

ՀՏԴ 531.8Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ**Ավետիք ԲԱՍՎՈՎՉԱՅՆ****Հայաստանում Եվրոպական համալսարանի ասպիրանտ****Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ, ավտոմատացման համակարգեր****Email: avik.baskovchyan@gmail.com****Ներսես ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ****Հայաստանի պոլիտեխնիկական համալսարանի ասպիրանտ****Կառավարում, կառավարման համակարգեր և դրանց տարրերը****Email: nerser987@gmail.com****Արմեն ԱՍԱՏՐՅԱՆ****Հայաստանի պոլիտեխնիկական համալսարանի հայցորդ****Կառավարում, կառավարման համակարգեր և դրանց տարրերը**

ԲԱԶՄԱՌՈՏՈՐ ԱՆՕԴԱԶՈՒ ԹՈՉՈՂ ՍԱՐՔԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԻՔՐԻԴԱՅԻՆ՝ ՈՉ ՀՍՏԱԿ- ՀԻԴ ԿԱՐԳԱՎՈՐԻՉԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ

Մույն հոդվածում ներկայացված է բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքի կառավարման համակարգ Ոչ Հստակ-ՀԻԴ (Fuzzy-PID) կարգավորիչի կիրառմամբ: Ներկայացված համակարգն ի տարբերություն առանձին ՀԻԴ և Ոչ հստակ համակարգերի հիբրիդային է և ինչպես ցույց տվեցին հոդվածի արդյունքներն առավել օգտակար, արագագործ և կայուն: Հոդվածում ներկայացված է նախագծված անօդաչու թռչող սարքի մաթեմատիկական մոդելը շարժման ուղղության և բարձրության կառավարման համար: Հոդվածում առաջարկվող մոտեցումը հնարավորություն է տալիս Ոչ հստակ տրամաբանության՝ ոչ հստակ օրենքների հիման վրա կարգավորել համեմատական ինտեգրող դիֆերենցող կարգավորիչի պարամետրերը, անօդաչու թռչող սարքին ապահովելով ցանալի ուղղությունն ու բարձրությունը: Մոդելի նպատակն է ստանալ ՀԻԴ կարգավորիչով աշխատող կառավարման համակարգի

առանձին փոփոխականների արժեքների փոփոխությունն ըստ արտաքին պայմանների՝ հաշվի առնելով վերջիններիս չսպասված արժեքները: Որպես Ոչ-հստակ կարգավորիչի մոտք, կարգավորիչը ստանում է անօդաչուի աշխատանքի արդյունքում ստացված ազդանշանի սխալանքը և այդ սխալանքի ածանցյալը, որպես ելք տալով ՀԻԴ կարգավորիչի P I և D փոփոխականների K_p , K_i և K_d արժեքները, որտեղ K_p -ն առանձին P , K_i -ը I , իսկ K_d -ն D կարգավորիչի գործակիցներն են սահմանված Ոչ-հստակ կարգավորիչի կողմից:

Բանալի բառեր՝ ոչ հստակ տրամաբանություն, ՀԻԴ, Matlab, Simulink, անօդաչու թռչող սարք, քառապտուտակ, հետադարձ կապ, ԲԱԹ-Մ, կարգավորիչ, կառավարման համակարգ, Fuzzy-PID

А.Басковчан, Н.Нерсисян, А.Асатрян
КОНСТРУКЦИЯ ГИБРИДНОГО НЕСПЕЦИАЛЬНОГО
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ
МУЛЬТИРОТОРНОГО БЛА

В данной статье представлена система управления мультироторным Беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с использованием Fuzzy-PID регулятора. Представленная система, в отличие от отдельных систем PID и Fuzzy-logic, является гибридной и, как показали результаты статьи, более полезной, быстрой и стабильной. В статье представлена математическая модель проектируемого БПЛА для управления направлением и высотой движения. Предлагаемый в статье подход дает возможность настраивать параметры регулятора сравнительного интегратора-дифференциатора на основе нечеткой логики, нечетких законов, обеспечивая требуемое направление и высоту полета Беспилотного летательного аппарата. Целью модели является получение изменения значений отдельных переменных системы ПИД-регулирования в зависимости от внешних условий с учетом изменения внешних условий. На вход нечеткий логический регулятор получает ошибку и производную от ошибки, выдавая на выходе значения K_p , K_i и K_d переменных P I и D ПИД-регулятора, где K_p - коэффициенты П-регулятора, K_i - это I и K_d регуляторов D .

Ключевые слова: Нечеткая логика, PID, Matlab, Simulink,

БПЛА, квадрокоптер, обратная связь, контроллер, система управления, Fuzzy-PID

A.Baskovchyan, N.Nersisyan, A.Asatryan
DESIGN OF A HYBRID FUZZY-PID CONTROLLER FOR
MULTIROTOR UAV CONTROL

This article presents a control system of a multi-rotor UAV using a Fuzzy-PID controller. The presented system, in contrast to separate PID and Fuzzy systems, is a hybrid, and as the results of the article showed, it is more useful, fast and stable. The article presents the mathematical model of the designed UAV for control of movement direction and altitude. The approach proposed in the article provides an opportunity to adjust the parameters of the proportional integrate-derivative controller based on Fuzzy Logic, Fuzzy Laws, providing the desired direction and height to the UAV. The purpose of the model is to obtain the change of the values of individual variables of the PID control system according to external conditions, considering the change of external conditions. As an input, the Fuzzy logic controller receives the error and the derivative of the error, giving as an output the values of K_p , K_i and K_d of the variables P , I and D of the PID controller, where K_p is the coefficients of the P controller, K_i is the I and K_d of the D controllers.

Key words: Fuzzy Logic, PID, Matlab, Simulink, UAV, Quadcopter, Feedback, Controller, Control System, Fuzzy-PID

Ներածություն

Ժամանակակից աշխարհում բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքերը (ԲԱԹՍ) իրենց ուրույն տեղն են գրավում առաջնային շատ ոլորտներում, ինչպիսիք են՝ տնտեսական, ռազմական, հետախուզական և այլն: Այդ իսկ պատճառով անհրաժեշտ է ունենալ ԲԱԹՍ-ի կառավարման ապահով և ճշգրիտ համակարգ, որը հնարավորություն կտա ավտոմատ կառավարման միջոցով հասնել ցանկալի արդյունքին: Որպես կառավարման համակարգ բազմաթիվ հետազոտություններ են կատարվել, որոնց մոտեցումները ներկայացված են ստրև:[1]-ում հեղինակն առաջարկել է հարմարվողական դինամիկ կարգավորիչ՝ քառակուսուրդի հետազոտման առաջադրանքներն իրականացնելու համար՝ վերահսկելով բարձրությունը հարմարվող դինամիկ կարգավորիչի միջոցով, որն ի վիճակի է նվազեցնել հետևելու սխալները և հաղթահարել անորոշ պարամետրերը: Որոշ հետազոտողներ օգտագործել են երկրորդ կարգի SMC մեթոդը՝ բարձրության վերահսկման ցուցանիշները բարելավելու համար [2-4]: Հաշվի առնելով այն հանազամանքը, որ ՀԻԴ կարգավորիչի նախագծումն ու կարգաբերումը համեմատաբար պարզ

գործընթաց է, բազմաթիվ գիտնականներ իրենց աշխատանքներում ներկայացրել են առանձին ՀԻԴ կարգավորիչով կառավարման համակարգեր [5-6]: Պարզ և արագ նախագծման առավելություն ունենալուց բացի ՀԻԴ կարգավորիչն ունի կառավարման որակի սահմանափակում՝ հաշվի առնելով հստակ նախանշված գործակիցները, որոնք փոփոխման ենթակա չեն աշխատանքի ընթացքում: Հստակ գործակիցների խնդիրները վերացնելու համար կարգավորիչի մեկ այլ՝ հիբրիդ տարբերակ է առաջակվում, որտեղ ոչ հստակ տրամաբանության միջոցով թոփաքի ընացքում հաշվի առնելով հետադարձ կապի սխալանքը նախապես տրված ոչ հստակ օրենքների հիման վրա կատարվում է ՀԻԴ կարգավորիչի պարամետրերի փոփոխում՝ ըստ սենսորային արժեքների: Այդ իսկ պատճառով ինքնակարգավորվող ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչ է ներկայացվել [7]-ում, որտեղ ներկայացված ՀԻԴ կարգավորիչը կարգաբերվել է ոչ հստակ տրամաբանության օրենքներով:

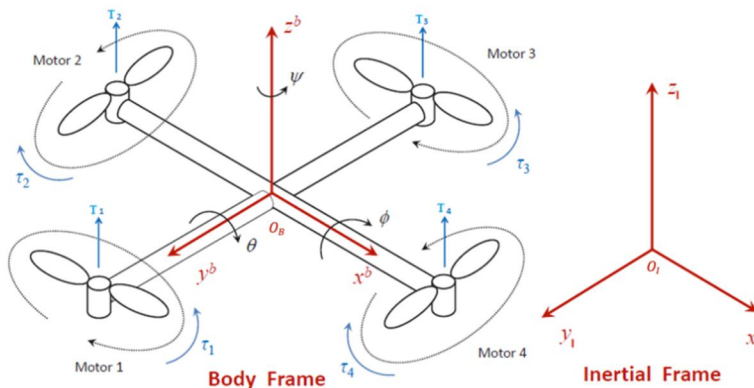
Հոդվածում ներկայացված են բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքի մաթեմատիկական մոդելը, աշխատանքի սկբունքը, դինամիկ և կինեմատիկ հավասարումները և ստացված արդյունքները: Անօդաչու թռչող սարքի նախագծում ու աշխատանքի մոդելավորումը կատարվել է Matlab ծրագրային ապահովման Simulink միջավայրի միջոցով:

Գիտական նորույթ

Սույն աշխատանքում ներկայացված ԲԱԹՄ-ի իրական պարամետրերին համապատասխան՝ մոդելը ճշգրտորեն համապատասխանում է DJI Mavic 2 բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքի պարամետրերին: Աշխատանքի ընթացքում դուրս են բերվել իրական դրոնին համապատասխան փոխանցման և պատկանելության ֆունկցիաները, որոնք կիրառելի են իրական կյանքում: Ուսումնասիրված գրականության մեջ նմանատիպ ԲԱԹՄ-ին համապատասխան հիբրիդային՝ ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչ չի նկատվել, ուստի իրական դրոնի հիման վրա նախագծված հետադարձ կապով հիբրիդային համակարգը նորույթ է:

ԲԱԹՄ-ի Մաթեմատիկական նկարագիր

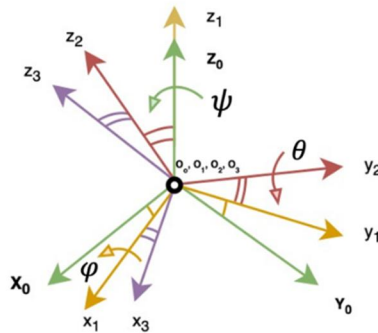
Բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքն ունի ազատության 6 աստիճան [8], այդ աստիճանների ճիշտ ներկայացման համար պարտադիր պայման է ունենալ ԲԱԹՄ-ի ճշգրիտ մաթեմատիկական մոդելը: Սույն հոդվածում անօդաչուի շարժման հավասարումների մաթեմատիկական մոդելը հիմնված է Նյուտոն-Էյլերի հավասարումների վրա, և այն նկարագրվում է որպես կոշտ մարմին, որից ընտրվում է մարմնին կոշտ ամրակցված համակարգ, որի հաշվարկները կատարվում են մեկ այլ իներցիալ համակարգի համեմատությամբ: Համակարգերը ցուցադրված են նկ 1-ում:



Նկ. 1 Մարմնին կոշտ ամրակցված և իներցիալ համակարգեր

Նկ. 1-ում ցուցադրված մարմնի կոշտ ամրակցված համակարգի ($O_B X_B Y_B$) ծանրության կենտրոնը համընկնում է քառապտուտակի ծանրության կենտրոնին, որին համապատասխան իներցիալ համակարգը ներկայացված է՝ ($O_I X_I Y_I$) առանցքներով, որի նկատմամբ շարժումը համապատասխանում է երկրագնդի նկատմամբ շարժմանը:

Ինչպես ներկայացված է [9] հոդվածում, այնպես էլ այս աշխատանքում շարժումը ներկայացվում է X-Z-Y առանցքներով, որը ստացվում է Էյլերի պտույտներից և մատրիցից: Համակարգի դինամիկայի հավասարումները ստանալու և կիրառելու համար անհրաժեշտ է ներկայացնել մի համակարգից մյուսին անցումները ($O_B \rightarrow O_I, O_I \rightarrow O_B$), որի համար կիրառվել են Էյլերի պտույտները՝ համապատասխան պտտման մատրիցներով: Էյլերի անկյունները նկարագրվում են որպես որոշակի առանցքների շուրջ հաջորդական պտույտներ: Իներցիալ համակարգի Z առանցքի շուրջ պտույտը նկարագրվում է ψ անկյունով, որից ստացվում է նոր P_1 անցումային համակարգը: Նոր ստացված P_1 շրջանային համակարգի X_P1 առանցքի շուրջ պտույտը նկարագրվում է ϕ պտտման անկյունով, որից ստացվում է նոր P_2 անցումային համակարգը: Ստացված նոր P_2 անցումային համակարգի Y_P2 առանցքի շուրջ պտույտը նկարագրվում է θ անկյունով, որն իր հերթին համընկնում է O_B անցումային համակարգին, որը կոշտ ամրակցված է քառապտուտակի մարմնին: Այսպիսով, ψ - ϕ - θ պտույտները ներկայացվում են z-x-y հաջորդականությամբ: Էյլերի պտույտներից ստացված մատրիցը ներկայացված է բանաձև 1-ում, իսկ Էյլերի պտույտները ցուցադրված են՝ նկ. 2-ում:



Նկ 2. Էյլերի պտույտներ

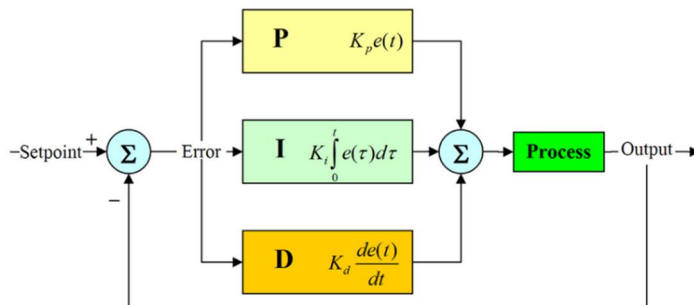
Էյլերի պտույտների հիման վրա ստացված մատրից $O_B \rightarrow O_I$ համակարգերի անցման դեպքում՝

$$R_{B \rightarrow I} = \begin{pmatrix} c\theta c\psi - s\phi s\psi s\theta & -c\phi s\psi & c\phi s\theta + c\theta s\phi s\psi \\ c\theta s\psi + c\psi s\phi s\theta & c\phi c\psi & s\psi s\theta - c\psi c\phi s\psi \\ -c\phi s\theta & s\phi & c\phi c\theta \end{pmatrix}, (1)$$

որտեղ՝ $cx = \cos(x)$, $sx = \sin(x)$:

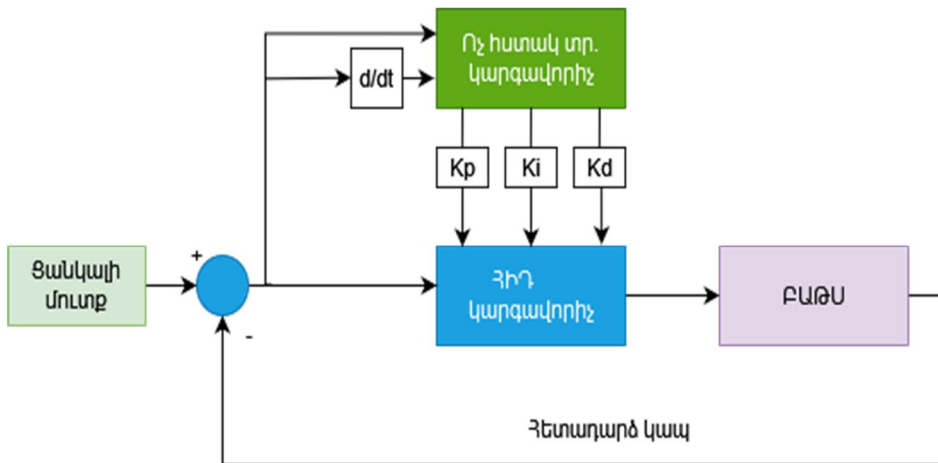
Ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչ

Ինչպես արդեն նշվեց, պարզագույն ՀԻԴ կարգավորիչն ունի կայունության և համապատասխանության խնդիրներ, այսինքն՝ կախված պայմաններից՝ ՀԻԴ կարգավորիչի համար նախապես ընտրված պարամետրերը փոփոխության ենթակա չեն, ուստի կառավարման համակարգի կայունությունը կարող է խախտվել: Այդ իսկ պատճառով ՀԻԴ կարգավորիչի 3 գործակիցները՝ K_p , K_i , K_d , կարգաբերվում են ըստ թռիչքի ընթացքում հետադարձ կապի սխալանքի: ՀԻԴ կարգավորիչի տրամաբանական բլոկ-սխեման ներկայացված է նկ 3-ում՝



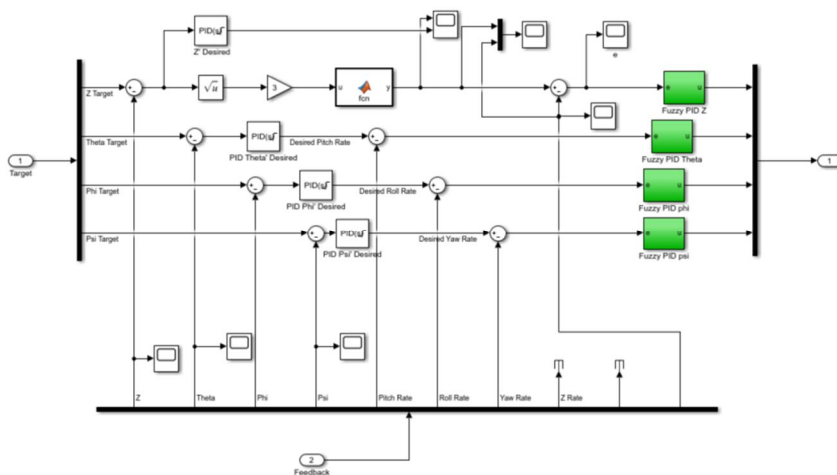
Նկ. 3 ՀԻԴ համակարգի տրամաբանական բլոկ-սխեմա

Ինչպես երևում է նկ. 3-ից, ՀԻԴ համակարգի P , I , D տարրերն ունեն K_p , K_i , K_d գործակիցներ, որոնց ավտոմատ հաշվարկը ոչ-հստակ տրամաբանությամբ կարգավորիչի ֆունկցիան է: Ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչի տրամաբանական բլոկ սխեման ներկայացված է նկ 4-ում:



Նկ. 4. Ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչի տրամաբանական բլոկ սխեման

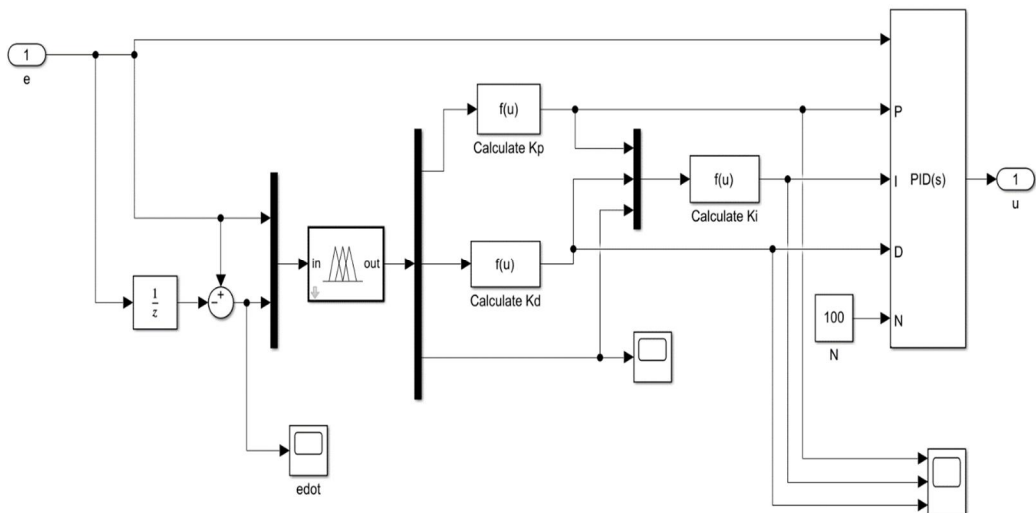
Նկար 4-ում պատկերված տրամաբանական բլոկ սխեման ցույց է տալիս, որ հետադարձ կապով համակարգի աշխատանքի արդյունքում մուտքին եկած սխալանքի արժեքները հաշվի առնելով՝ ոչ հստակ տրամաբանությամբ համակարգը կարգաբերում է ՀԻԴ կարգավորիչի մուտքային գործակիցները: Այս հոդվածում ներկայացվող ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչի Simulink մոդելը ներկայացված է՝ նկ 5-ում:



Նկ 5. Ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչ

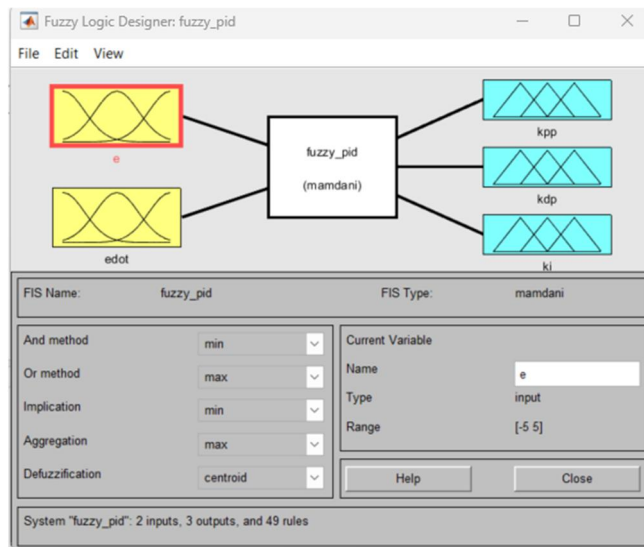
Ինչպես երևում է նկ. 5 -ից, կարգավորիչը, ստանալով անհրաժեշտ մուտքը և բացասական հետադարձ կապով ստացված սխալանքի արժեքը, աշխատում է առանձին z, roll, pitch, yaw արժեքների համար, այսինքն՝ կախված թռիչքի ընթացքում ստացված արդյունքներից ՀԻԴ համակարգի առանձին պարամետրերը ենթակա են փոփոխման և ճշգրտման: Բարձրության

կառավարման համար ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչը ներսից ներկայացված է նկ6-ում:



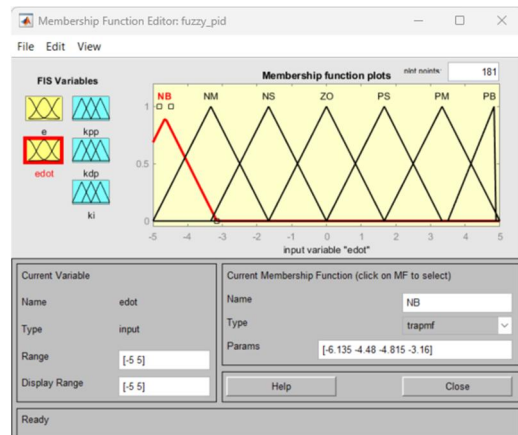
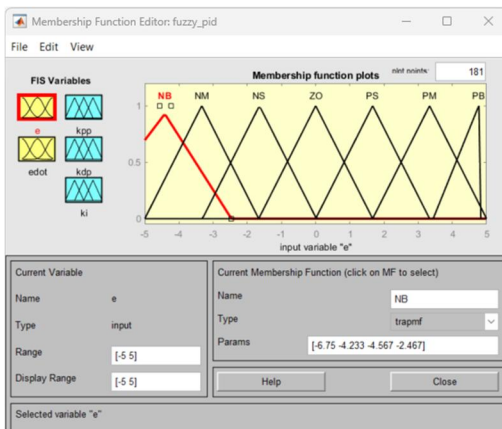
Նկ. 6: Բարձրության կառավարման ոչ հստակ-ՀԻԴ կարգավորիչ

Նկ. 6-ում ցուցադրված կարգավորիչը ներառում է ոչ հստակ տրամաբանությամբ կարգավորիչ և հաշվարկային ֆունկցիաներ՝ K_p , K_i , K_d արժեքների համար, որոնց միջոցով 0-1 ոչ հստակ տրամաբանությամբ միջակայքը վերածում է ՀԻԴ կարգավորիչի գործակիցների որոշակի արժեքային տիրույթի: Ոչ հստակ տրամաբանությամբ կարգավորիչը կառավարվում է պատահականության ֆունկցիաներով և ոչ հստակ օրենքներով, որոնց միջոցով կատարվում է պատկանելության ֆունկցիայի ընտրությունը: Պատկանելության ֆունկցիան՝ ներկայացված Matlab ծրագրային համակարգի Fuzzy logic toolbox-ի միջոցով, ներկայացված է նկ 7.-ում:

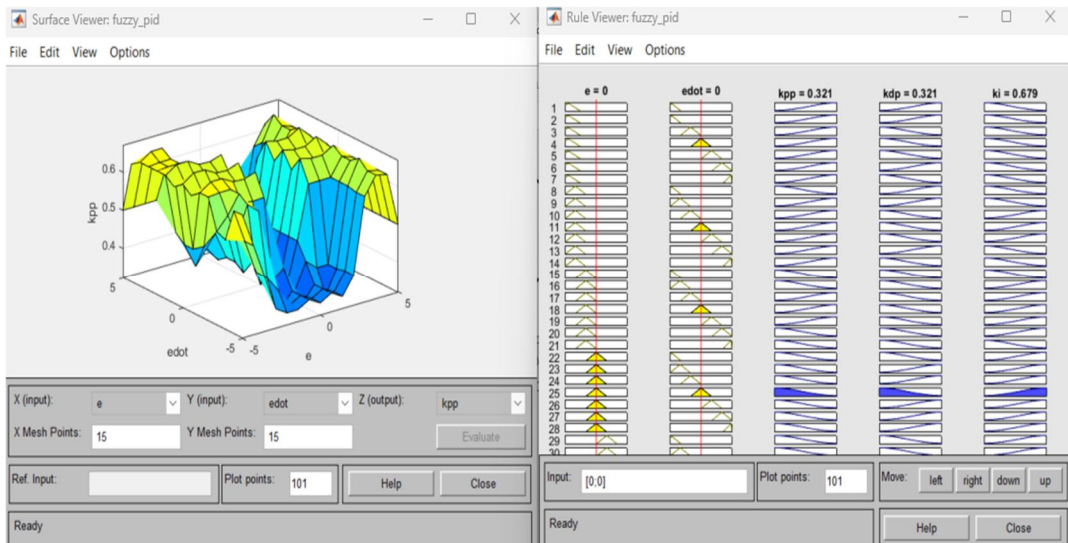


Նկ 7. fuzzy_pid պատկանելության ֆունկցիան

Նկ. 7-ում պատկերված պատկանելության ֆունկցիայի գրաֆիկական տեսքը ցույց է տալիս, որ ոչ հստակ համակարգը, ստանալով e և $edot$ արժեքները հաշվարկում է ելքայի K_p , K_i , K_d ՀԻԴ համակարգի պարամետրերը, ինչպես ներկայացված է նկ. 4-ում: K_{pp} , k_{dp} , K_i gaussmf-ներ են ներկայացված 0-1 միջակայքում, իսկ մուտքային e և $edot$ ֆունկցիաները ներկայացված են նկ. 8-ում՝



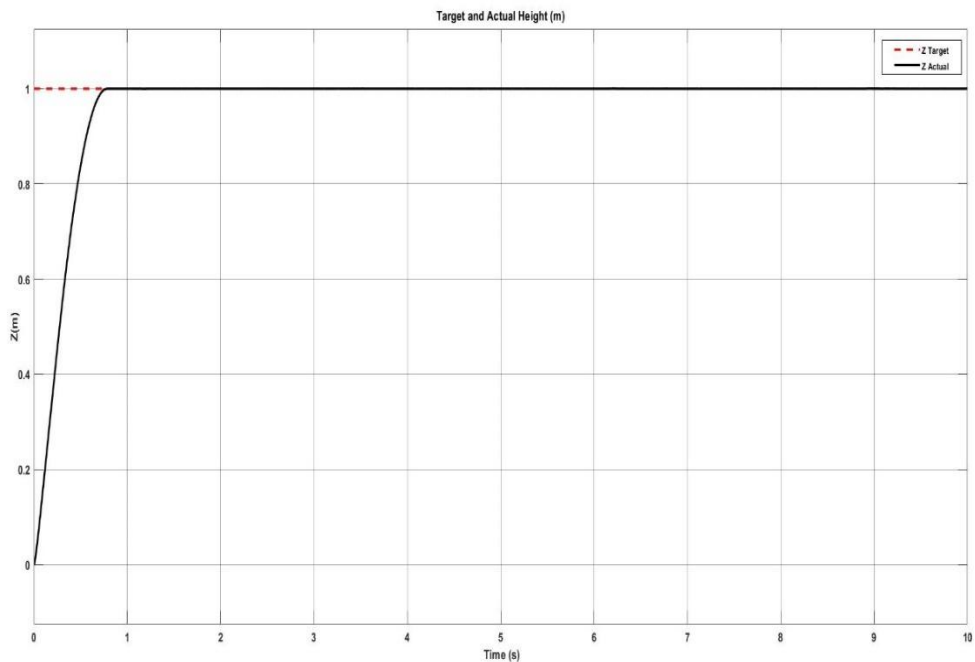
Նկ 8. Մուտքային պատկանելության ֆունկցիաներ
Ներկայացված ոչ հստակ կարգավորիչը կառավարվում է ոչ հստակ օրենքների միջոցով, որոնք ցուցադրված են նկ. 9-ում.



Նկ 9. Ոչ հստակ օրենքեր

Ստացված արդյունքներ

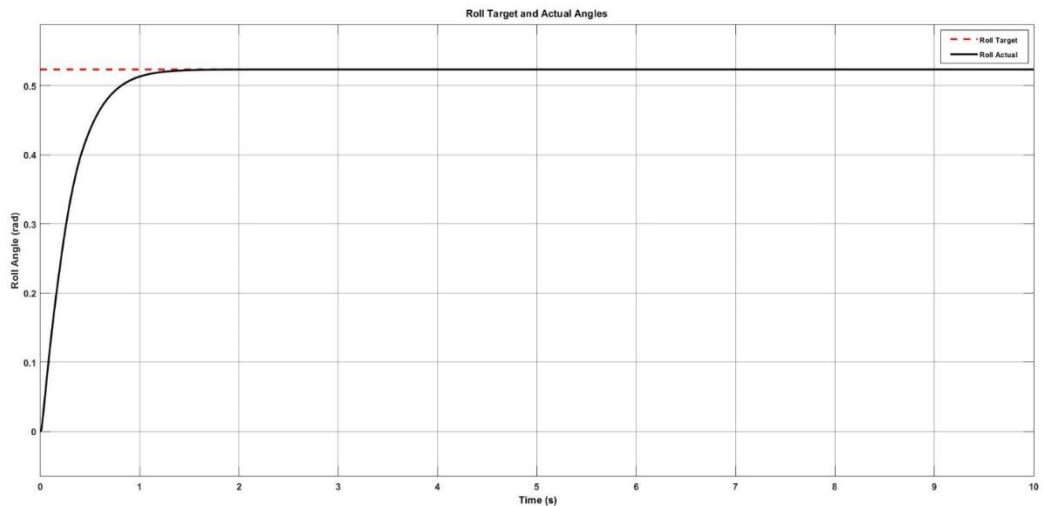
Աշխատանքի կատարման արդյունքում ստացված գրաֆիկները պատկերված են ստորև: նկ 10-ում ցուցադրված է 1մ բարձրությամբ մուտքային ազդանշանի դեպքում ԲԱԹՄ-ի աշխատանքի արդյունքը:



Նկ. 10. Z փոփոխականի արդյունքները, բարձրության կախումը ժամանակից

Ինչպես երևում է նկ. 10-ից, քառապտուտակի աշխատանքը ստուգվել է 0-10 վայրկյան միջակայքում՝ 1 մ մուտքային, ցանկալի արժեքի համար, թռիչքի կայունացումը հաջողվել է 0,75վ-ում, իսկ գերկարգավորումը բացակայում է, այսպիսով՝ ստացված արդյունքը բավարար է, և համակարգը կայուն է:

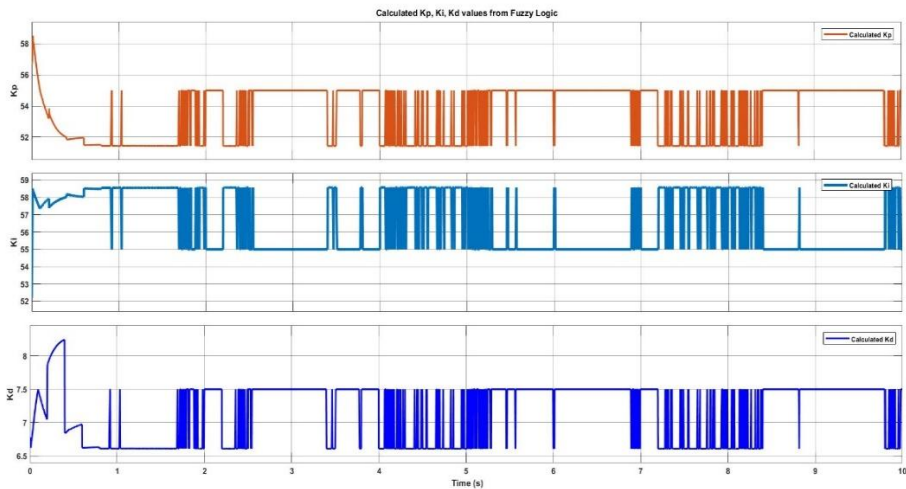
Նկ. 11-ում ներկայացված է roll անկյան կախվածությանը ժամանակից պատկերող գրաֆիկը:



Նկ. 11. Roll պտույտի կախումը ժամանակից

Նկ. 11-ում ցուցադրված արդյունքը բավարար է՝ ընդունելու համար, որ ԲԱՍԹ-ի աշխատանքը roll անկյան 30 աստիճան պտույտի դեպքում կայուն է և անխափան: Հաստատման ժամանակը 0,81վ է:

Ներկայացված արդյունքները ոչ հստակ-ՀԻԴ համակարգի արդյունքներն են, որտեղ ՀԻԴ համակարգի Kp, Ki, Kd գործակիցները իրական ժամանակում կարգաբերվում են ոչ հստակ տրամաբանության կողմից: Կարգաբերված արժեքները ցուցադրված են նկ 12-ում:



Նկ. 12. Ոչ հստակ տրամաբանության կողմից հաշվարկված K_p , K_i , K_d արժեքները

Եզարակացություն

Ոչ հստակ տրամաբանության կարգավորիչի կիրառմամբ ԲԱԹՍ-ի համար նախագծված կառավարման համակարգը կայուն է և լավարկում է ՀԻԴ կարգավորիչի աշխատանքը՝ վերածելով համակարգը ադապտիվ տեսակի, ինչը թույլ է տալիս խուսափել ՀԻԴ համակարգի գլխավոր խնդրից, այն է՝ փոփոխվող արտաքին պայմանների դեպքում համակարգի կայունության ապահովումը: Հոդվածում ներկայացված արդյունքերն ամբողջովին բավարարում են տրված խնդրի պահանջները:

Գրականություն

1. M. Santos and J. Sarapura, An adaptive dynamic controller for quadrotor to perform trajectory tracking tasks, *Journal of Intell. Robot. Syst.*, vol. 93, pp. 5–16, 2019.
2. S. Nadda and A. Swarup, Improved quadrotor altitude control design using second-order sliding mode, *Journal of Aerosp. Eng.*, vol. 30, 2017.
3. N. Moawad and A. M. Sarhan, Adaptive PID sliding surface- based second order sliding mode controller for perturbed nonlinear systems, in *Proc. the 12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, Cairo, Egypt, 2017.
4. I. González, S. Salazar, and R. Lozano, Chattering-free sliding mode altitude control for a quad-rotor aircraft:

- Real-time application, *Journal of Intell. Robot. Syst.*, vol. 73, pp. 137–155, 2014.
5. N. P. Nguyen and S. K. Hong, Fault-tolerant control of quadcopter UAVs using robust adaptive sliding mode approach, *Energies Journal*, vol. 12, no. 95, 2019.
 6. H. Thanh, S. Hong, Quadcopter robust adaptive second order sliding mode control based on PID sliding surface, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 66850–66860, 2018.
 7. D. Gautam and C. Ha, Control of a quadrotor using a smart self- tuning fuzzy PID controller, *International Journal of Adv.Robot. System*, vol. 10, 2013
 8. A. Hussein, R. Abdalla, Autopilot Design for a Quadcopter, Thesis for: B.ScAdvisor: Prof.Sharief Fadul Babikir, 2017
 9. A. SAFARYAN, N. VARDANYAN, A. BASKOVCHYAN, N. NERSISYAN, T. SIMONYAN, Design of UAV control system with fuzzy logic controller and its importance in the economy, *ALTERNATIVE quarterly academic journal* 2022 #4 (October – December), pp 27-32, 2022:

Նյութը ներկայացվել է 25.04.2023,

գրախոսման է ուղարկվել 25.05.2023,

տպագրության ընդունվել 22.06.2023:

Հոդվածը տպագրության է երաշխավորել խմբագրական խորհրդի անդամ, ֆ.մ.գ.թ. Գ.Հ.Սահակյանը: