинні бути побудовані на основі методу пропорціонального наведення.

### Основний матеріал

В математичній моделі будемо розглядати контур, який складається з інформаційно-вимірювальної системи, системи управління та власне керованої авіаційної бомби (рис. 1).

Об'єктом дослідження є процес функціонування даного контуру.

Розглянемо синтез алгоритму управління у вертикальному каналі системи наведення КАБ [8].

Для опису руху КАБ використаємо систему диференціальних рівнянь у вигляді:

$$\dot{H} = V_y; \quad (1)$$

$$\dot{V} = u_y(t) - g.$$

де  $H$  – висота польоту;

$V_y$  – проекція вектора швидкості КАБ на вісь  $OY_g$  стартової систем координат;

$u_y(t)$  – сигнал управління КАБ по осі  $OY_g$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння.

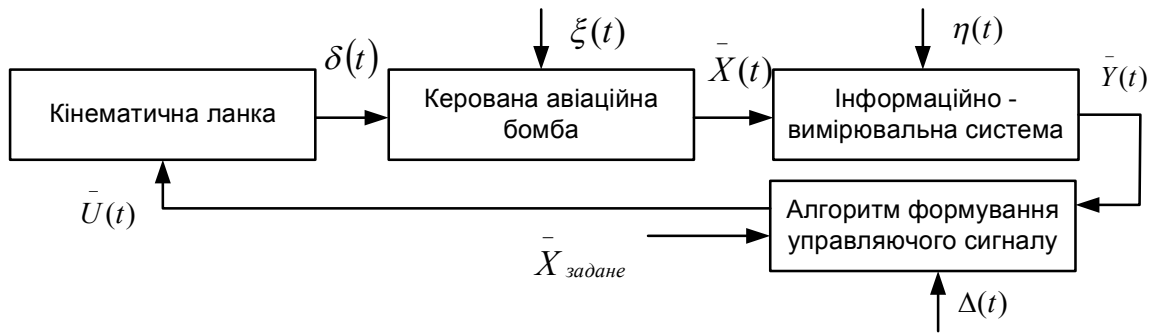


Рис. 1. Система управління КАБ

У якості управління приймемо величину  $u_y(t)$ , а критерій оптимізації у вигляді [5]

$$I = \frac{1}{2} \left[ \beta_1 (V_y - V_3)^2 + \beta_2 (H - H_{y_{ac}})^2 \right]_{t=t_k} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} u_y^2(t) dt, \quad (2)$$

де  $t_k$  – момент зустрічі КАБ з умовною ціллю;  $V_3$  – задане значення проекції вектора швидкості КАБ на вісь  $OY_g$  стартової систем координат;  $H_{y_{ac}}$  – умовна висота цілі в стартовій СК;  $\beta_1, \beta_2$  – коефіцієнти оптимізаційного функціоналу.

$$H_{y_{ac}} = H_0 + H_p, \quad (3)$$

де  $H_0$  – висота цілі С над рівнем моря;  $H_p$  – раціональна висота підриву БЧ.

Дана задача реалізується з наступними обмеженнями та припущеннями.

Так як вибрана ціль є легкоуразливі об'єкти, що розосереджені на деякій місцевості то модель цілі буде деяка приведена площа ураження, що обмежена в площині землі деякими мінімальними та максимальними значеннями:

$$\Omega_{xz} = \begin{cases} x_{\min} < x < x_{\max} \\ z_{\min} < z < z_{\max} \end{cases}$$

Вектор управління та вектор станів належать до деяких множин управління та станів, відповідно. Мінімальна швидкість обмежена умовою керованості КАБ на кінцевій ділянці наведення, математичне очікування шумів контуру рівне нулю [4]. Для реалізації принципу вибірковості приведений радіус, цілі що уражається, повинен бути співвідносним з радіусом ураження бойових елементів:

$$\bar{U} \in \Omega_U; \bar{X} \in \Omega_X; V_{\min} < V < V_{\max}; -\delta_{\max} < \delta < \delta_{\max};$$

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

$$R_{\text{приведений цілі}} \approx R_{\text{розльоту елементів}}$$

Метою управління доцільно визначити підвищення ймовірності ураження цілей КАБ з БЧ дистанційної дії. Необхідно сформувати таке управління, що забезпечувало б зростання приведеної площі ураження і як наслідок – підвищення ймовірності ураження легкоуразливих цілей та забезпечення принципу вибірковості.

Визначити координати КАБ відносно цілі та орієнтацію її вектора швидкості розглядаючи рух КАБ в стартовій системі координат [5, 8].

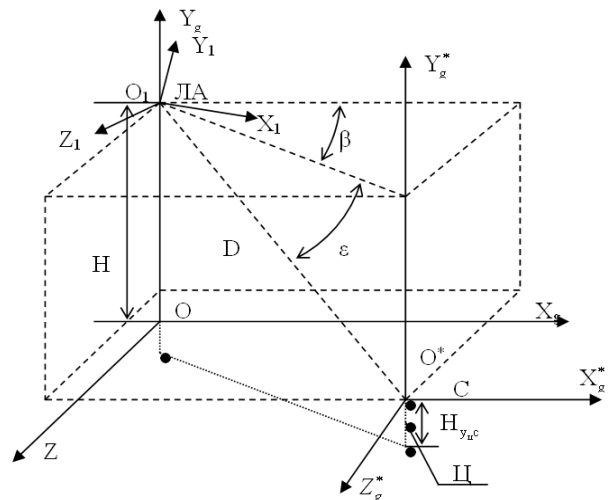


Рис. 2. Системи координат, що використовуються для розрахунків

Для досягнення заданої ймовірності ураження легкоуразливих цілей КАБ необхідно забезпечити раціональні значення швидкості та кута підходу до поверхні ціллю.

Дана задача вирішується шляхом використання в КАБ методу пропорційного наведення [5]:

$$n_{y3} = \kappa_2 (\omega_y - \omega_{y_{ст}}). \quad (4)$$

Даний метод реалізується в горизонтальній площині у вигляді:

$$n_{z3} = \kappa_3 \omega_z. \quad (5)$$

В даних виразах  $\omega_{\text{вер}}$  – параметр компенсації ваги;  $n_{\text{вз}}$ ,  $n_{\text{з}}$  – задане перевантаження в вертикальному та горизонтальному каналах управління відповідно;  $\varepsilon_0$  – кут місця цілі в момент старту КАБ;  $\varepsilon_i = f(\varepsilon_0)$  – функціональна залежність, що визначає потрібний кут цілі в процесі наведення та відповідно, потрібні умови підходу до КАБ до цілі;  $\kappa_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  – коефіцієнти пропорційності.

При реалізації алгоритму траєкторного наведення у вертикальній площині з використанням методу пропорційного наведення, коли параметром траєкторного наведення є кутова швидкість лінії дальності в площині тангажу, траєкторія польоту КАБ близька до прямолінійної (рис. 1, лінія 1) [6], тому параметри зустрічі КАБ з умовною ціллю у цьому випадку буде визначатися початковими умовами пуску.

Щоб кут зустрічі  $\theta_k$  при будь яких умовах пуску КАБ був рівний заданому  $\theta_3$ , необхідно формувати алгоритм управління таким чином, щоб забезпечувалася траєкторія 2 (рис. 3).

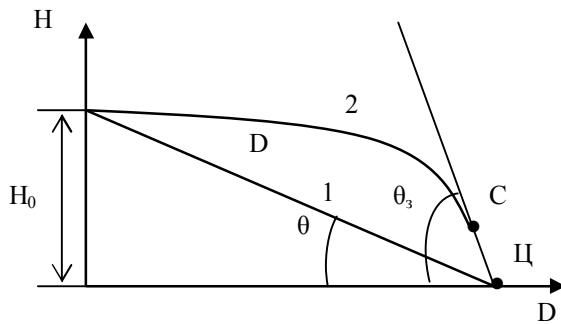


Рис. 3. Траєкторія для забезпечення заданих кінцевих умов наведення КАБ

Таким чином, задачу наведення КАБ у площині тангажу можна сформулювати у такому вигляді: для заданих початкових умов пуску КАБ сформулювати такий закон управління, щоб КАБ потрапила в область над ціллю [7] з заданими параметрами, що відповідають умовам

$$\theta_k = \theta_3, \quad V_k \geq V_{\min}, \quad H_k = H_{\text{уц}}, \quad \Delta_k = \Delta_3. \quad (6)$$

Введемо поняття умовної цілі. Під умовною ціллю будемо розуміти точку простору  $M_0$  у площині тангажу, яка знаходиться по напрямку реальної цілі. Точка  $M_0$  та КАБ рухаються у напрямку реальної цілі Ц і зустрічаються в точці М з раціональними параметрами висоти та кута нахилу траєкторії ( $\theta_3$ ).

Перетворимо вихідну систему (1) у вигляді

$$\dot{Y} = W_y; \quad \dot{W}_y = u_y(t), \quad (7)$$

де  $W_y = V_y - V_3 - g(t_k - t)$ ;  $W_y(t_k) = V_y(t_k) - V_3$ ;

$$Y = H - H_{\text{уц}} + V_3(t_k - t) + g \frac{(t_k - t)^2}{2};$$

$$Y(t_k) = H(t_k) - H_{\text{уц}}.$$

Тоді в якості критерію оптимізації будемо розглядати функціонал виду

$$I = \frac{1}{2} [\beta_1 W_y^2 + \beta_2 Y^2]_{t=t_k} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} u_y^2(t) dt. \quad (8)$$

Застосовуючи варіаційні методи рішення задач оптимізації неперервних динамічних систем отримаємо наступне рішення рівняння Беллмана [4] [9]

$$\frac{dV}{dt} + \max_u \left[ \frac{dV}{dt} f(x, u, t) + P(H, \theta, \Delta_x, \Delta_z, \Omega_{xy}) \right] = 0; \quad (9)$$

$$u(t) = -\Lambda_0 W_y(t) - \Lambda_y Y(t),$$

$$\text{де } \Lambda_0 = \frac{\left(\frac{1}{\beta_2}\right) + \left(\frac{1}{\beta_1}\right)(t_k - t)^2 + \frac{1}{3}(t_k - t)^3}{D_{(t_k - t)}},$$

$$\Lambda_y = \frac{\left(\frac{1}{\beta_1}\right)(t_k - t) + \frac{1}{2}(t_k - t)^2}{D_{(t_k - t)}},$$

$$D_{(t_k - t)} = \left[ \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{3}(t_k - t)^3 \right] \left[ \frac{1}{\beta_1} + t_k - t \right] - \frac{1}{4}(t_k - t)^4.$$

При  $\beta_1 \rightarrow \infty$  та  $\beta_2 \rightarrow \infty$  вираз для управління перетворюється у вигляд

$$u_y(t) = -\frac{4W_y(t)}{t_k - t} - \frac{6Y(t)}{(t_k - t)}. \quad (10)$$

З урахуванням прийнятих позначень отримаємо наступний закон управління

$$u_y(t) = -\frac{4V_y(t)}{t_k - t} - \frac{6(H(t) - H_{\text{уц}})}{(t_k - t)^2} - \frac{2V_3}{t_k - t} + g. \quad (11)$$

В приведених виразах: величина  $(t_k - t)$  являє собою час, що залишився до зустрічі з умовною ціллю; величина  $V_3 = V(t_k) \sin \theta_3$ , де  $V(t_k)$  – значення модуля швидкості в момент закінчення наведення (момент зустрічі з умовною ціллю);  $\theta_3$  – потрібний кут підходу до умовної цілі.

Від того, наскільки точно визначається  $t_z = (t_k - t)$  залежить точність наведення КАБ та потрібні умови підходу [8].

Для обчислення  $t_z$ , поряд з  $\frac{D}{|D|}$  (де D – дальність до умовної цілі,  $|D|$  – швидкість зближення),

може бути використаний наступний вираз

$$t_z = \frac{\sqrt{(x_{ц} - x_B)^2 + (z_{ц} - z_B)^2}}{V \cos(\psi - \varphi)}, \quad (12)$$

де  $x_{ц}$ ,  $z_{ц}$  – координати умовної цілі в інерціальній СК;  $\psi$  – курс;  $\varphi$  – кут візування умовної цілі (азимут).

Для альтернативного варіанту обчислення часу, що залишився до зустрічі з умовною ціллю, представимо зміну координати КАБ по осі  $OX_g$  у вигляді

$$\tilde{x}_B(t) = at^2 + bt + c, \quad (13)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти полінома.

З урахуванням граничних умов

$$\begin{aligned} \tilde{x}_B(t_0) &= x_0; & \tilde{x}_B(t_k) &= x_{y_{ц}}; \\ V_{B_x}(t_0) &= V_{x_0}; & V_{B_x}(t_k) &= V_{x_k}; \\ a &= -\frac{V_{x_k}^2 - V_{x_0}^2}{4(x_{y_{ц}} - x_0)}; & b &= V_{x_0}; & c &= x_0. \end{aligned}$$

Тоді час наведення визначається виразом

$$t_k - t_0 = \frac{2(x_{y_{ц}} - x_0)}{V_{x_k} + V_{x_0}}.$$

При  $t_0 = t$  (в довільний момент часу)

$$\begin{aligned} t_z = t_k - t &= \frac{2(x_{y_{ц}} - x_B(t))}{V_{x_k} + V_{B_x}(t)} = \\ &= \frac{2(x_{y_{ц}} - x_B(t))}{V(t_k) \cos \theta_3 + V(t) \cos \theta(t)}. \end{aligned} \quad (14)$$

З урахуванням того, що в початковий момент часу КАБ може мати не нульове бокове відхилення від цілі, значення виразу для  $t_k$  можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} t_z = t_k - t &= \\ &= 2 \frac{(x_{y_{ц}} - x_B(t)) \cos \varphi(t) - (z_B(t) - z_{y_{ц}}) \sin \varphi(t)^{\frac{1}{2}}}{V(t_k) \cos(\psi(t_k) - \varphi(t_k)) \cos \theta_3} + \\ &+ \frac{(x_{y_{ц}} - x_B(t)) \cos \varphi(t) - (z_B(t) - z_{y_{ц}}) \sin \varphi(t)^{\frac{1}{2}}}{V \cos(\psi(t) - \varphi(t)) \cos \theta}. \end{aligned} \quad (15)$$

При русі КАБ по траєкторії, що прийнята для знаходження величини  $t_{залиш}$ , закон управління по осі  $OX_g$  стартової системи координат визначається як [9]

$$\begin{aligned} u_x(t) &= \frac{V_{B_x}(t_k)^2 - V_{B_x}(t)^2}{2(x_{ц} - x_B(t))} \quad \text{або} \\ u_x(t) &= \frac{V(t)^2 (\cos^2 \theta_3 - \cos^2 \theta(t))}{2(x_{ц} - x_B(t))}. \end{aligned} \quad (16)$$

З урахуванням не нульового бокового відхилення

$$u_x(t) = \frac{1}{2} \times \frac{V(t)^2 \cos(\psi(t) - \varphi(t)) (\cos^2 \theta_3 - \cos^2 \theta(t))}{(x_{ц} - x_B(t)) \cos \varphi(t) - (z_{ц} - z_B(t)) \sin \varphi(t)} \quad (17)$$

Результати математичного моделювання траєкторій наведення КАБ у вертикальній площині представлені на рис. 4.

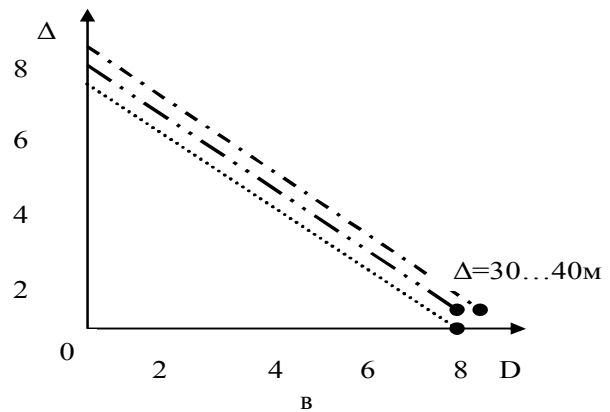
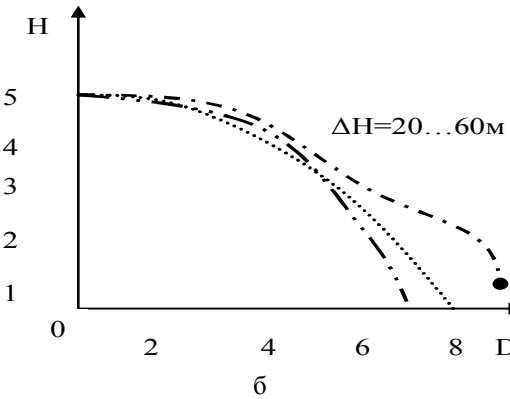
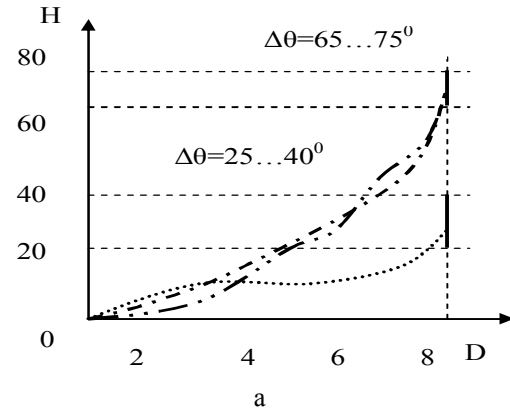


Рис. 4. Результати моделювання траєкторного руху КАБ: а – по параметру кута нахилу траєкторії; б – по параметру висоти підриву БЧ; в – по параметру промаху)

На рисунку позначено:  
 ..... – траєкторії штатної КАБ;  
 — . . – траєкторії КАБ з розробленими алгоритмами;  
 - - - – траєкторії КАБ з алгоритмами, що пропонується.

Початковими умовами моделювання відповіді дають дальності до цілі в момент скидання рівною 8 км, кут нахилу траєкторії літака-носія  $\theta = 0^\circ$ ,  $V = 300$  м/с,  $H = 5$  км.

Кінцевими умовами є  $\theta_3 = 65...75^\circ$ ,  $\Delta = 30...40$  м,  $H=20...60$  м.

При реалізації алгоритмів траєкторного управління КАБ для забезпечення заданих кінцевих умов наведення можливо підвищити ймовірність ураження елементарних легкоовразливих цілей, що розташовані на деякій площі.

## Висновки

1. Забезпечення високої ймовірності та вибірковості ураження елементарних легкоовразливих цілей, що розташовані на деякій площі, можливе за рахунок сучасного рівня розвитку теорії оптимального управління.

2. Методологічною основою алгоритмів оптимального управління є метод пропорціонального наведення.

## Список літератури

1. Демидов Б.А. Системно-концептуальные основы деятельности в военно-технической области / Б.Д. Демидов, А.Ф. Величко, И.В. Волощук; под ред. Б.Д. Демидов. – К., 2004. – 733 с.
2. Семенов С.С. Современные управляемые авиационные бомбы / С.С. Семенов // Зарубежное военное обозрение. – 2005. – № 4 – С. 49-51.
3. Кириченко А.Н. Что такое «высокоточное оружие» / А.Н. Кириченко // Арсенал XXI столетия. – 2002. – № 1 – С. 20-26.

4. Справочник по теории автоматического управления / А.Г. Александров, В.М. Артемьев, В.Н. Афанасьев и др.; под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 711 с.

5. Максимов М.В. Радиоуправление ракетами / М.В. Максимов, Г.И. Горгонов. – М.: Советское радио, 1964. – 642 с.

6. Алгоритм траєкторного наведення безпілотного літального апарату, який планує на наземну ціль при забезпеченні заданих кінцевих умов наведення / О.Г. Водичиць, І.С. Кравчук, В.В. Тараненко, М.М. Баскаков // Науковий журнал. Вісник НАУ. – К., 2004. – № 1(19). – С. 137-139.

7. Тараненко В.В. Вибір параметрів неконтактного підриву керованих авіаційних бомб з бойовою частиною дистанційної дії / В.В. Тараненко, В.І. Нікітченко, Р.Г. Єфімова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний ж. – 2011. – № 2(6). – С. 40-43.

8. Веремеенко К.К. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / К.К. Веремеенко, А.М. Головинский, В.В. Инсаров; под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.

9. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / В.Н.Буков – М.: Наука, 1987. – 230 с.

Надійшла до редколегії 15.08.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співробітник. С.О. Українець, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕННЯ УПРАВЛЯЕМЫМИ АВИАЦИОННЫМИ БОМБАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАНЫХ КОНЕЧНЫХ УСЛОВИЙ НАВЕДЕНИЯ

В.И. Никитченко

Обоснована методика синтеза алгоритмов оптимального траекторного управления управляемыми авиационными бомбами для параметров неконтактного подрыва (высоты, угла, промаха, скорости), где вероятность поражения дистанционным действием имеет максимальное значение. Алгоритмы построены на основе метода пропорционального наведения, который является оптимальным для заданного критерия траекторного управления.

**Ключевые слова:** алгоритм траекторного управления, заданные параметры, управляемая авиационная бомба, метод пропорционального наведения, оптимизация.

## METHODS OF SYNTHESIS OF ALGORITHMS OPTIMUM TRAJECTORY MANagements OF OPERATED AVIATION BOMBS FOR MAINTENANCE SET EVENTUAL PROMPTING CONDITIONS

V.I. Nikitchenko

The methods of synthesis of algorithms optimum trajectory managements of operated aviation bombs for parameters of not contact blasting (height, a corner, a miss, speed) where the probability of defeat by remote action has the maximum value is proved. Algorithms are constructed on the basis of a method of proportional prompting which is optimum for the set criterion trajectory managements.

**Keywords:** algorithm trajectory the managements, the set parameters, an operated aviation bomb, a method of proportional prompting, optimisation.