

**ՏԱԿԱԳԻ-ՍՈՒՋԵՆՈՅԻ ՈՉ ՀՍՏԱԿ ՏՐԱՄԱԲԱՆՈՒԹՅԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ
ԲԱԶՄԱՌՈՏՈՐ ԱՆՕԴԱԶՈՒ ԹՌՉՈՂ ՍԱՐՔԻ ԽԱՓԱՆԱԿԱՅՈՒՆ
ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ՍԵՆՍՈՐԱՅԻՆ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԴԵՊՐՈՒՄ**

<https://doi.org/10.59982/18294359-23.14-ts-17>

Ավետիք Գագիկի Բասկովչյան

ասպիրանտ

ՀԵՀ, ՏՏ և կիրառական մաթեմատիկայի ամբիոն

avik.baskovchyan@gmail.com

Ամփոփագիր

Սույն հոդվածում ներկայացված է բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքի խափանակայուն համակարգ՝ կրիտիկական սենսորների խափանումների բացահայտման և կառավարման համար: Որպես կառավարման ալգորիթմ օգտագործվել է Տակագի-Սուլջենյոյի ոչ հստակ տրամաբանության մեթոդը: Նախագծված ԲԱԹՍ-ի բարձրության սենսորի խափանման դեպքում խափանակայունության կարգավորումը կատարվում է օդի ճնշման չափման սենսորի գրանցած արդյունքներից իրական բարձրության հաշվարկի միջոցով: Ներկայացված համակարգը խափանակայունություն է ապահովում ոչ միայն բարձրության, այլ նաև երկայնաճոճման, ընթացաշեղման և կողաթեքման սենսորների համար: Խափանակայուն համակարգի թեստավորման համար MATLAB ծրագրային համալիրի Simulink փաթեթում նախագծվել է քառապտուտակ, որի չորս սենսորներին արհեստականորեն տրվել են ամբողջական խափանումներ՝ գրանցելով անօդաչուի վարքագիծը: Քառապտուտակի կառավարման համակարգի նախագծման ժամանակ հետադարձ կապով գծայնացում չի կիրառվել՝ սահմանափակումներից խուսափելու համար: Ցուցադրված մոդելը բաղկացած է հինգ հիմնական բլոկներից, որոնցից մեկը քառապտուտակի նկարագրությունն է Simulink միջավայրում: Առանձնացված են նաև խափանումների ավելացման, հայտնաբերման և կոմպենսացման բլոկները: Ուստի քառապտուտակի օրինակով նախագծված՝ սենսորային խափանումներով խափանակայուն համակարգը հարմար է կիրառել այլ տեսակ բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքերի համար: Անհրաժեշտ է ընդամենը փոփոխել անօդաչու թռչող սարքի բլոկը՝ համապատասխանեցնելով անհրաժեշտ պարամետրերին: Այսպիսով, ներկայացված աշխատանքը կիրառելի է և ճկուն:

Հիմնաբառեր: Ոչ-հստակ տրամաբանություն, MATLAB, Simulink, խափանակայունություն, խափանակայուն աշխատանք:

Ներածություն

Սույն հոդվածում ներկայացված են քառապտուտակի մաթեմատիկական և վերջինիս խափանակայուն աշխատանքի MATLAB մոդելները: Հայտնի են անօդաչու թռչող սար-

քերի (ԱԹՍ) մի քանի տեսակներ: Զվաղկուպտերը կամ քառապտուտակը բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքերի ընտանիքի տեսակներից մեկն է: Մեկ այլ տարատեսակ է ֆիքսված թևերով անօդաչու թռչող սարքը,

կան նաև մեկ ռոտորային և հիբրիդային անօդաչու թռչող սարքեր, ինչպես նաև հեքսակոպտեր և օկտոկոպտեր: Նշվածներն ունեն համապատասխանաբար երեք, վեց և ութ պտուտակներ: Աշխատանքը կատարվել է քառապտուտակի հիման վրա՝ վերջինիս ավելի լավ կայունացման մեխանիզմի և ավելի պարզ կառուցվածքի համար:

Բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքերի կառավարման համար տարիներ շարունակ գիտնականները տարատեսակ մեթոդներ են հետազոտել և մշակել: Գիտնականների կողմից առաջարկվել են բազմաթիվ մեթոդներ ԲԱԹՍ-ների և այլ համակարգերի կառավարման համար, որոնց կարևորագույն մասը կարգավորիչն է: Դրանցից որոշներն են՝ գծային-քառակուսային կարգավորիչ [Salih et al., 74-78], համեմատական ինտեգրող-դիֆերենցող (ՅԻԴ) [Jafar et al., 32-39], ոչ հստակ [Santos et al., 141-146] և այլն: Այս հետազոտության մեջ կօգտագործվի Տակագի-Սուլջենոյի մեթոդով ոչ հստակ տրամաբանությամբ կարգավորիչը, քանի որ այն լայնորեն օգտագործվում է և ունի գործնական կիրառություն:

Հոդվածում ներկայացված անօդաչու թռչող սարքի խափանակայուն աշխատանքն ապահովող մոդելը հիմնված է թռիչքի բարձրության, կողաթեքման, ընթացաշեղման և երկայնաճոճման սենսորների խափանումների բացահայտման և կոմպենսացման վրա: Բարձրության սենսորի խափանման դեպքում ընտրված է օդի ճնշման սենսորը՝ որպես վստահելի սենսոր, որի արժեքից բանաձև 2-ի միջոցով հաշվարկվում է ԲԱԹՍ-ի իրական բարձրությունը՝ կոմպենսացնելով խափանումը: Որպես բազիսային անօդաչու թռչող սարք հնարավոր է դիտարկել տարբեր տեսակի բազմառոտոր ԱԹՍ-ներ, քանի որ խափանա-

կայուն աշխատանքի ալգորիթմական ընդհանուր ներկայացումը առանձին է կատարվել, որը կցուցադրվի ստորև:

Խնդրի դրվածք

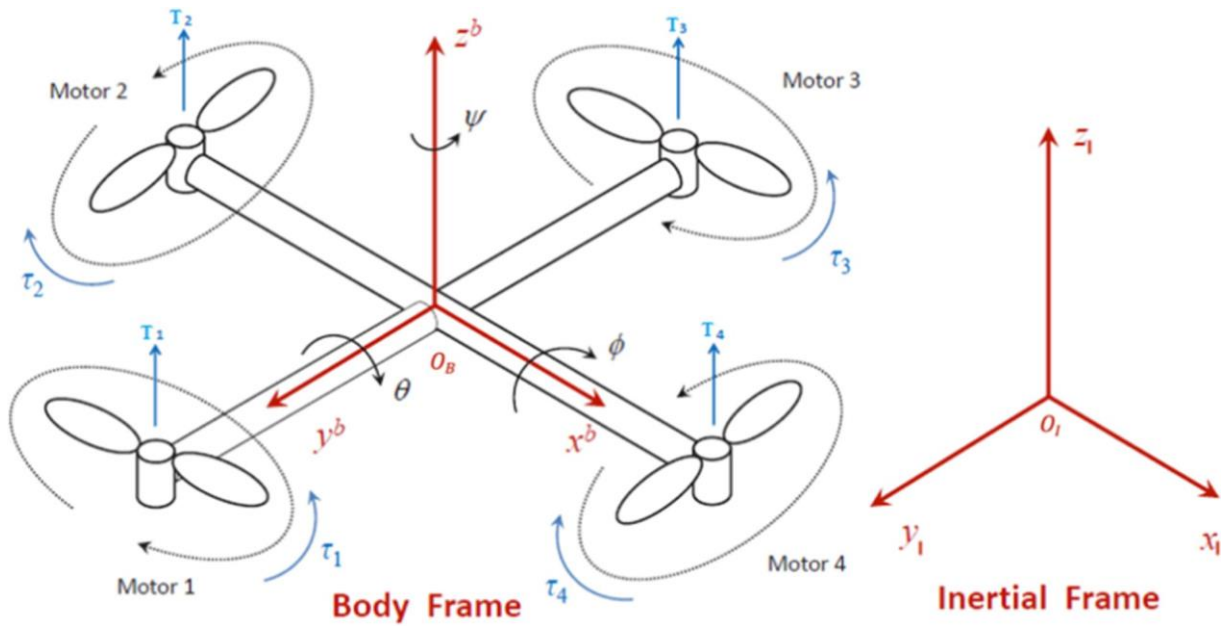
Աշխատանքի նպատակն է դուրս բերել քառապտուտակի շարժման դինամիկայի հավասարումները և մշակել սենսորային խափանումներով բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքի խափանակայուն կառավարման համակարգի ռոբաստ՝ MATLAB մոդել Տակագի-Սուլջենոյի ոչ հստակ տրամաբանության կիրառմամբ:

Խափանման ենթակա սենսորներ դիտարկել՝ բարձրության, երկայնաճոճման, ընթացաշեղման և կողաթեքման սենսորները:

Գրանցել ստացված խափանումները և կոմպենսացնել խափանված սենսորների սխալանքները՝ առողջ սենսորների միջոցով պահելով քառապտուտակի կայունությունը:

ԲԱԹՍ-ի մաթեմատիկական նկարագիր

Ինչպես հայտնի է բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարքն ունի ազատության 6 աստիճան [Santos, Sarapura, 5-16], որոնց ճիշտ ներկայացման համար պարտադիր պայման է ունենալ ԲԱԹՍ-ի ճշգրիտ մաթեմատիկական մոդելը: Կատարված աշխատանքում ԲԱԹՍ-ն նկարագրված է՝ Նյուտոն-Էյլերի հավասարումների միջոցով: ԲԱԹՍ-ի շարժման մաթեմատիկական նկարագրության համար անհրաժեշտ է ունենալ քառապտուտակի մարմնին կոշտ ամրակցված համակարգից երկրագնդին համապատասխան իներցիալ համակարգերի անցումը ցուցադրող հավասարումները: Անցման համակարգերը ներկայացված են Նկ. 1-ում:



ԲԱԹՍ-ի 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 կենտրոնի հետ, որին համապատասխան իներցիալ համակարգը ներկայացված է ($O_I X_I Y_I$) առանցքներով և որի նկատմամբ շարժումը համապատասխանում է երկրագնդի նկատմամբ շարժմանը: Նկար 1-

ում ցուցադրված ψ - ϕ - θ պտույտները ներկայացվում են z - x - y հաջորդականությամբ:

Էլլերի պտույտների արդյունքում ստացված մատրիցը, որը ներկայացնում է մարմնին կոշտ ամրակցված համակարգից հաշվարկման իներցիալ համակարգ անցումը, ցուցադրված է բանաձև 1-ում:

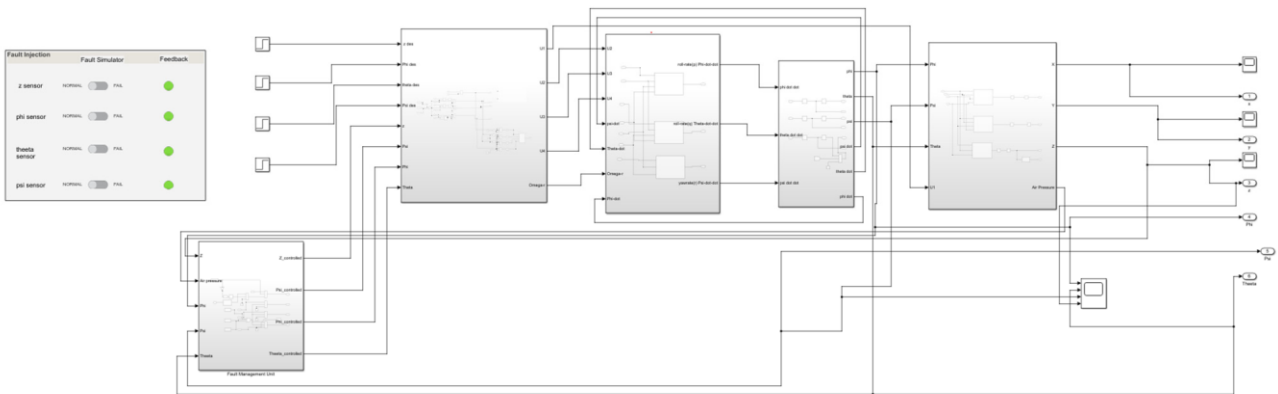
$$R_{B \rightarrow I} = \begin{pmatrix} c\theta c\phi s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\phi & s\theta c\phi c\phi + s\psi s\phi \\ c\theta s\phi s\phi s\theta s\psi & +c\phi c\phi & s\psi s\theta c\phi - s\phi c\phi \\ -s\theta & s\phi s\theta & c\phi c\theta \end{pmatrix}, \quad (1)$$

որտեղ՝ $c x = \cos(x)$, $s x = \sin(x)$.

Նախագծված ԲԱԹՍ-ի MATLAB մոդել

Խնդրի դրվածքի դրույթներին համապատասխանող անօդաչուն նախագծվել է MATLAB ծրագրային համալիրի և Simulink

փաթեթի կիրառմամբ՝ սենսորային խափանումների դեպքում ԲԱԹՍ-ի վարքագծի ուսումնասիրման և պահանջվող ելքային արժեքների դիտարկման համար: Simulink մոդելի արտաքին բլոկները ցուցադրված են նկար 2-ում:



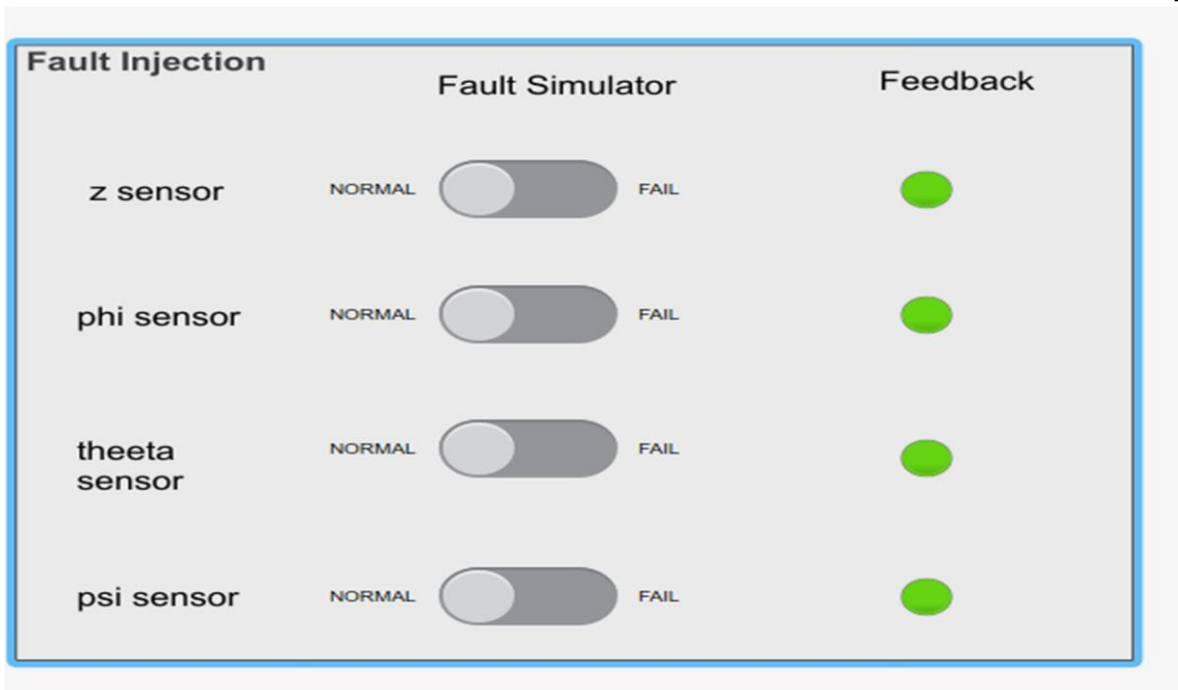
Նախագծված ԲԱԹՍ-ի ընդհանրացված տեսքը՝ Simulink միջավայրում

Նկ. 2-ում պատկերված ԲԱԹՍ խափանակայուն մոդելը բաղկացած է երեք հիմնական բլոկներից, դրանք են՝

- խափանման ներմուծման բլոկ (Fault Injection Unit (FIU))
- խափանման կառավարման բլոկ (Fault Management Unit (FMU))

• բուն բազմառոտոր անօդաչու թռչող սարք
 խափանման ներմուծման բլոկի Simulink միջավայրում ներկայացումը ցուցադրված է Նկ. 3-ում:

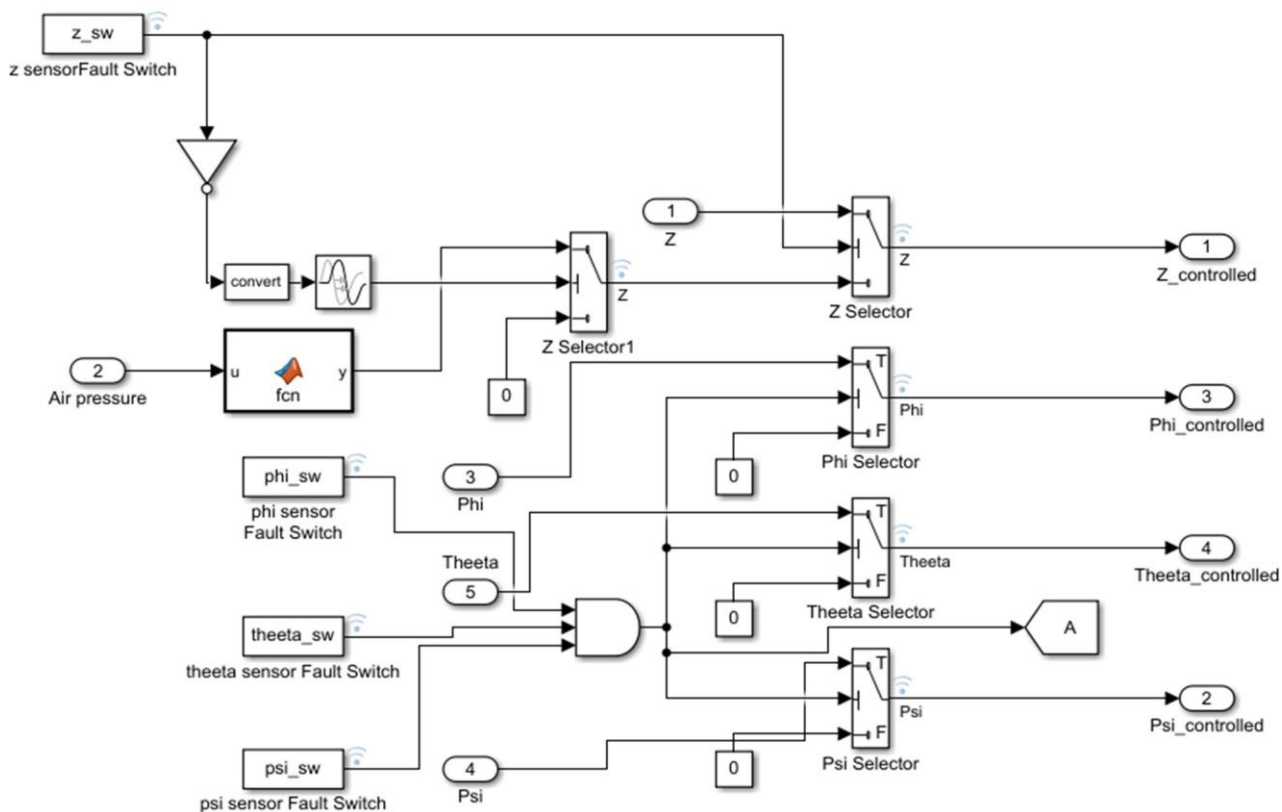
Նկար 3



խափանման ներմուծման բլոկ (Fault Injection Unit (FIU))

Նկ. 3-ում ներկայացված FIU բլոկն անմիջականորեն կապված է Նկ. 4-ում ցուցադրված սխալանքի կառավարման բլոկի հետ

և նախատեսված է սենսորային խափանումները մեկ առ մեկ կառավարման բլոկին փոխանցելու համար:



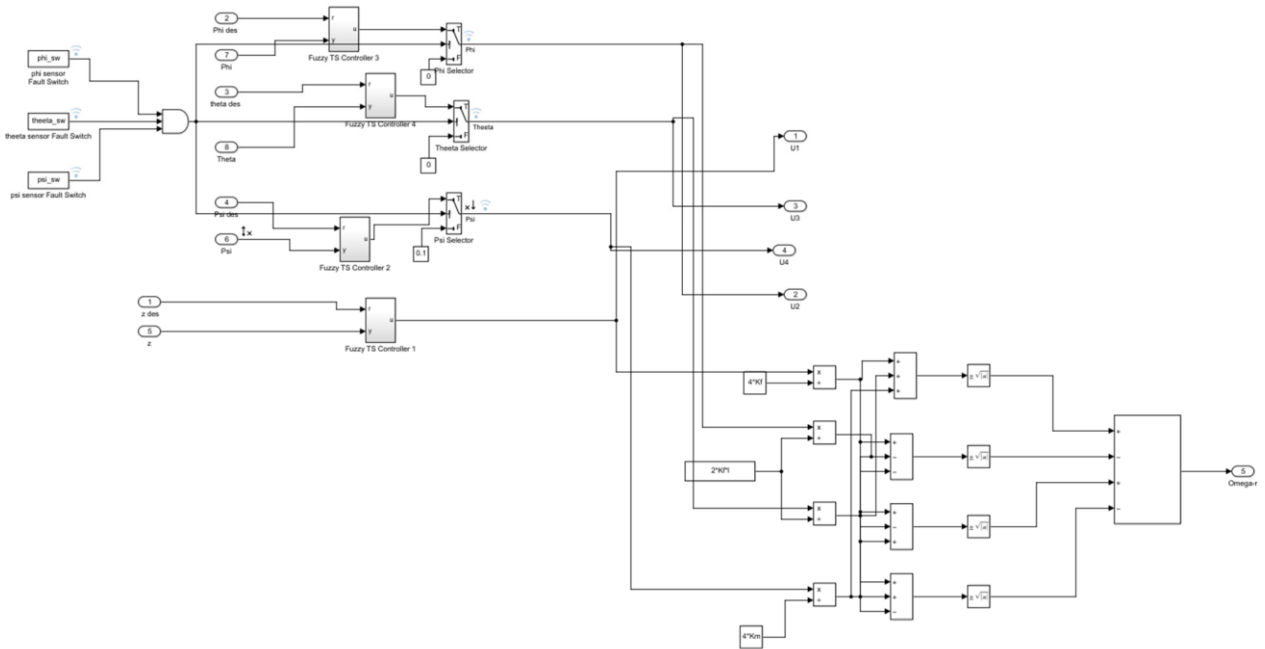
Խափանումների կառավարման բլոկ (Fault Management Unit (FMU))

Ինչպես երևում է Նկ. 4-ից, բուն ԲԱԹՍ-ի բլոկից փոխանցված Z սենսորի արժեքի միջոցով օդի ճնշման հաշվարկից ստացված արժեքը համեմատվում է ԲԱԹՍ-ի ճնշման սենսորից ստացված արժեքի հետ՝ հայտնաբերելով խափանումը Z սենսորի համար: Z սենսորից ստացված արժեքի միջոցով օդի ճնշման հաշվարկային բանաձևը ներկայացված է՝ բանաձև 2-ում.

$$Y = (1 - (u/101.325)^{0.19026}) / 2.25577e-5; \quad (2)$$

որտեղ y-ը Նկ. 4-ում ցուցադրված MATLAB ֆունկցիայի ելքային արժեքն է, այսինքն՝ ստացված ճնշումը: Հաշվարկը կատարվում է ISA [Nadda, Swaroup, 30-38] մոդելի ստանդարտների հիման վրա:

Նկ. 5-ում ներկայացված է ԲԱԹՍ-ի կառավարման համակարգը (controller)՝ նախագծված Տակագի-Սուլջենոյի ոչ հստակ տրամաբանության [Safaryan et al., 27-34] միջոցով:

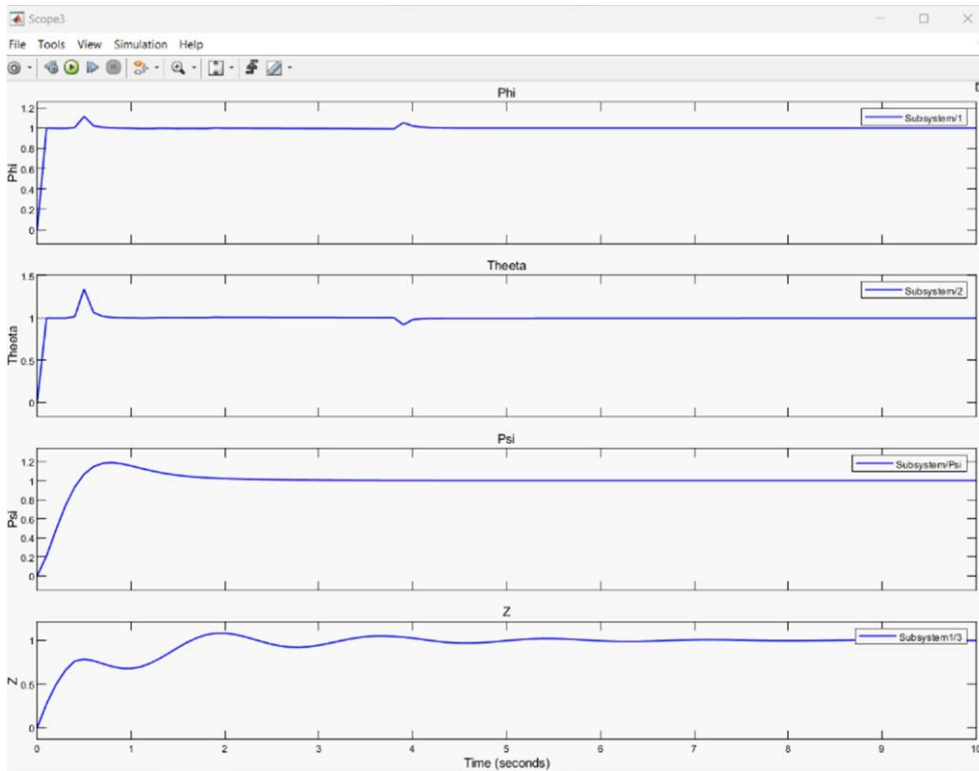


ԲԱԹՍ-ի կառավարման մոդել

Ստացված արդյունքներ

Նախագծված քառապտուտակի աշխատանքի արդյունքները դիտարկելու ժամանակ կատարվել են անհրաժեշտ բոլոր չորս սենսորների ստուգումները՝ մեկ առ մեկ ներմու-

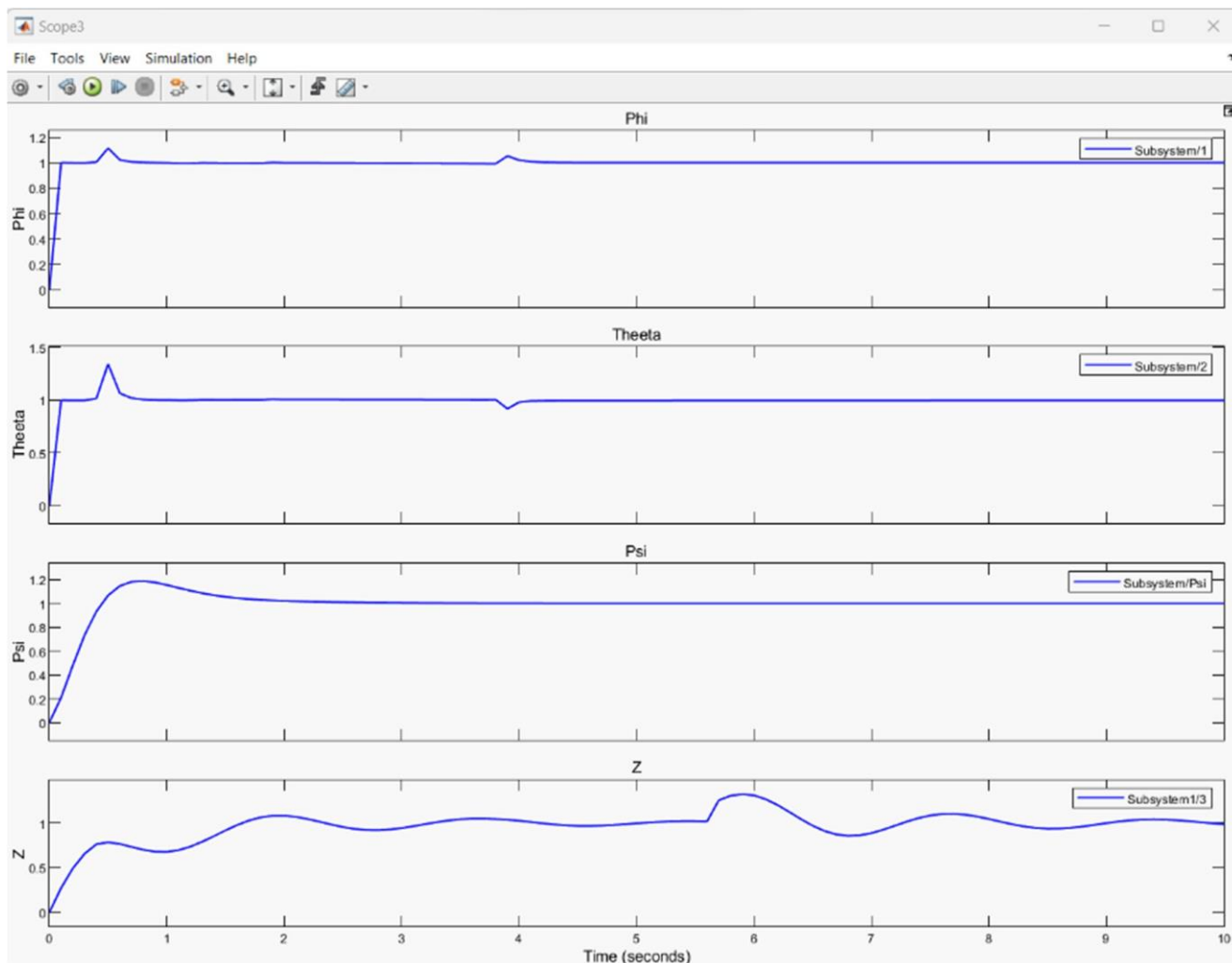
ծելով խափանումներ: Նկ. 6-ում ցուցադրված է բոլոր սենսորների ճիշտ աշխատանքի արդյունքում քառապտուտակի կառավարումը՝ ոչ հստակ տրամաբանության կիրառմամբ:



ԲԱԹՍ-ի աշխատանքը բոլոր սենսորների անխափան գործարկման դեպքում

Նկ. 7-ում ցուցադրված է Z սենսորի խափանման դեպքում ԲԱԹՍ-ի խափանակայուն աշխատանքը:

Նկար 7

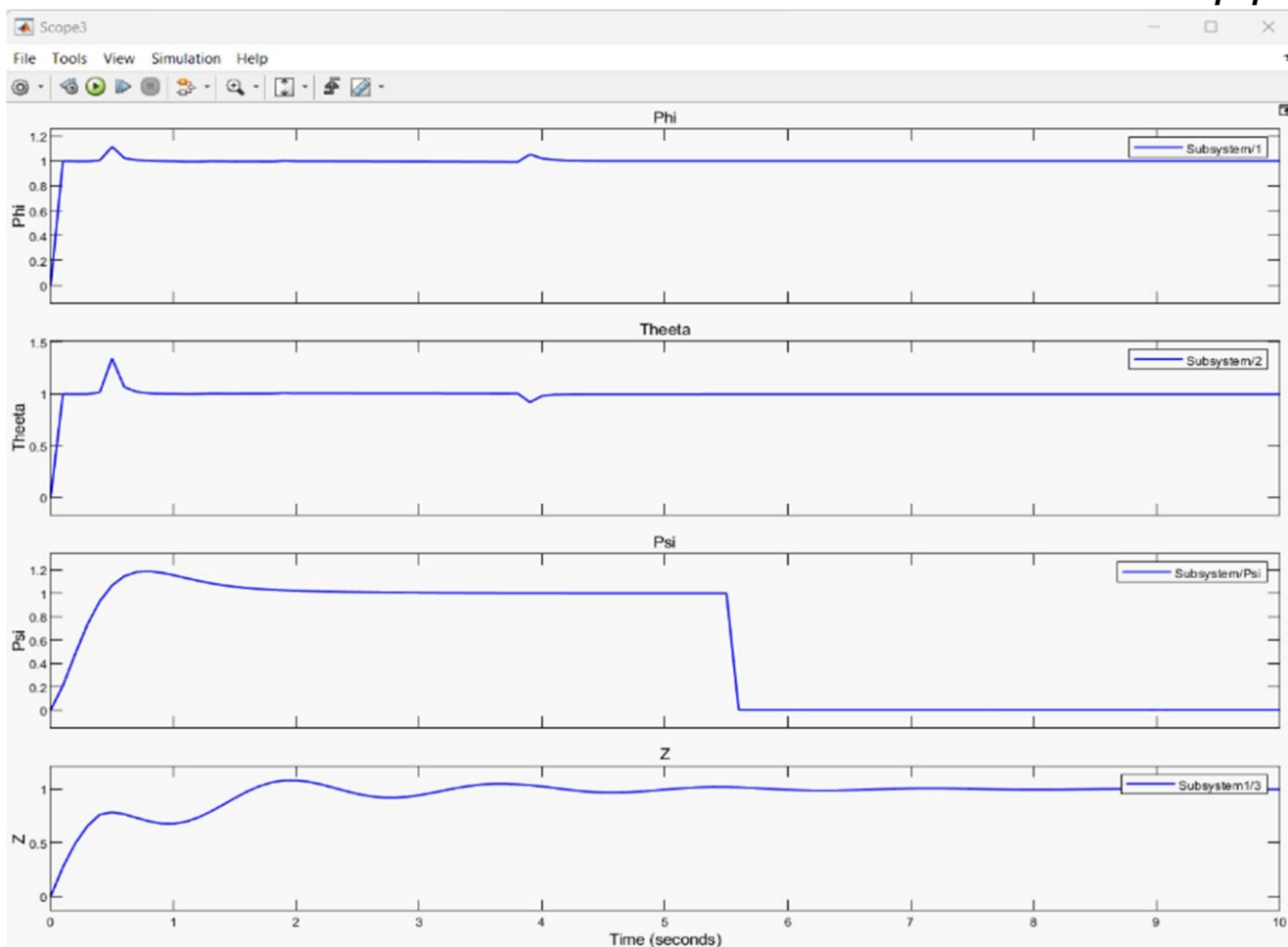


Z սենսորի խափանում՝ թռիչքից 5,5 վայրկյան անց

Նկ. 7-ում ցուցադրված արդյունքից պարզ է դառնում, որ 5,5 վայրկյան անց Z սենսորի խափանման պատճառով քառապտուտակը չի կորցնում կայունությունը՝ վերականգնելով անհրաժեշտ բարձրությունը՝ ծախսելով 2 վայրկյան:

Երայնաճոճման, կողաթեքման և ընթացաշեղման սենսորների ամբողջական խա-

փանման բացահայտման դեպքում քառապտուտակը հնարավորություն է ունենում բարձրանալ կամ իջնել, բայց պահպանում է զրոյական մակարդակ Phi, Theta, Psi արժեքների համար՝ մնալով սավառնման ռեժիմում: Psi սենսորի խափանումը ցուցադրված է Նկ. 8-ում:



Psi սենսորի խափանում՝ թռիչքից 5,5 վայրկյան անց

Ինչպես երևում է Նկ. 8-ից, Psi սենսորի խափանման դեպքում ԲԱԹՍ-ն գրոյացնում է վերջինիս մակարդակը՝ պարզապես կախվելով օդում:

Եզրակացություն

Սույն հոդվածում ներկայացված ԲԱԹՍ-ի խափանակայուն աշխատանքի մոդելը բավարարում է դրված խնդրի պահանջներին՝ ստուգելով, հայտնաբերելով և վերացնելով կրիտիկական սենսորների խափանումները: Ըստ ակտիվ խափանակայուն աշխատանքի փիլիսոփայության, սենսորներից յուրաքանչյուրի խափանման դեպքում կոմպենսացումը կատարվում է մյուս սենսորների միջոցով: Որպես

սահմանափակում ընտրվել է միառժամանակ մեկ սենսորի սխալանքի առկայություն, որը կշտկվի հետագա աշխատանքներում: Z սենսորի խափանման դեպքում որպես առողջ սենսոր է ընտրվել օդի ճնշման սենսորը, որի միջոցով ստանալով ճշգրիտ բարձրություն ԲԱԹՍ-ն մնում է օդում կախված վիճակում՝ պահպանելով վերջինիս կայունությունն ու անվտանգությունը: Կողաթեքման, երկայնաճոճման և ընթացաշեղման սենսորներից ցանկացածի խափանման դեպքում բոլոր երեք սենսորների արժեքները հավասարեցվում են գրոյի կամ պահվում են հաստատուն՝ ապահովելով քառապտուտակի կայունությունը:

Գրականության ցանկ

1. Salih A. L., Moghavyemi M., Mohamed F., Haider A., Gaeid K.S.: Modelling and PID controller design for a quadcopter unmanned air vehicle. In: IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2010 - Proceeding, vol. 1, pp. 74–78(2010).
2. Jafar H., Zareh M., Roshanian J., Nikkhah A.: An optimal guidance law applied to quadcopter using LQR method. Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci. 53(179), 32–39(2010).
3. Santos M., López V., Morata F.: Intelligent fuzzy controller of a quadcopter. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), pp. 141–146 (2010).
4. Santos M. and Sarapura J., “An adaptive dynamic controller for quadrotor to perform trajectory tracking tasks,” Journal of Intell. Robot. Syst., vol. 93, pp. 5–16, 2019.
5. Nadda S. and Swarup A., “Improved quadrotor altitude control design using second-order sliding mode,” Journal of Aerosp. Eng., vol. 30, 2017.
6. SAFARYAN A., VARDANYAN N., BASKOVCHYAN A., NERSISYAN N., SIMONYAN T., “Design of UAV control system with fuzzy logic controller and its importance in the economy”, ALTERNATIVE quarterly academic journal 2022 #4 (October – December), pp. 27-34, 2022

FAULT-TOLERANT CONTROL MODEL OF MULTIROTOR UAV USING TAKAGI-SUGENO'S FUZZY LOGIC METHOD DURING CRITICAL SENSOR FAILURES

Avetik Baskovchyan

Postgraduate student

EUA, Chair of Information Technologies and Applied Mathematics

avik.baskovchyan@gmail.com

Abstract

This paper presents a multi-rotor UAV fault-tolerant performance model for critical sensor failure detection and control. The Takagi-Sugeno Fuzzy logic method was used as a control algorithm. The model presented in the paper is based on the comparison of the result of the pressure measurement sensor of a multi-rotor UAV with a real, high-precision pressure sensor, depending on which failed sensor is checked and controlled. The presented model ensures failure resistance not only for height but also for roll, pitch, and yaw sensors. The work was carried out in the Simulink software package of the MATLAB software complex, obtaining precise values without feedback linearization to avoid the limitations of the multi-role UAV. As is known, there are various types of drones. The most common and used type is the quadcopter, so the quadcopter was chosen in the work as an example of a multi-legged UAV. As the model shown is designed for a quadcopter, it is also suitable for other types of multi-rotor drones; it is only necessary to modify the drone block to suit the required parameters. Thus, the work presented is applicable and flexible.

Keywords: UAV, Fuzzy logic, MATLAB, Simulink, Fault, Fault-tolerance control

Ներկայացվել է՝ 21.03.2023թ.

Ուղարկվել է գրախոսման՝ 25.04.2023թ.