

НАВЕДЕННЯ КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА В МИТТЄВО УПЕРЕДЖЕНУ ТОЧКУ ЗУСТРІЧІ З ЦІЛЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ АДАПТИВНОГО МЕТОДУ “НУЛЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ”

Відомі методи наведення керованих об'єктів (літаків, кораблів, ракет) при перехопленні цілей, що вільно маневрують: прямого наведення, пропорційного і паралельного наближення не є оптимальними за рахунок зміни траєкторії і знакозмінності маневру об'єкта. Це приводить до збільшення енерговитрат на маневрування й витрати часу на перехоплення. Також при цьому створюються значні перевантаження на перехоплювачі під час наведення. У статті розглядається адаптивний метод наведення, в якому усунено вищезазначені недоліки і є максимально ефективним завдяки оптимізації системи наведення.

Ключові слова: метод пропорційного наближення, метод прямого наведення, метод паралельного наближення, реакція системи наведення.

Основний зміст. Проаналізуємо кінематику й динаміку відомих методів наведення керованих об'єктів на ціль [1] для оцінки їх ефективності.

Метод “прямого наведення” (погоні) є простішим для реалізації; його кінематична схема полягає в постійному суміщенні напрямку вектора швидкості об'єкта з напрямком “далечі”, що проходить через ціль і об'єкт наведення (рис.1).



Рис. 1. Кінематична схема методу “прямого” наведення (“погоні”)

Для спрощення аналізу напрямки $(ну)$ і модуль вектора швидкості руху цілі V_u вважаються незмінними. В початковий момент t_1 процесу перехоплення ціль знаходиться в точці $u(t_1)$, об'єкт – в точці $n(t_1)$, модуль його швидкості рівний V_n і спрямований в точку $u(t_1)$ положення цілі. Відстань між об'єктом і ціллю дорівнює $d(t_1)$.

Оскільки вектор відносної швидкості

$$\overline{V_o}(t_1) = \overline{V_n}(t_1) - \overline{V_u}(t_1) \quad (1)$$

не співпадає з напрямком далечі $d(t_1)$, то швидкість наближення, що є проекцією відносної швидкості на напрямки далечі

$$\overline{V}_c(t_1) = \text{Pr}_{(d)} \overline{V}_o(t_1), \quad (2)$$

незважаючи на “пряме” наведення, не є максимальною, а ціль через “кругову” швидкість

$$\overline{V}_k(t_1) = \overline{V}_o(t_1) - \overline{V}_c(t_1) \quad (3)$$

на інтервалі часу “реакції системи наведення” (t_1, t_2) має кутову швидкість “обертання” напрямку далечі

$$\omega = |\overline{V}_k|/d. \quad (4)$$

Дана обставина є причиною необхідного маневрування об’єкта (на подальших інтервалах часу) для зміни напрямку руху, тому траєкторія наведення стає істотно нелінійною (відома, як “крива погоні”). Як то видно з даного прикладу, в момент t_6 напрямки руху об’єкта и цілі співпадають, і подальше перехоплення “вдогін” при перевазі у швидкості, коли вектор відносної швидкості строго дорівнює швидкості наближення, вже не потребує маневру об’єкта по напрямку.

Таким чином, метод “прямого” наведення, через не оптимальність траєкторії руху об’єкта по швидкості наближення і витрат часу на перехоплення, не забезпечує наведення в “упереджену” точку зустрічі с ціллю, пов’язаний зі значними поперековими переваженнями об’єкта и максимальними енерговитратами при неперервному маневруванні в процесі наведення (по криволінійній траєкторії погоні) навіть при прямолінійному русі цілі. Перевагою метода є простота реалізації.

Метод “пропорційного наближення” є розвитком методу “прямого” наведення, забезпечує послідовне наведення керованого об’єкта в “динамічну область” упередженої точки зустрічі с ціллю і полягає у змінненні напрямку руху для підтримання значення кутової швидкості руху об’єкта “пропорційній” значенню кутової швидкості руху цілі в “інерційному” просторі. Кінематична схема наведення близька до схеми “прямого” наведення з урахуванням значення кругової (кутової) швидкості цілі ω (с постійним коефіцієнтом пропорційності) при корекції напрямку руху об’єкта.

Аналіз показує, що траєкторія руху об’єкта наведення також є криволінійною (ділянкою спіралі), однак має значно меншу кривизну (наближається до прямолінійної). Не оптимальність траєкторії руху об’єкта по швидкості наближення и часу перехоплення не забезпечує точного наведення в “упереджену” точку зустрічі с ціллю (тільки на поточному “дискретному” інтервалі часу), пов’язана з постійними поперековими переваженнями об’єкта і значними енерговитратами на неперервний маневр при наближенні до цілі в процесі наведення по криволінійній траєкторії. Реалізація метода пов’язана з необхідністю створення в системі управління “інерційного простору” з вимірювачем кутової швидкості цілі.

Надамо загальну постановку [2] екстремальної задачі наведення в “інерційному” просторі керованого об’єкта в “миттєву упереджену точку зустрічі” (м.у.т.з.) з “ціллю”, що вільно маневрує – максимізувати ефективність процесу наведення мінімізацією “витрат” (як витрат часу) на перехоплення при завданих початкових (на момент $t=0$) умовах:

$$\begin{aligned} \text{відстань між об’єктом и ціллю} & D(t=0); \\ \text{модуль и напрямок вектора швидкості цілі} & \overline{V}_u(t=0); \\ \text{модуль и напрямок вектора швидкості об’єкта} & \overline{V}_n(t=0). \end{aligned} \quad (5)$$

Існує обмежена множина методів наведення, кожний з котрих характеризується траєкторією “перехоплення” S , тобто руху керованого об’єкта до цілі в області простору –

виникає відповідна множина траєкторій $\{S\}$. Узагальненою цільовою функцією вважаються витрати часу на перехоплення при даному методі наведення $T(S)$.

Формальна постановка задачі вибору методу оптимального наведення керованого об'єкта на ціль – на множині можливих траєкторій $\{S\}$, кожна з котрих S обертає початкову відстань між об'єктом и ціллю за час наведення $T(S)$ в нуль (“критерій припустимості”)

$$\forall S, S \in \{S\}: D\{T(S)\} = 0, \quad (6)$$

знайти таку (оптимальну) траєкторію

$$S^o \in \{S\}, \quad (7)$$

котра мінімізує витрати часу на наближення (“критерій оптимальності”)

$$T(S^o) = \min_{\{S\}} T(S). \quad (8)$$

Ефективність методу, як співвідношення “ефекту” (значення початкової відстані) і “витрат” (часу на її подолання) по фізичному змісту є “середньою швидкістю наближення”; ефективність максимальна при оптимальній траєкторії

$$E(S^o) = D / T(S^o) = D / \min_{\{S\}} T(S) = \max_{\{S\}} E(S). \quad (9)$$

Метод “паралельного наближення” є методом наведення в “миттєву” (на інтервалі часу “реакції” системи управління) упереджену точку зустрічі с ціллю и полягає в удержанні напрямку далечі (“об’єкт-ціль”) на його начальному (“інерційному”) напрямку шляхом зміни напрямку руху об’єкта в процесі перехоплення (рис.2). Начальний “інерційний” напрямок (in) суміщається з напрямком “об’єкт-ціль”, тобто проходить через точки $n(t_1)$ і $u(t_1)$, й “фіксується” зберігачем in в момент початку процесу наведення об’єкта.

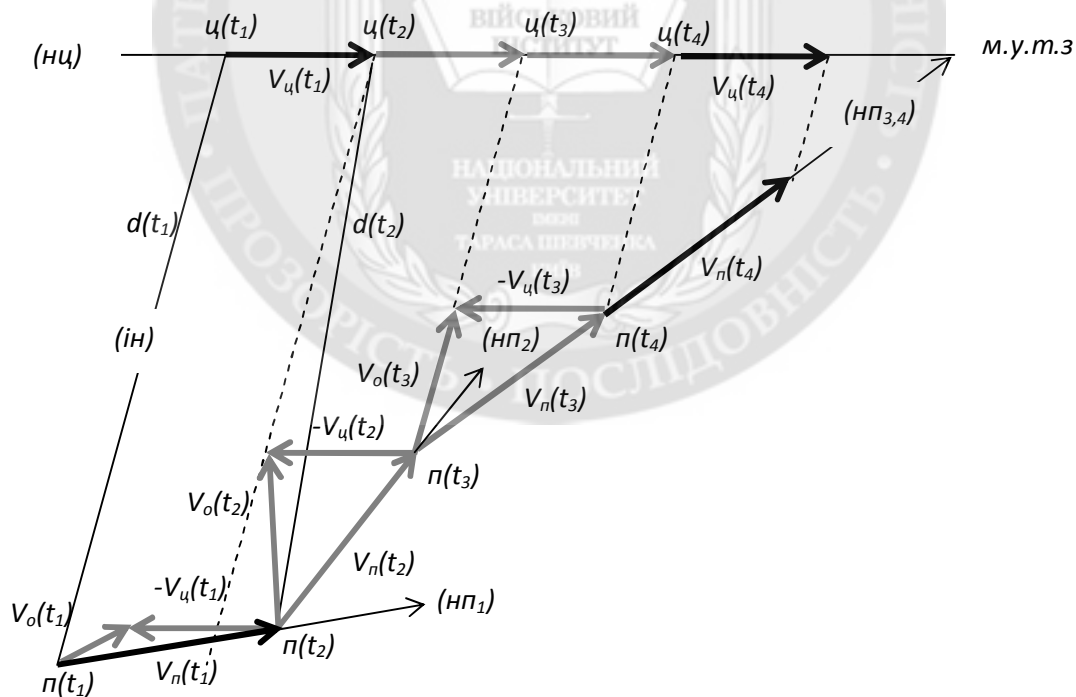


Рис. 2. Кінематична схема методу “паралельного наближення”

Нехай швидкість и напрямок руху цілі (nu) завдані вектором $\overline{V}_u(t_1)$, керованого об’єкта – вектором $\overline{V}_n(t_1)$, а відстань до цілі дорівнює $d(t_1)$. При цьому вектор відносної швидкості

$$\overline{V}_o(t_1) = \overline{V}_n(t_1) - \overline{V}_y(t_1), \quad (10)$$

що не співпадає з інерційним напрямком (початковим напрямком далечі), утворює швидкість наближення (значно меншу відносної)

$$\overline{V}_c(t_1) = \text{Pr}_{(d)} \overline{V}_o(t_1) \quad (11)$$

кругову швидкість відносного руху цілі

$$\overline{V}_k(t_1) = \overline{V}_o(t_1) - \overline{V}_n(t_1) \quad (12)$$

и відповідну до неї кутову швидкість напрямку “далечі”

$$\omega = |\overline{V}_k|/d. \quad (13)$$

На інтервалі часу “реакції системи наведення” (t_1, t_2) напрямку “далечі” $d(t_2)$ відхилиться від інерційного напрямку на кут розбіжності

$$\alpha(t_2) = \omega \times (t_2 - t_1), \quad (14)$$

котрий необхідно на наступному інтервалі “реакції” (t_2, t_3) компенсувати зміненням «вліво» напрямку вектора швидкості руху об’єкта $V_n(t_2)$ відносно попереднього (nn_1) напрямку $V_n(t_1)$, щоб повернути напрямку далечі на інерційний напрямку. В момент t_3 напрямку далечі співпадає з інерційним напрямком, однак при цьому відносна швидкість буде мати протилежне по знаку відхилення від напрямку далечі. Щоб компенсувати викликані на інтервалі “реакції” (t_2, t_3) оцим відхиленням кругову и кутову швидкості цілі, необхідно на інтервалі “реакції” (t_3, t_4) змінити “вправо” напрямку (nn_3) вектору швидкості руху об’єкта $V_n(t_3)$ відносно попереднього (nn_2) напрямку $V_n(t_2)$.

Оскільки при даному новому напрямку (nn_3) вектора швидкості $V_n(t_3)$ вектор відносної швидкості буде співпадати з інерційним напрямком, то вектор швидкості наближення буде співпадати з напрямком поточної далечі, и об’єкт буде рухатися далі в миттєву упереджену точку зустрічі (м.у.т.з.) с ціллю с максимальної швидкостю наближення, що дорівнює відноській. Таким чином, даний “елементарний” маневр об’єкта завжди буде знаковмінним.

Аналіз показує, що траєкторія руху об’єкта при наведенні даним методом близька до оптимальної (прямолинійної), за виключенням ділянок маневрування, що забезпечує зменшення витрат часу й енерговитрат на перехоплення цілі. Однак компенсація відхилень від оптимальної траєкторії пов’язана зі значними енерговитратами на знаковмінний маневр і поперековими перевантаженнями об’єкту, які при цьому виникають. Реалізація методу потребує наявності у системі управління зберігача інерційного напрямку та вимірювача ортогональних кутів “розбіжності” напрямку далечі (лінії “об’єкт-ціль”) відносно “опорного” інерційного напрямку.

Розглянемо зміст “адаптивного” методу наведення об’єкта в “м.у.т.з.” з ціллю. Для кращого розуміння сутності “адаптивного” методу розглянемо його спрощену кінематичну схему в площині кутів курсу (“рискання”) при незмінному модулі векторів швидкості цілі и об’єкта (рис.3).

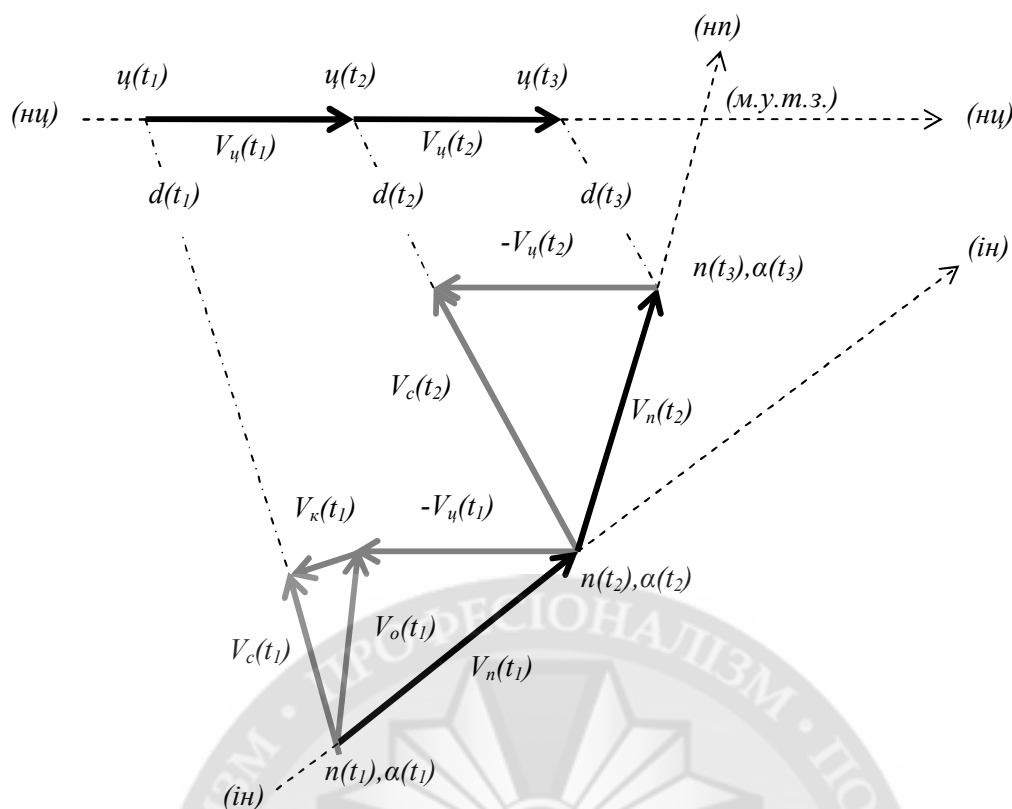


Рис. 3. Кінематична схема наведення в “м.у.т.з.” адаптивним методом “нуля кутової швидкості”

Зрозуміло, що зміст задачі буде аналогічним для площини кутів “тангажу” і при змінних у часі значеннях модулів векторів швидкості цілі і об’єкта.

Нехай цілі (u) рухається в напрямку (nu) і знаходиться на своїй траєкторії в поточні моменти часу t_1, t_2, t_3 (що відділяють інтервали “реакції» системи наведення) в точках $u(t_1), u(t_2), u(t_3)$ і має швидкість й напрямок руху $V_u(t_1), V_u(t_2), V_u(t_3)$ відповідно. Об’єкт-перехоплювач (n) рухається в напрямку (nn), котрий при початку процесу “наведення” фіксується як “інерційний” напрямком (in). Об’єкт знаходиться на своїй траєкторії в поточні моменти часу t_1, t_2, t_3 в точках відповідно $n(t_1), n(t_2), n(t_3)$ і має швидкість і напрямок руху $V_n(t_1), V_n(t_2), V_n(t_3)$ відповідно. Тоді відстань між ціллю і перехоплювачем в дані моменти часу складає $d(t_1), d(t_2), d(t_3)$ відповідно.

Вважаємо, що між сусідніми моментами часу t_1, t_2, t_3 (тобто всередині кожного, достатньо “малого”, інтервалу часу “реакції» системи неведення $dt=t_{i+1}-t_i$) вектори швидкості цілі і об’єкта по модулю і напрямку незмінні.

Для моменту (t_1) напрямком лінії “далечі” $d(t_1)$ утворює деякий кут $\alpha(t_1)$ з інерційним напрямком (in); цей напрямком має вектор швидкості “наближення” $V_c(t_1)$, який є проекцією вектора відносної швидкості $V_o(t_1)$ на напрямком “далечі” $d(t_1)$

$$\overline{V_c}(t_1) = \text{Pr}_{(d)} \overline{V_o}(t_1). \quad (15)$$

В свою чергу, вектор відносної швидкості є різницею між векторами швидкості об’єкта і швидкості цілі

$$\overline{V_o} = \overline{V_n} - \overline{V_u}. \quad (16)$$

Ознакою руху об’єкта в “м.у.т.з.” с ціллю з максимальною швидкістю взаємного наближення є рівність проекції відносної швидкості на напрямком “далечі” і вектора

швидкості наближення (по модулю и напрямку). Якщо відносна швидкість и швидкість наближення відрізняються, то це означає, що вектор відносної швидкості не співпадає зі своєю проекцією на напрямок далечі, тобто виникає деяка лінійна швидкість “кругового” руху цілі відносно об’єкту, що є векторною різницею

$$\overline{V}_k = \overline{V}_o - \overline{V}_c . \quad (17)$$

Лінійна швидкість кругового руху цілі $V_k(t)$, відповідна до неї кутова швидкість обертання $\omega = da(t)/dt$ и відстань між об’єктами $d(t)$ пов’язані кінематичним рівнянням

$$\text{mod}(\overline{V}_k) = \omega \times d . \quad (18)$$

Оскільки поточна відстань між об’єктами завдається виразом

$$d(t) = d(0) - \int_0^t \{\text{mod}(\overline{V}_c(t))\} \times dt , \quad (19)$$

то, очевидно, максимально ефективною траєкторією об’єкту є така, що мінімізує витрати часу T на наведення в “м.у.т.з.” при даній початковій відстані між об’єктами та відомих модулях й напрямках векторів швидкості їх руху.

Витрати часу на наведення T відповідають інтервалу між моментом початку процесу наближення (при початковій відстані) и моментом досягнення поточною відстанню мінімального значення (рівного “промаху”).

Таким чином, виникає інтегральне рівняння, рішення якого (програма $a(t)$ зміни напрямку вектора швидкості об’єкта) є оптимальним

$$d(0) = \int_0^T \text{mod}\{\overline{V}_n(t) - \overline{V}_y(t) - \omega(t) \cdot d(t)\} \times dt . \quad (20)$$

Функціональний аналіз даного інтегрального рівняння показує, що складова (18) дає «промах» наведення, як мінімальне значення поточної відстані

$$d(T) = \int_0^T \text{mod}\{\omega(t) \cdot d(t)\} \times dt . \quad (21)$$

Таким чином, оптимальна траєкторія наведення (програма зміни напрямку вектора швидкості об’єкта наведення) мінімізує витрати часу на наведення, згідно інтегральному рівнянню

$$d(0) = \int_0^{T \min} \text{mod}\{\overline{V}_n(t) - \overline{V}_y(t)\} \times dt . \quad (22)$$

Оптимізація траєкторії, тобто вибір $S^o \in \{S\}$, полягає в усуненні поточного промаху “корегуванням” напрямку вектора швидкості об’єкта $\alpha(t)$ для утримання рівною нулю кутової швидкості обертання цілі відносно об’єкта

$$\omega\{\alpha(t)\} \rightarrow 0 . \quad (23)$$

Вираз (23), як ознака оптимального рішення S^0 задачі наведення, і є “законом управління” для адаптивного метода наведення (закон “нуля кутової швидкості”).

Оскільки на інтервалі часу “реакції” (t_1, t_2) вектор відносної швидкості $V_o(t_1)$ не співпадає с вектором швидкості наближення $V_c(t_1)$ – своєю проекцією на “напрямок далечі” – то через це виникає вектор кругової швидкості $V_k(t_1)$ цілі відносно об’єкта і відповідна до нього кутова швидкість обертання $\omega(t_1)$, завдяки чому з’являється “поточний” промах

$$\begin{aligned} \delta(t_2) &= \omega(t_1) \times d(t_1) \times (t_2 - t_1) \approx \frac{a(t_2) - a(t_1)}{(t_2 - t_1)} \times d(t_1) \times (t_2 - t_1) \approx \\ &\approx \{a(t_2) - a(t_1)\} \times d(t_1). \end{aligned} \quad (24)$$

Для його усунення напрямки вектора швидкості руху об’єкта $V_n(t_1)$ в інтервалі часу “реакції” (t_1, t_2) поступово змінюється на $V_n(t_2)$ – до зникнення кутової швидкості обертання цілі як результату збігу напрямку вектора відносної швидкості і нового “напрямку далечі”. Оскільки тепер швидкість взаємного наближення об’єкта і цілі дорівнює їх відносній швидкості, тобто стає максимальною, то вони без промаху наведення зустрічаються в “м.у.т.з.”. Даний “елементарний” маневр, таким чином, є оптимальним по критеріях мінімуму енерговитрат на наведення, поперекових перевантажень й максимуму швидкості наближення.

Зрозуміло, що даним методом можливе не тільки “самонаведення” об’єкта на ціль, але й “зовнішнє” його наведення.

Для цього на “зовнішньому” пункті наведення (наземному чи повітряному) в кожному “елементарному” командному циклі (t_i, t_j) “дискретного” процесу наведення фіксуються поточні координати цілі і об’єкта (наприклад, засобами радіолокації в “базовій” системі координат) і обчислюються (комп’ютерними засобами автоматизації управління) кути “напрямку далечі” між об’єктом і ціллю. При виникненні кутової швидкості “напрямку далечі” (змінах його поточного значення кута) формується команда на змінення курсу об’єкта (для зменшення кутової швидкості до нуля) і утримання даного нового курсу.

Окремого дослідження також потребує проблема вибору змінного параметру управління рухом об’єкта при наведенні. Так, нами розглянуте управління шляхом зміни напрямку вектора швидкості об’єкта при незмінному його модулі. Однак при управлінні можливе, якщо це практично можна здійснити, змінення не тільки напрямку, а й модуля вектора швидкості. Попередній аналіз свідчить, що для швидкоплинного процесу наведення знакозмінне управління модулем власної швидкості об’єкта шляхом зміни сили тяги двигуна через значну інерційність і складність даної системи практично недоцільно.

Порівняльне комп’ютерне моделювання процесу наведення адаптивним методом “нуля кутової швидкості” і методом “паралельного наближення” підтвердило основні переваги адаптивного метода по оптимальності траєкторії руху об’єкта (максимізація швидкості або мінімізація часу наближення, мінімізація енерговитрат й поперекових перевантажень об’єкта при маневруванні), котрі й визначають максимальну ефективність адаптивного метода “нуля кутової швидкості”.

Висновок. Проведений аналіз показав, що відомі методи наведення в “м.у.т.з.” керованих об’єктів (літаків, ракет) при “перехопленні” цілей, що вільно маневрують – методи “прямого наведення”, “пропорційного наближення” і “паралельного наближення”, не є досконалими, тобто максимально ефективними, через не оптимальність траєкторії наближення і знакозмінного маневру об’єкта при наведенні, що збільшує енерговитрати на маневрування й витрати часу на перехоплення, народжує значні поперекові перевантаження на керованому об’єкті при його наведенні. Запропонований “адаптивний” метод наведення, “законом” управління для якого є “мінімізація (нуль) кутової швидкості” цілі, вільний від перелічених недоліків і є максимально ефективним (“екстремальним”) завдяки оптимальній траєкторії наведення. Адаптивний метод наведення в м.у.т.з. може бути використаний в

системах реактивної зброї ударної і винищувальної авіації, в системах наведення снарядів зенітно-ракетних комплексів протиповітряної оборони.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Локк А.С. и др. Управляемые снаряды (Исследование операций. Боевые части. Пуск снарядов). МО СССР, Москва, 1956.

2. Крюков М.П., Невольниченко А.І. Бойові можливості авіації. Навчальний посібник. Вид. Академії ЗС України, 2004.

Рецензент: к.т.н., доц. Пампуха І.В., Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н., с.н.с. Невольниченко А.І.

НАВЕДЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА В МГНОВЕННО ПРОГНОЗИРОВАННУЮ ТОЧКУ ВСТРЕЧИ С ЦЕЛЬЮ ПРИ ПОМОЩИ АДАПТИВНОГО МЕТОДА “НУЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ”

Существующие методы наведения управляемых объектов (самолетов, кораблей, ракет) при перехвате целей, свободно маневрирующие: прямой наведения, пропорционального и параллельного приближения не являются оптимальными за счет изменения траектории и знакоизменения маневра объекта. Это приводит к увеличению энергозатрат на маневрирование и затрат времени на перехват. Также при этом создаются значительные перегрузки на перехватчики при наведении. В статье рассматривается адаптивный метод наведения, в котором устранены вышеупомянутые недостатки и есть максимально эффективным благодаря оптимизации системы наведения.

Ключевые слова: метод пропорционального приближения, метод прямого наведения, метод параллельного приближения, реакция системы наведения.

Ph.D. Nevolnichenko A.I.

TARGETING OF GUIDED OBJECTS INTO PROGNOSSED TARGET POINT USING ADAPTIVE METHOD OF “ZERO ANGULAR VELOCITY”

The well-known methods of targeting of guided objects (aircrafts, ships, rockets) while interception of free ranging movement targets are: direct targeting, proportional and parallel approach. They are not effective because of trajectory change and maneuverability of objects. It causes increasing of energy consumption for maneuvering and increasing of the used time for interception. In addition interceptors receive considerable overload while targeting. The article touches on adaptive method of targeting without above mentioned disadvantages. This method is the most effective because of optimization of targeting system.

Keyword: method of proportional approach, method of direct guidance, method of parallel approach, guidance system reaction.