

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПОДОЛАННЯ ПЕРЕШКОД ДЛЯ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

**Анотація.** Більшість існуючих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) пілотуються за допомогою пультів дистанційного керування. При цьому при виконанні деяких робіт (геологічних, геодезичних, рятувальних, пошукових) є обмеження пов'язані з недостатньою робочою дальністю БПЛА. Тому є необхідність автоматичного керування БПЛА. При автоматичному керуванні БПЛА одним з завдань є формування траєкторії руху БПЛА, при виконанні геодезичних, пошукових та інших робіт, включаючи автоматичне маневрування для обходу перешкод. У статті наведено схему нечіткого логічного висновку. Сукупність значень нечітких вхідних лінгвістичних змінних (ЛЗ), вихідних ЛЗ утворює нечітку базу даних, сукупність правил нечітких продукцій утворює нечітку базу знань. Кожне нечітке число представлено трикутними або трапецієподібними упорядкованими дійсними числами та задано функцією належності. Для опису простору в напрямку руху БПЛА використовуються вхідні сигнали датчиків. Після обминання перешкоди навігація БПЛА може здійснюватися за допомогою GPS. Простір в напрямку руху БПЛА поділено на  $p$  ть секторів, в яких аналізується наявність перешкод та відстань до них. Введено три вхідні лінгвістичні змінні – дві для аналізу розташування перешкоди (ЛЗ «Горизонталь» та ЛЗ «Вертикаль») та одна для аналізу відстані до перешкоди (ЛЗ «Відстань»). Щодо вихідних змінних, в залежності від розташування перешкоди БПЛА буде змінювати кут ризику, швидкість руху та висоту. Введено три вихідні ЛЗ – «Кут», «Швидкість» та «Висота» та побудовано їх функції належності. Складено базу нечітких продукційних правил виду: якщо «значення вхідних змінних», то «значення вихідних змінних». Використано систему нечіткого виводу типу Мамдані. За допомогою програми перегляду правил системи нечіткого виведення (Rule Viewer) та програми перегляду поверхні системи нечіткого виведення (Surface Viewer) Fuzzy Logic Toolbox проаналізовано результати створеної нечіткої системи. Розроблений у цій статті підхід до запобігання зіткненню БПЛА з перешкодами на основі апарату нечіткої логіки відрізняється від відомих аналогів способом координатії БПЛА, сукупністю керуючих правил. Застосування апарату нечіткої логіки дозволяє успішно вирішувати завдання формування траєкторії руху БПЛА в залежності від розташування перешкоди та відстані до неї.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, система подолання перешкод, лінгвістична змінна, нечітка логіка.

### Вступ

**Постановка задачі.** На теперішній час БПЛА застосовуються в різних областях людської діяльності. Застосування БПЛА у дистанційному моніторингу земної поверхні, підвищує вимоги до систем автоматичного управління БПЛА та навігаційного забезпечення польоту. Керування БПЛА за допомогою оператора при охопленні значних територій вимагає вдосконалення системи контролю та керування БПЛА, також існує проблема пов'язана з подоланням перешкод при автоматичному управлінні БПЛА. Тому актуальною задачею є розробка системи подолання перешкод при автоматичному управлінні БПЛА при дослідженнях в геодезичних роботах, у випадках надзвичайних ситуацій, в пошукових та інших роботах.

**Мета роботи.** У разі неможливості обчислити траєкторію БПЛА до початку його руху або відсутність інформації про точне розташування перешкод доцільним є управління на основі нечіткої логіки. Тому мета даної роботи полягає в розробці системи формування траєкторії руху БПЛА для подолання перешкод на основі нечіткої логіки.

### 1 Нечітка логіка

Л. Заде розширив класичне канторівське поняття множини, припустивши, що характеристична функція (функція належності елемента множини) може набувати будь-яких значень в інтервалі  $[0,1]$ , а не тільки значення 0 або 1. Такі множини були названі

ним нечіткими (fuzzy) [1]. Ввівши поняття лінгвістичної змінної, і припустивши, що в якості її значень (термів) виступають нечіткі множини, Л. Заде створив апарат для опису процесів інтелектуальної діяльності, включаючи нечіткість і невизначеність виразів. Математична теорія нечітких множин дозволяє описувати нечіткі поняття та знання, оперувати цими знаннями та робити нечіткі висновки [2, 4].

Взаємозв'язок вхідних і вихідних змінних описується нечіткими продукційними правилами. Сукупність значень нечітких вхідних лінгвістичних змінних (ЛЗ), вихідних ЛЗ утворює нечітку базу даних, сукупність правил нечітких продукцій утворює нечітку базу знань. Схема нечіткого логічного висновку показана на рис. 1.

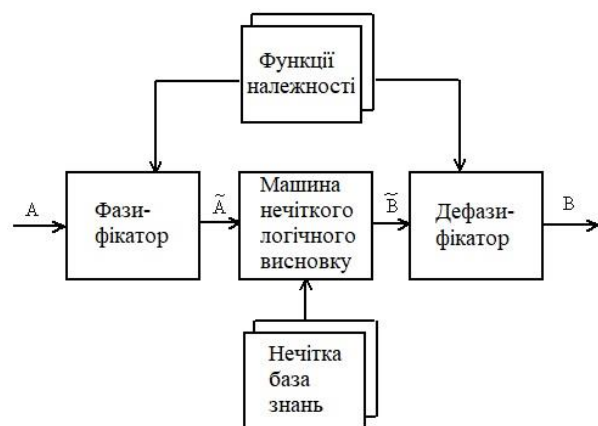


Рис. 1. Схема нечіткого логічного висновку

де  $A$  – вхідний чіткий вектор;  $\tilde{A}$  – вектор нечітких множин, що відповідає вхідному вектору  $A$ ;  $\tilde{B}$  – результат логічного виведення у вигляді вектора нечітких множин;  $B$  – вихідний чіткий вектор [3].

## 2 Розробка принципів керування переміщенням БПЛА

Фаззифікатор переводить простір входів, який звичайно описує простір в напрямку руху БПЛА, в нечіткий формат. Для опису простору в напрямку руху БПЛА використовуються вхідні сигнали датчиків. Простір в напрямку руху БПЛА поділено на п'ять секторів, в яких аналізується наявність перешкод та відстань до них. Тому введено три вхідні лінгвістичні змінні – дві для аналізу розташування перешкоди та одна для аналізу відстані до перешкоди.

Розробка системи керування переміщенням БПЛА для подолання перешкод включає наступні кроки.

*Крок 1.* Введення вхідної ЛЗ, що описує відстань до перешкоди («Відстань») та розбиває значення, що виражаються термами: «близько», «середня відстань», «далеко».

*Крок 2.* Введення вхідної ЛЗ, що описує розташування перешкод в горизонтальній площині («Горизонталь») та розбиває значення, що виражаються термами: «ліворуч», «попереду», «праворуч».

*Крок 3.* Введення вхідної ЛЗ, що описує розташування перешкод в вертикальній площині («Вертикаль») та розбиває значення, що виражаються термами: «зверху», «попереду», «знизу».

*Крок 4.* Побудова функцій належності термів ЛЗ «Відстань», «Горизонталь» та «Вертикаль». Кожне нечітке число представлено трикутними (1) або трапецієподібними (2) упорядкованими дійсними числами та задано функцією належності (рис. 2, 3):

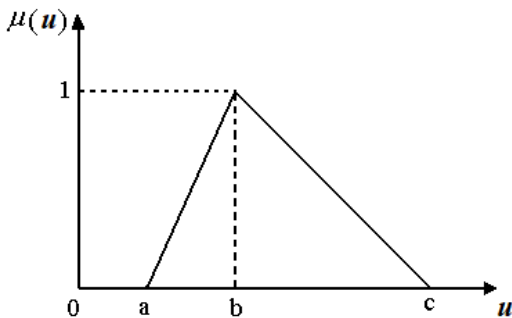


Рис. 2. Функція належності трикутного нечіткого числа

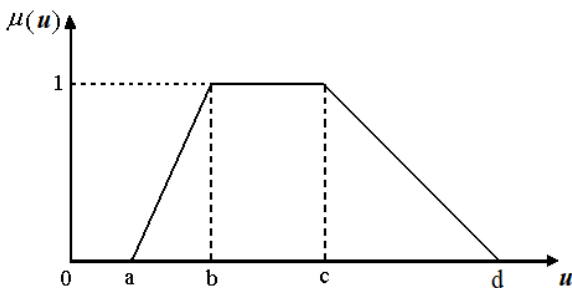


Рис. 3. Функція належності трапецієподібного нечіткого числа

$$\mu(u) = \begin{cases} 0, & u \leq a, u \geq c, \\ \frac{u-a}{b-a}, & a \leq u \leq b, \\ \frac{c-u}{c-b}, & b \leq u \leq c, \end{cases} \quad (1)$$

де  $a \leq b \leq c$ ,  $(a, c)$  – носій нечіткого числа,  $b$  – мода нечіткого числа,  $u$  – елемент з множини  $U$ ,  $\mu(u)$  – функція належності [3],

$$\mu(u) = \begin{cases} 0, & u \leq a, u \geq d, \\ \frac{u-a}{b-a}, & a \leq u \leq b, \\ 1, & b \leq u \leq c, \\ \frac{d-u}{d-c}, & c \leq u \leq d, \end{cases} \quad (2)$$

де  $a \leq b \leq c \leq d$ ,  $(a, d)$  – носій нечіткого числа,  $[b, c]$  – ядро нечіткої множини.

Побудова функцій належності термів ЛЗ була здійснена в середовищі пакету Fuzzy Logic Toolbox, що є розширенням пакету MATLAB. Функція належності термів ЛЗ «Відстань», «Горизонталь» та «Вертикаль» показано на рис. 4-6 відповідно.

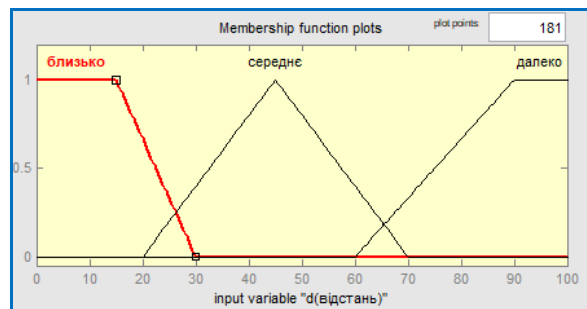


Рис. 4. Функція належності термів ЛЗ «Відстань»

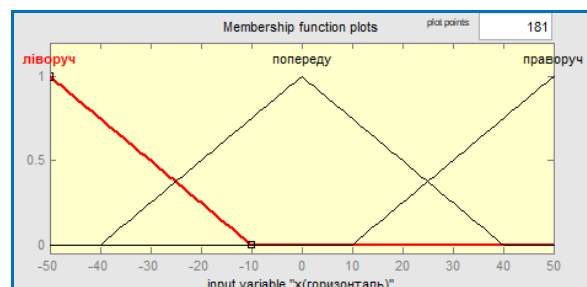


Рис. 5. Функція належності термів ЛЗ «Горизонталь»

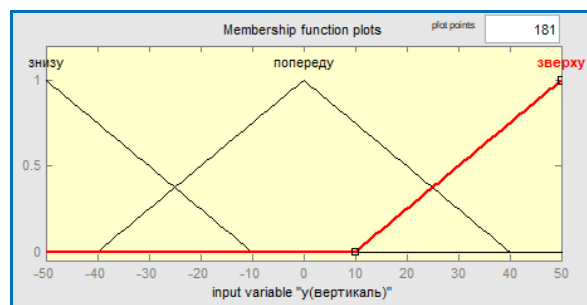


Рис. 6. Функція належності термів ЛЗ «Вертикаль»

Крок 5. Введення вихідної ЛЗ, що описує кут ризику БПЛА («Кут») та розбиває значення, що виражаються термами: «ліворуч», «на місці», «праворуч».

Крок 6. Введення вихідної ЛЗ, що описує швидкість руху БПЛА («Швидкість») та розбиває значення, що виражаються термами: «на місці», «повільно», «швидко».

Крок 7. Введення вихідної ЛЗ, що описує зміщення БПЛА по вертикалі («Висота») та розбиває значення, що виражаються термами: «вниз», «на місці», «вгору».

Крок 8. Побудова функцій належності термів ЛЗ «Кут» (рис. 7), «Швидкість» (рис. 8) та «Висота» (рис. 9).

Інтерфейс редактора FIS (Fuzzy Inference System Editor) для системи нечіткого виводу типу Мамдані зображено на рис. 10. На цьому ж рисунку показано параметри нечіткої моделі та метод дефазифікації.

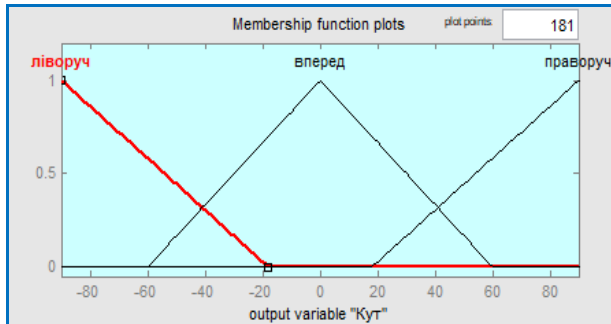


Рис. 7. Функція належності термів ЛЗ «Кут»

Крок 9. Складання нечітких продукційних правил виду: якщо «значення вхідних змінних», то «значення вихідних змінних» на основі логічного аналізу (рис. 11).

Крок 10. Перевірка та аналіз результатів розробленої нечіткої системи керування переміщенням безпілотного літального апарата для подолання перешкод.

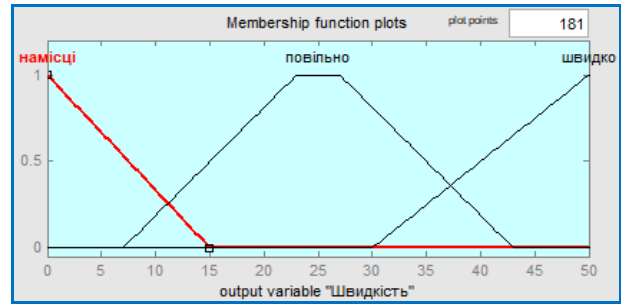


Рис. 8. Функція належності термів ЛЗ «Швидкість»

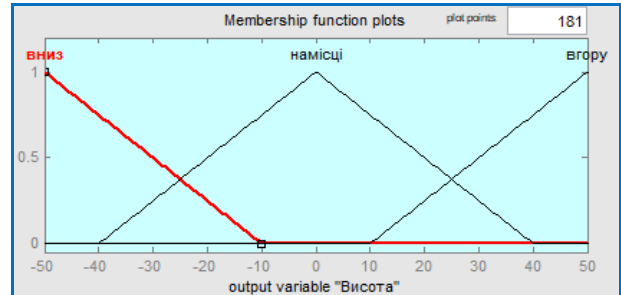


Рис. 9. Функція належності термів ЛЗ «Висота»

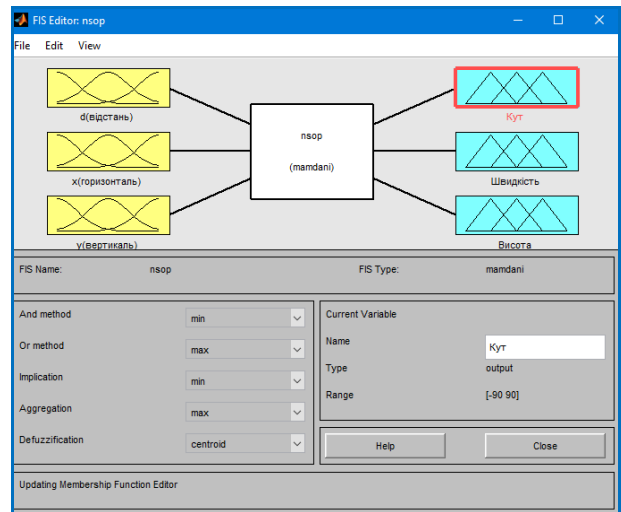


Рис. 10. Інтерфейс редактора FIS для системи нечіткого виводу

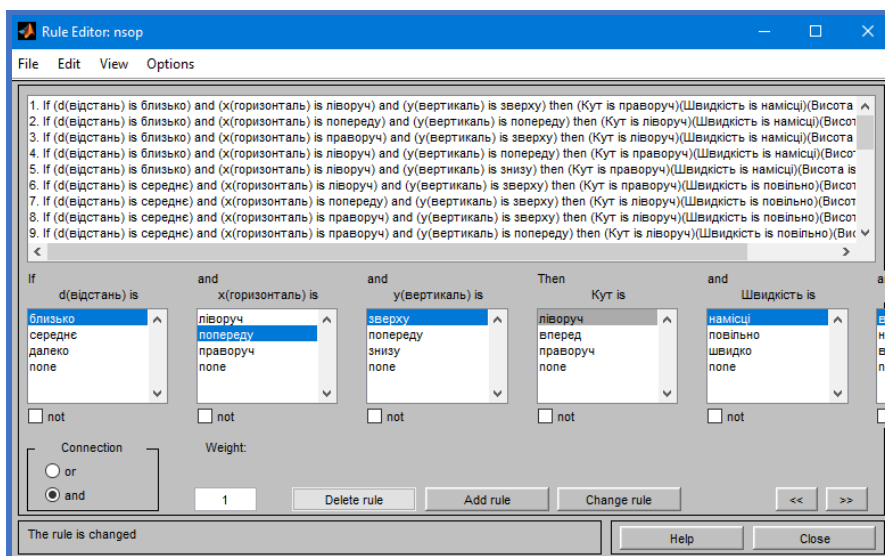


Рис. 11. Продукційні правила

### 3 Аналіз результатів створеної нечіткої системи

До складу пакету Fuzzy Logic Toolbox входить програма перегляду правил системи нечіткого виведення (Rule Viewer). Такий засіб перегляду правил виводу дає можливість проаналізувати результати створеної нечіткої системи. На рис. 12 показано головне вікно Rule Viewer. Воно складається з декількох графічних вікон, кількість рядків відповідають числу правил нечіткого висновку, а кількість стовп-

ців – числу вхідних і вихідних змінних, заданих в системі нечіткого висновку. Проаналізуємо різноманітні комбінації вхідних та вихідних змінних. Як видно з рис. 12, якщо перешкода розташована близько до БПЛА, ліворуч та знизу, то треба повернути праворуч, рухатися на невеликій швидкості та піднятися вище для обминання перешкоди. Як видно з рис. 13, якщо перешкода розташована далеко від БПЛА, праворуч та безпосередньо перед БПЛА, то треба повернути ліворуч, рухатися швидко та піднятися вище для обминання перешкоди.

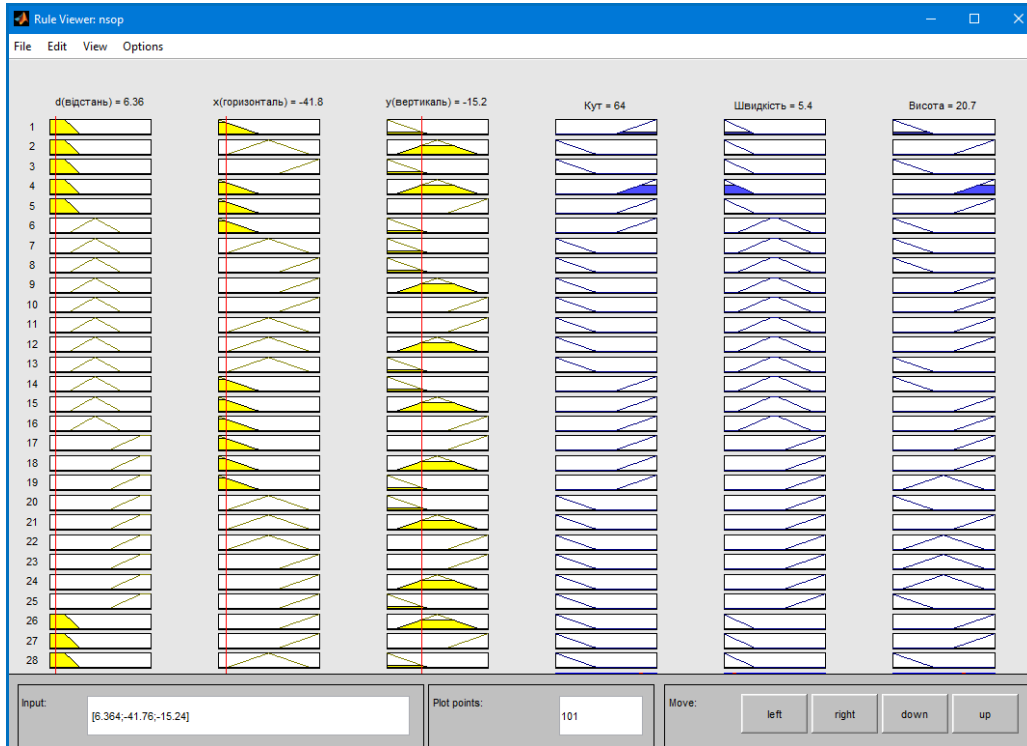


Рис. 12. Аналіз результатів при близько розташованій перешкоді

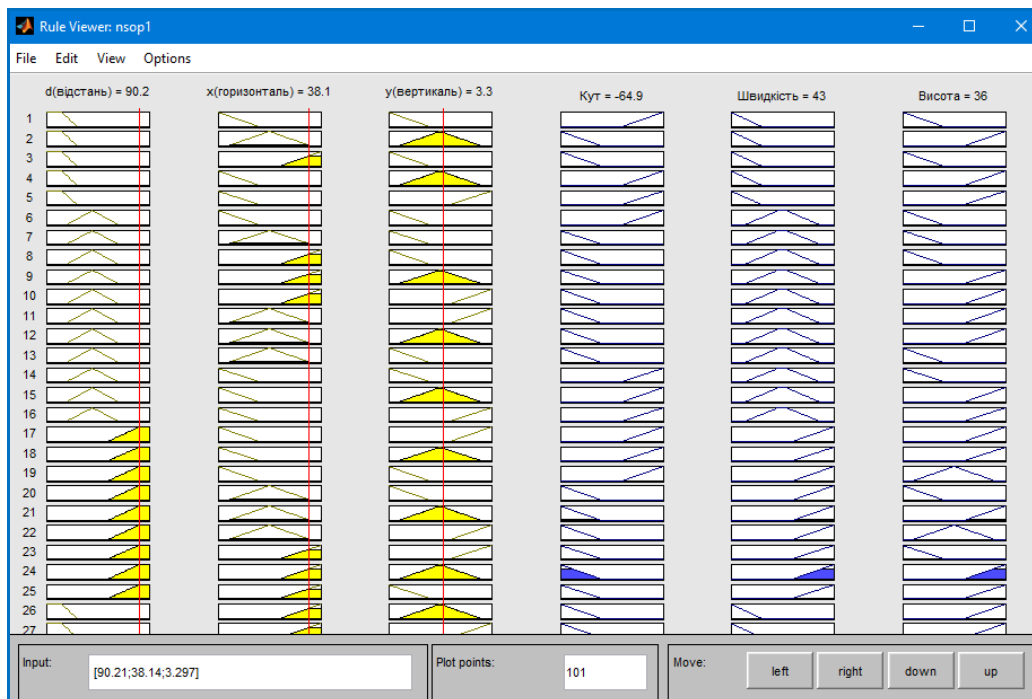


Рис. 13. Аналіз результатів при далеко розташованій перешкоді

Пакет Fuzzy Logic Toolbox дає можливість проаналізувати результати створеної нечіткої системи за допомогою програми перегляду поверхні системи нечіткого виведення (Surface Viewer). З рис. 14 видно, що чим менше відстань до перешкоди, тим менше швидкість та навпаки.

Таким чином, наведені на рисунках 12-14 результати говорять про адекватність розробленої нечіткої системи подолання перешкод для БПЛА.

### Висновки

Розроблена у цій статті система запобігання зіткненню БПЛА з перешкодами на основі апарату нечіткої логіки відрізняється від відомих аналогів способом координації БПЛА, сукупністю керуючих правил.

Застосування апарату нечіткої логіки дозволяє успішно вирішувати завдання формування траєкторії руху БПЛА в залежності від розташування перешкоди та відстані до неї.

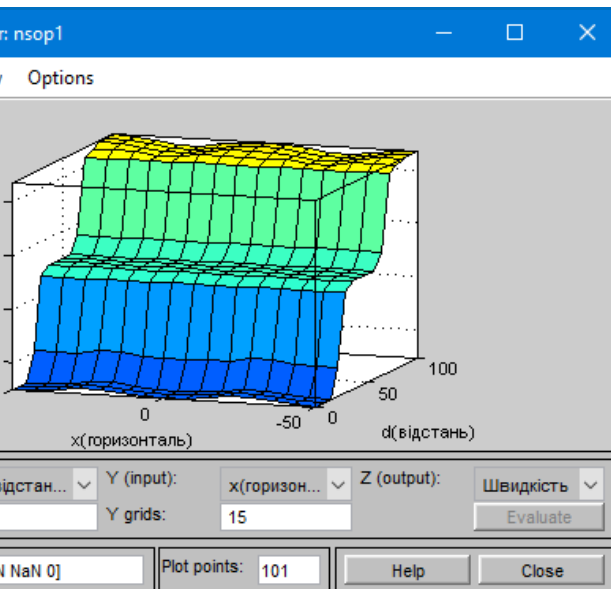


Рис. 14. Залежність швидкості від розташування перешкоди

Аналіз правил системи нечіткого виведення (Rule Viewer) та програми перегляду поверхні системи нечіткого виведення (Surface Viewer) свідчить про ефективність одержаних результатів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст]: пер. с англ. / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 168 с.
2. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст]: учеб. пособие / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов – М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. – 224 с.
3. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. – 288 с.
4. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями [Текст] / под ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. – 304 с.

Received (Надійшла) 11.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.05.2022

### Development of obstacle crossing system for unmanned aerial vehicle

Yulija Tolkunova

**Abstract.** Most existing unmanned aerial vehicles (UAV) are piloted using remote controls. However, when performing some works (geological, geodetic, rescue, exploration) there are restrictions related to the insufficient working range of the UAV. Therefore, there is a need for automatic control of the UAV. When automatically controlling the UAV, one of the tasks is to form the trajectory of the UAV, when performing geodetic, search and other works, including automatic maneuvering to bypass obstacles. In the absence of information on the exact location of obstacles, it is advisable to manage on the basis of fuzzy logic. The article presents a scheme of fuzzy inference. The set of values of fuzzy input linguistic variables (LV), output LV forms a fuzzy database, the set of rules of fuzzy products forms a fuzzy knowledge base. Each fuzzy number is represented by triangular or trapezoidal ordered real numbers and is given by the membership function. Input signals of sensors are used to describe the space in the direction of UAV movement. After bypassing the obstacle, the UAV can be navigated using GPS. The space in the direction of the UAV is divided into five sectors, which analyze the presence of obstacles and the distance to them. Three input linguistic variables were introduced - two for the analysis of the location of the obstacle (LV "Horizontal" and LV "Vertical") and one for the analysis of the distance to the obstacle (LV "Distance"). Regarding the output variables, depending on the location of the obstacle, the UAV will change the yaw angle, speed and height. Three source drugs were introduced - "Angle", "Speed" and "Height" and their membership functions were built. The base of fuzzy production rules of a kind is made: if "values of input variables", then "values of output variables". Mamdani fuzzy inference system is used. The Rule Viewer and the Surface Viewer Fuzzy Logic Toolbox analyzed the results of the fuzzy system. The approach developed in this article to prevent UAV collisions with obstacles based on the fuzzy logic apparatus differs from the known analogues in the way of UAV coordination, a set of control rules. The use of fuzzy logic allows you to successfully solve the problem of forming the trajectory of the UAV depending on the location of the obstacle and the distance to it.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, obstacle crossing system, linguistic variable, fuzzy logic.