UDC 004.896:621.43:621.3.049.77
SCOPUS CODE 1802
https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-180-189

სერვომძრავას სიჩქარის არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი Arduino Due-ს ბაზაზე

ჯემალ გრიგალაშვილი
მართვის სისტემებისა და ავტომატიზაციის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 77
E-mail: j.grigalashvili@gtu.ge

რეცენზენტები:
ს. ხოშტარია, სტუ-ის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი
E-mail: s.xoshtaria@gtu.ge
ნ. მაღლაკელიძე, სტუ-ის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი
E-mail: n.maglakelidze@gtu.ge

ანოტაცია. სტატიაში ავტორი განიხილავს რეალური დროის არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის დამუშავებას დღეისათვის მეტად აქტუალური მუდმივი დენის სერვომძრავას სიჩქარის მართვისათვის (FPV და ფრთებიან დრონებში, ანიმატრონიკებში და სხვ.), Arduino Due კონტროლერის გამოყენებით. შემოთავაზებული კონტროლერი დაფუძნებულია მამდანის მიდგომაზე და ვერიფიცირებულია MATLAB-ის Fuzzy Logic toolbox-ისა და Simulink-ის გაფართოების პაკეტების რესურსებით. რეალურ დროში მუშაობისას მუდმივი დენის ძრავას ქცევა და არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის რეაქცია ფიქსირდება გრაფიკულად, ხოლო მონაცემები ინახება MATLAB-ში ლოგიკური კონტროლერის მუშაობის წყვეტის გარეშე. ამ მონაცემებზე დაკვირვებების საფუძველზე სისტემის დაყენებისა და ვარდნის დროები გაანგარიშებულია შემავალი ტრაექტორიის ყოველი ცალკეული პერიოდისათვის. დაფიქსირებულია, რომ სისტემის გადარეგულირების დრო შემცირდა აღნიშნული მიდგომის გამოყენებით. სტატიაში გაანალიზებულია Arduino Due-ს მწარმოებლობა მუდმივი დენის სერვომძრავას არამკაფიო ლოგიკური კონტროლის მიდგომის გამოყენებით. სისტემის რეაგირებამ გვიჩვენა დამაკმაყოფილებელი მწარმოებლობა კონკრეტული გამოყენებისათვის.

საკვანძო სიტყვები: Arduino Due კონტროლერი; Arduino Uno კონტროლერი; არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი; არამკაფიო წესების ბაზა; არამკაფიო დასკვნების სისტემა; ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელი; განივიმპულსური მოდულიაცია; დეფაზიფიკაცია; ლინგვისტიკური არამკაფიო ცვლა-

დები; მიკუთვნების ფუნქციები; სერვომძრავა; ფაზიფიკაცია; ფუნქციურ/არბიტრარული გენერატორი; Hunteck 1025G და შერეული სიგნალების ოსცილოსკოპი PicoScope 2205MSO.

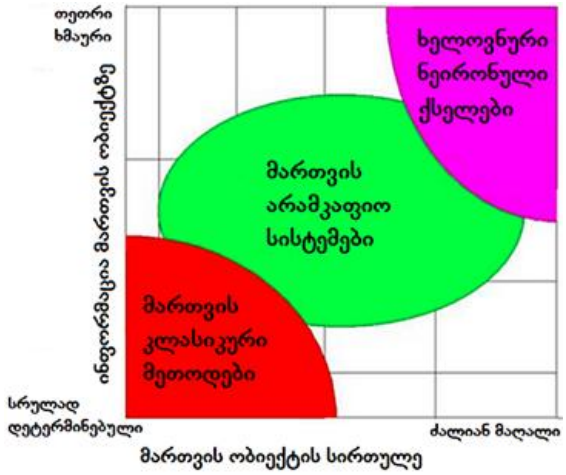
შესავალი

ზოგადად სამრეწველო ინფრასტრუქტურაში, კონკრეტულად კი საავტომობილო მრეწველობაში, რობოტოტექნიკაში, დრონების წარმოებასა და სხვაგან, ფართოდ გამოიყენება მუდმივი დენის მაღალმწარმოებლური და გაუმჯობესებული აპლიკაციები მათი მაღალი საიმედოობითა და მართვის სიმარტივიდან გამომდინარე, რაც განპირობებულია მაგნიტური ველისა და ღუზის მაგნიტომამოძრავებელი ძალის განმხოლოებით. მუდმივი დენის აპლიკაციის ან სისტემის ოპტიმალური მწარმოებლობისა და ეფექტურობის მიღწევისათვის სასიცოცხლოდ აუცილებელია ღუზის მდგომარეობისა და სიჩქარის ზუსტი და უწყვეტი კონტროლი. ამ შემთხვევაში სამრეწველო დინამიკური სისტემის (მანქანები მუდმივი დენის ძრავებით) ოპტიმალური მწარმოებლობისა და ეფექტურობის მიღწევისათვის, კონტროლერს უნდა ჰქონდეს შესაძლებლობა სწრაფად მოახდინოს რეაგირება და თვითაღდგენა დატვირთვის მოულოდნელი ცვლილებების შემთხვევაში და საიმედოდ იმუშაოს სისტემის პარამეტრების ცვლილებისას [1].

სერვომძრავების ტრადიციული კონტროლერები ან იგივე, ძრავების მართვის ტრადიციული მეთოდები, ისეთი როგორიცაა, მაგალითად, პიდ რეგულატორები ჩვეულებრივად ფართოდ გამოიყენება მარტივი სტრუქტურის გამო, მაგრამ ზემოთ ნახსენები კონტროლერის ოპტიმალური მწარმოებლობის მიღწევის საჭიროებისაგან გამომდინარე აუცილებელია მართვის სისტემის ზუსტი და უზუსტესი პარამეტრების გამოყენება (ისეთების, როგორიცაა P, I, D-ს აწყობილი მნიშვნელობები, უკუელექტრომამოძრავებელი ძალის მუდმივა, ღუზისა და აღგზნების გრაგნილის ინდუქტივობა და წინააღმდეგობა და სხვ.). კარგად გაწყობილი პიდ რეგულატორით შესაძლებელია მიღწეული იქნეს სისტემის ზუსტი რეაქციები, მაგრამ სისტემის მწარმოებლობა ძალზედაა დამოკიდებული მართვის განტოლებებსა და სისტემის მათემატიკურ მოდელებზე. კლასიკური მეთოდების გამოყენების შემთხვევაში, არაწრფივი სისტემების მოდელირებისათვის საჭირო მართვის მათემატიკური განტოლებები ძალზე გართულებულია და ითხოვს მდგომარეობათა რთული დამკვირვებლების გამოყენებას.

ხელოვნური ინტელექტის მეთოდების გამოყენება შესაძლებლობას იძლევა შეიქმნას დამაკმაყოფილებელი კონტროლერი რთული არაწრფივი სისტემებისთვის, სადაც მათემატიკური მოდელირება განმსაზღვრელი არ იქნება. აღნიშნული ინტელექტუალური კონტროლერები უფრო სასურველია, რადგან ნებისმიერი სისტემის კონტროლერი შეიძლება დამუშავდეს რთული მათემატიკური მოდელის გარეშე და შესამამისად გაიზარდოს კონტროლერის ეფექტურობა და საიმედოობა.

ბოლო ათწლეულის განმავლობაში დიდი გავრცელება პოვა არამკაფიო ლოგიკაზე დამყარებული მეთოდების გამოყენებამ მართვის სტრატეგიაში (სურ. 1).



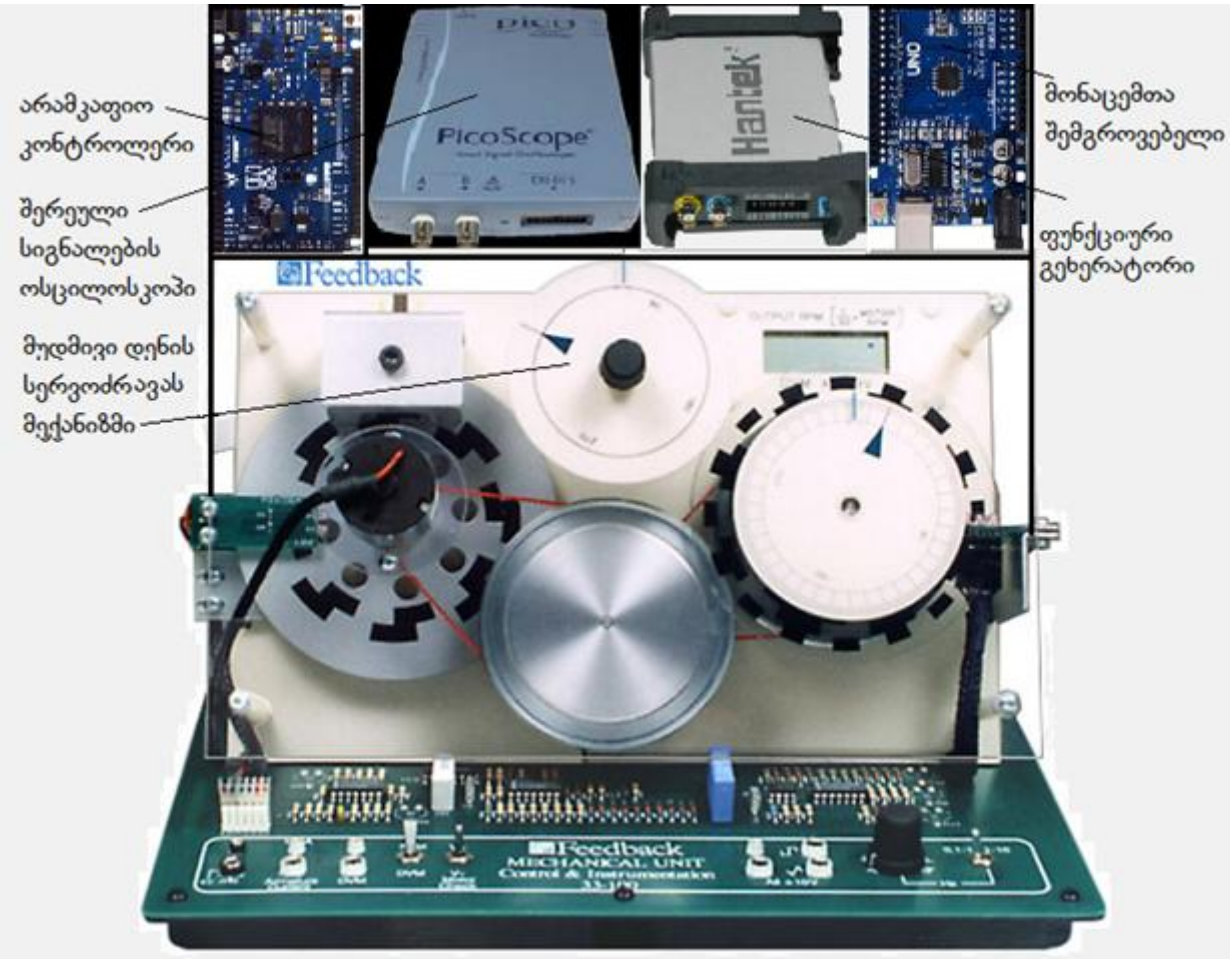
სურ. 1. მართვის მეთოდების გამოყენების არეები

როგორც სურათიდან ჩანს, თუ ავიღებთ დეკარტეს კოორდინატთა სისტემას და აბსცისთა ღერძზე გადავზომავთ მართვის ობიექტების სირთულეს, ხოლო ორდინატთა ღერძზე – ინფორმაციის რაოდენობას მართვის ობიექტის შესახებ, ღერძებს დავყოფთ სამ-სამ ნაწილად და ქვედა ნულოვანი წერტილიდან და მისი ჯვარედინი ზედა მაქსიმალური წერტილიდან ფარგლით მოვხაზავთ არეებს როგორც ეს ნაჩვენებია სურათზე, მაშინ როგორც ცოდნა და გამოცდილება გვკარნახობს, ქვედა სეგმენტში, ეფექტურია მართვის კლასიკური მეთოდების გამოყენება, ზედა სეგმენტში – მართვის ხელოვნური ნეირონული ქსელებისა და გენეტიკური ალგორითმების მეთოდების გამოყენება, შუალედურ, ყველაზე ფართო ნაწილში კი მიზანშეწონილი და ეფექტურია არამკაფიო მეთოდების გამოყენება.

აღნიშნული მართვის მეთოდები ტესტირებულია მოდელირების გარემოში, კერძოდ MATLAB-ის სიმულიაციის მოდელებში, არაწრფივი სისტემების ან დანადგარების რეალურ დროში მართვის პირობებში. მაგრამ ასეთი მოდელების გამოცდებისას მიღებული შედეგების მწარმოებლობის შეფასებისათვის, შეუძლებელია გავითვალისწინოთ ყველა ის აღგზნება, რომელიც შეიძლება წარმოიშვას რეალური სისტემის მუშაობისას რეალურ დროში. ამ შემთხვევაში სისტემის ფაქტობრივი მწარმოებლობა და ოპტიმალური ეფექტურობა იქნება სრულად განსხვავებული იმიტაციური გამოცდების შედეგებისაგან [2].

არამკაფიო ლოგიკური მართვის სტრატეგია, დაფუძნებულია არამკაფიო სიმრავლეებისა და მსჯელობების თეორიულ საფუძვლებზე. ამ კვლევების ჩარჩოებში არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი შემოწმებული იყო მუდმივი დენის სერვოძრავას მექანიზმზე Feedback 33-100 (სურ. 2).

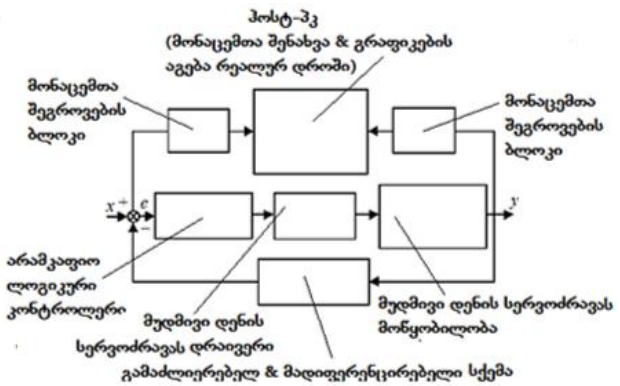
კვლევის ობიექტში დროში ცვალებადი არაწრფივობებისა და გაურკვევლობების გამო (მუდმივი დენის ძრავას ლილვის ბრუნვა) მართვის კლასიკურ მექანიზმებს უნდა ჰქონდეს კარგად გაწყობილი პარამეტრები. ამიტომ, სისტემის ოპტიმალური მწარმოებლობისათვის, არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი უნდა ასრულებდეს მკაფიოდ განსაზღვრულ არამკაფიო წესებს. ჩვენს შემთხვევაში არამკაფიო ლოგიკა ძირითადად რეალიზებული იყო მაღალმწარმოებლურ მიკროკონტროლერულ დაფაზე Arduino Due 32-ბიტიანი ბირთვით ARM. განხილული სისტემა შედგება ორი, ერთმანეთთან სინქრონიზებული კონტროლერისაგან, რომელთაგან ერთი, Arduino Due, ასრულებს არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის ფუნქციას, ხოლო მეორე, Arduino Uno - მონაცემთა შეგროვების ფუნქციას რეალურ დროში. ამ შწემთხვევაში მიკროკონტროლერის ორი ცალკეული დაფის გამოყენების ძირითადი მიზანი არის არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის წყვეტის თავიდან აცილება რათა არ მოხდეს კონტროლერის რეაგირების დროის გაზრდა მუშაობის პროცესში სხვადასხვა ხდომილებაზე.



სურ. 2. არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი

ძირითადი ნაწილი

ჩვენ მიერ დამუშავებული არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი რეალიზებული იყო მართვის ჩაკეტილი სტრატეგიის გამოყენებით როგორც ეს გამოსახულია მე-3 სურ-ზე, სადაც *x, y, e* და *ce* სასურველი ან საყრდენი სიჩქარე, ფაქტობრივი სიჩქარე, სასურველ და ფაქტობრივ სიჩქარეთა სხვაობა და ამ სხვაობის ცვლილების სიჩქარეებია შესაბამისად.



სურ. 3. სისტემის ბლოკდიაგრამა

არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი ახდენს სისტემური ცდომილებისა და ცდომილების ცვალებადობის გაანგარიშებას სასურველ და ფაქტობრივ სიჩქარეებს შორის ანათვალის აღების თვითოეული მომენტისათვის k, როგორც ეს ნაჩვენებია ფორმულებში (1,2):

$$e_k = x_k - y_k \quad (1)$$

$$ce_k = e_k - e_{(k-1)} \quad (2)$$

რეალურ დროში მომუშავე ჰოსტკომპიუტერი, მასზე დაყენებული MATLAB-ით, გამოიყენება მონაცემთა მიღებისათვის რეალურ დროში (სასურველი სიჩქარე, სიჩქარის ცდომილება და ცდომილების ცვლილება და სხვ.) კავშირის არჩეული პროტოკოლით, ანუ მიმდევრობითი პორტი RS-232, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით 115200 ბიტი წამში, მონაცემთა შეგროვების დაფიდან DAQ (Arduino Uno) მონაცემთა სისტემურ ბაზაში და მუდმივი დენის ძრავას სასურველი სიჩქარისა და ფაქტობრივი სიჩქარის გრაფიკების ასაგებად რეალურ დროში. ცდომილების კორექცია, რომელიც შეიძლება გამოწვეული იყოს დროში ცვალებადი შეშფოთებებით, სრულდება არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერით. სასურველი სიჩქარის მიღწევისათვის შეცდომების განუწყვეტელი კორექტირებით კონტროლერი მართავს მუდმივი დენის ძრავას ძრავას დრაივერის გავლით [3].

არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი დამუშავდა Arduino Due მიკროკონტროლერის ბაზაზე. მუდმივი დენის ძრავას სიჩქარის ზუსტი მართვისათვის მდგრადი მდგომარეობის მინიმალური შეცდომის საზღვრებში, აუცილებლობას წარმოადგენს ზუსტი ინფორმაციის მიწოდება როგორც სასურველი, ისე ფაქტობრივი სიჩქარის შესახებ არდუინოზე და ამ ინფორმაციის საფუძველზე არამკაფიო კონტროლერის მიერ უნდა იყოს გენერირებული და გადაცემული ზუსტი სიდიდეები მუდმივი დენის ძრავას დრაივერში.

ამ შემთხვევაში, ასეთი ზუსტი და უწყვეტი ინფორმაცია ანუ ანალოგური სიგნალები მიიღება ტაქოგენერატორისაგან და პროპორციულია მუდმივი დენის ძრავას ფაქტობრივი სიჩქარისა. Arduino Due-ში ანალოგურ-ციფრული გარდამქმნელის (აცგ) რეგისტრები აწყობილი იყო 12 ბიტი გარჩევითობის რეჟიმში. ამ რეჟიმში აცგ-ს აქვს ბიჯების 4095 მნიშვნელობა 0,8089 მვ ძაბვის თითოეული ბიჯისათვის. ეს არის უმცირესი ანალოგური მნიშვნელობა ანდა ცვლილება, რაც ამ სისტემას შეუძლია მიიღოს და გააანალიზოს კონტროლერში.

აქ აუცილებელია აღინიშნოს, რომ აცგ-ს ეს დიაპაზონი (0-დან 4095-მდე) ლოგიკურ კონტროლერში გარდაიქმნება 0-დან 100-მდე დიაპაზონში განივიმპულსური მოდულირებული სიგნალის გენერირებისათვის (გიმ).

არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის წესების ბაზის ფორმირებისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ გიმ-ის როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი მნიშვნელობები მუდმივი დენის ძრავას ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით მოძრაობისათვის. ეს ნიშნავს, რომ არამკაფიო ლოგიკურმა კონტროლერმა უნდა მოახდინოს გიმ-ის უარყოფითი მნიშვნელობების გენერირება. ამ გენერირებული დადებითი და უარყოფითი ნიშნების საფუძველზე არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი გენერირებს ორ სხვასხვა ლოგიკურ მნიშვნელობას: ლოგიკურ „0“-ს 0 ვ ძაბვით და ლოგიკურ „1“-ს 3,3 ვ. ძაბვით, შესაბამისად ისინი გამოიყენება მუდმივი დე-

ნის ძრავას ბრუნვისათვის საათის ისრის მიმართულებით ან საწინააღმდეგო მიმართულებით.

აქტიურ რეჟიმში არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის სასურველი სიჩქარე ანდა მითითებული მნიშვნელობა უშუალოდ მოდებული უნდა იყოს ძრავას დრაივერში და საბოლოოდ, მის მიერ გენერირებული გიმ მნიშვნელობა უნდა დავამატოთ ან გამოვაკლოთ გიმ-ის საბოლოო მნიშვნელობას, როგორც ეს ნაჩვენებია მე-3 განტოლებაში. შესაბამისად, მივიღებთ, რომ:

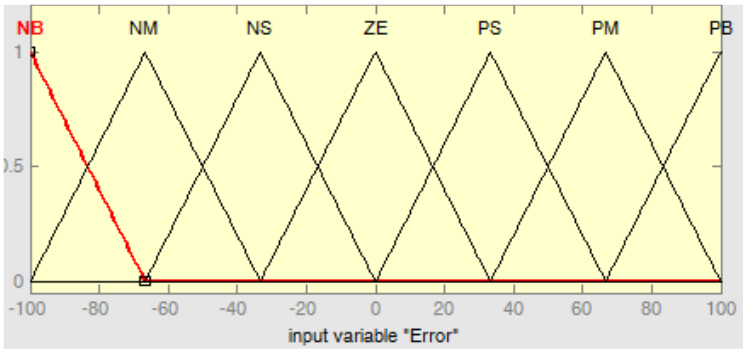
საბოლოო გიმ = (სასურველი სიჩქარე ± არამკაფიო გამოსასვლელი) (3)

დამუშავებულ პროექტში არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერი რეალიზებული იყო ფაზიფიკაციაზე, არამკაფიო წესების ბაზაზე, რომელიც დაფუძნებული იყო ადამიანის ლოგიკურ აზროვნებაზე, არამკაფიო დასკვნების სისტემაზე (FIS) და დეფაზიფიკაციის პროცესზე. ამასთან, FIS და დეფაზიფიკაცია თავის მხერივ ითვალისწინებდა MAX-MIN კომპოზიციასა და ფართობის ცენტრის (CoA) ანდა სიმძიმის ცენტრის (CoG) მეთოდების გამოყენებას.

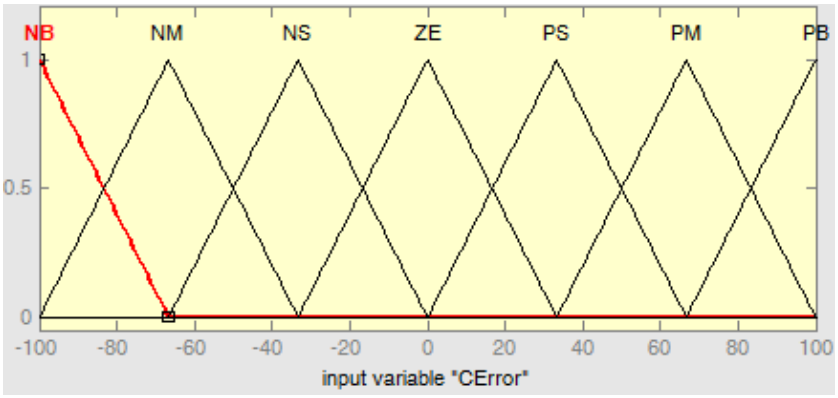
არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის მწარმოებლობა აქტიურ რეჟიმში მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული არამკაფიო წესების ბაზაზე. დროის ნებისმიერ მომენტში არამკაფიო შესასვლელების ანალიზის საფუძველზე, რაც ეყრდნობოდა მუდმივი დენის ძრავას სასურველი და ფაქტობრივი სიჩქარეების მონაცემებზე, არამკაფიო სიმრავლეების ცოდნასა და გამოცდილებაზე, ფორმირებული იქნა არამკაფიო წესების ბაზა (ცხრილი).

ზემოთ ნახსენები ციფრული შემავალი მონაცემებიდან (ცდომილება და ცდომილების ცვლილების სიჩქარე) და წესების ბაზიდან ფაზიფიკაციის პროცესის დროს FIS ასრულებს ყველა, მასთან დაკავშირებულ ლინგვისტურ არამკაფიო წესებს, რომელთა დეფაზიფიკაციის პროცესში დროის ყოველი მომენტისათვის მიღებული იქნება გიმ-ის სასურველი გამომავალი მნიშვნელობები, მუდმივი დენის ძრავას დრაივერში მიწოდებისათვის.

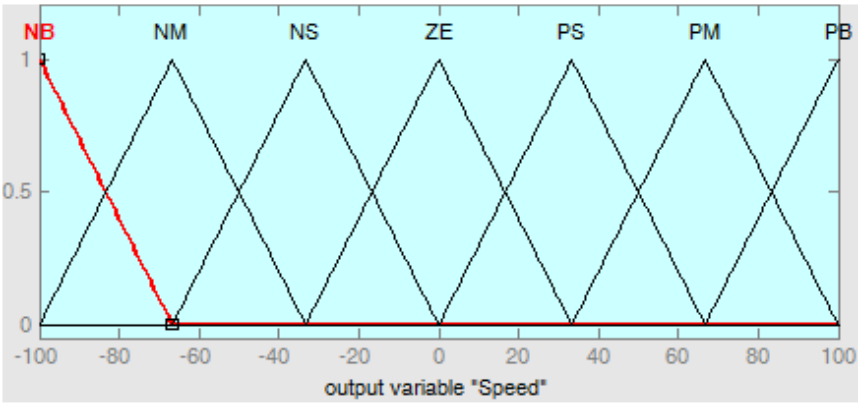
როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არამკაფიო ლოგიკურ კონტროლერს აქვს ორი შესასვლელი და ერთი გამოსასვლელი ანუ ცდომილება (error), და ცდომილების ცვლილების სიჩქარე (c_error) არის შესასვლელები, ხოლო მუშა ციკლი გიმ (pwmout) – გამოსასვლელი. გიმ-ისგან დამოკიდებულებით მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობები ამ შესასვლელ-გამოსასვლელებისათვის შემოსაზღვრულია და შეადგენს +100 და -100 შესაბამისად. ასეთი არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის აგებისათვის არჩეული იყო მიკუთვნების ფუნქციების სამკუთხა ფორმები (სურ. 4, 5, 6.)



სურ. 4. error-ის (ცდომილება) მიკუთვნების ფუნქციები



სურ. 5. c_error (ცდომილების ცვლილების სიჩქარე) მიკუთვნების ფუნქციები



სურ. 6. pwmout (სიჩქარე) მიკუთვნების ფუნქციები

ა. მე-4 სურ-ზე ნაჩვენებია მიკუთვნების სამკუთხა ფუნქციები „ცდომილებისათვის“ ყველა არამკაფიო სიმრავლეებით;

ბ. მე-5 სურ-ზე ნაჩვენებია მიმკუთვნების სამკუთხა ფუნქციები „ცდომილების ცვლილების სიჩქარისათვის“, ისიც ყველა შესაბამისი არამკაფიო სიმრავლეებით;

გ. მე-6 სურ-ზე ნაჩვენებია მიმკუთვნების სამკუთხა ფუნქციები «pwmout ან სიჩქარე» ყველა შესაბამისი არამკაფიო სიმრავლეებით;

ცხრილი

არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის წესების ბაზა

ce / e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PS	PS	PS	ZE
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PB	PM	PS	ZE	ZE	NS	NS
ZE	PM	PS	ZE	ZE	ZE	NS	NS
PS	PM	PS	ZE	ZE	NS	NS	NM
PM	PS	PS	NS	NS	NS	NS	NM
PB	ZE	NS	NS	NM	NB	NB	NB

რეალური დროის არამკაფიო ლოგიკურ კონტროლერში ცოდნა მართვის პროცესის შესახებ ანდა სისტემის ქცევის შესახებ შეიძლება ფორმირებული იყოს რამდენიმე არამკაფიო წესის სახით, როგორც ეს ნაჩვენებია ცხრილში, სადაც არამკაფიო შესასვლელებისა და გამოსასვლელისათვის ლინგვისტური ცვლადები აღინიშნება როგორც: უარყოფითი დიდი (NB), უარყოფითი საშუალო (NM), უარყოფითი მცირე (NS), ნულოვანი (ZE), დადებითი მცირე (PS), დადებითი საშუალო (PM) და დადებითი დიდი (PB).

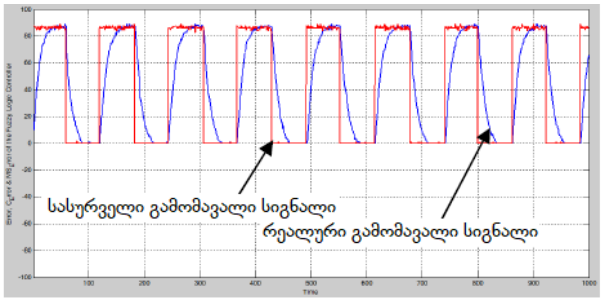
ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ლინგვისტური ცვლადი არის არამკაფიო და თუ გამოვიყენებთ ამ არამკაფიო მნიშვნელობებს იმ პროცედურებში, რომლებიც აღწერილი იყო ზემოთ, მაშინ მივიღებთ ყველა მათთან დაკავშირებულ მართვის არამკაფიო მნიშვნელობებს. დეფაზიფიკაციის პროცესის მეშვეობით მიღებული მმართველი გიმ მნიშვნელობები მიეწოდება მუდმივი დენის ძრავას დრაივერს, როგორც მკაფიო სიდიდეები.

არამკაფიო დასკვნის მექანიზმი (FIS) იღებს გადაწყვეტილებებს სისტემის მუშაობის პროცესში, ზემოთ ნახსენები არამკაფიო წესების საფუძველზე. თითოეული არამკაფიო წესისთვის და თითოეული დაკავშირებული შესასვლელისთვის (ცდომილება და ცდომილების ცვლილება) FIS გენერირებს გამომავალ მონაცემებს და ეს გამომავალი მონაცემების სიმრავლე გარდაიქმნება მკაფიო გამომავალ სიგნალად დეფაზიფიკაციის პროცესის მეშვეობით.

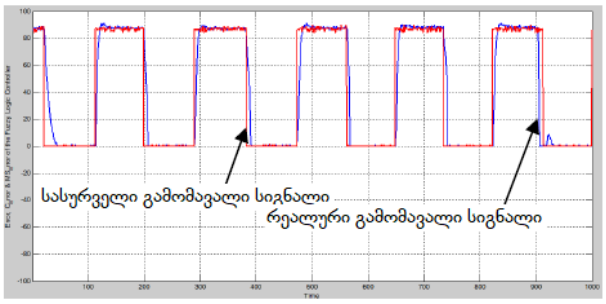
$$CoA = \frac{\int_{X\min}^{X\max} f(x)xdx}{\int_{X\min}^{X\max} f(x)dx} \qquad (4)$$

დეფაზიფიკაციის ამ მეთოდში კონტროლერი ანგარიშობს მიკუთვნების ფუნქციების ფართობს ცვლადის დიაპაზონის საზღვრებში მე-4 ფორმულის საფუძველზე, სადაც CoA გამომავალი ცვლადის მკაფიო მნიშვნელობაა, *f(x)* აღნიშნავს მიკუთვნების ფუნქციას თითოეული ცვლადისათვის, *x* ლინგვისტური ცვლადის მნიშვნელობაა, Xmin და Xmax აღნიშნავს ლინგვისტური ცვლადის დიაპაზონის მინიმუმსა და მაქსიმუმს.

არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის ალგორითმი, რაც იყო რეალიზებული Arduino Due-ში [4], შემოწმებული იყო ექსპერიმენტული დანადგარით რეალურ დროში (სურ. 1). კონტროლერის მწარმოებლობის ანალიზისათვის რეალურ დროში, გამოყენებულ იქნა ტრაექტორიის სხვადასხვა ფორმა, როგორიცაა: ხერხისებური, სინუსოიდური, დახრილი ანდა მართკუთხა ტალღები. აღნიშნული ფორმები მიღებულ იქნა ფუნქციურ/არბიტრული გენერატორის Hunteck 1225-ის მეშვეობით. მიღებულ იქნა მუდმივი დენის ძრავას სიჩქარის პასუხი და შედარდა საყრდენ ტრაექტორიასთან არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის გარეშე და მასთან ერთად. მე-7 და მე-8 სურათებზე ნაჩვენებია მხოლოდ ერთი ფორმის, კერძოდ მართკუთხა სიგნალის (მეანდრის) ტრაექტორია. აღნიშნული სურათები მიღებულია შერეული სიგნალების ოსცილოსკოპით PicoScope 2205. მე-7 სურათი გვიჩვენებს სისტემის რეაქციას კვადრატული (მეანდრა) ფორმის ტალღაზე კონტროლერის გარეშე, ხოლო მე-8 სურათი – არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის რეაქციას იმ შემთხვევებისთვის, როცა სისტემაზე დატვირთვის სიდიდე უცვლელია.



სურ. 7



სურ. 8

დასკვნა

ამ კვლევებში მუდმივი დენის სერვოძრავას მექანიზმის მართვის სტრატეგია რეალიზებული იყო არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის გამოყენებით. ამ სტრატეგიიდან გამომდინარექ არდუინოს დაფის გამოყენებით ექსპერიმენტი არ შემოიფარგლა მხოლოდ კომპიუტერული მოდელირებით, არამედ მიღებულ იქნა სისტემის რეაგირების ეპიურები რეალურ დროში ექსპერიმენტული სტენდის მეშვეობით.

კონტროლერის მწარმოებლობა ტესტირებული იყო ხუთი სხვადასხვა ტიპის სატესტო ტრაექტორიის გამოყენებით (ხერხისებური, სინუსოიდური, კვადრატული, ტრაპეციული, ექსპონენციალური სიგნალებით). სისტემის მწარმოებლობის ანალიზისთვის გამოყენებული იყო კვადრატული ტრაექტორია. მივიღეთ, რომ არამკაფიო ლოგიკური კონტროლერის გამოყენებით სისტემის დაყენების დრო შემცირებული იყო 25-ჯერ, ხოლო ჩამოვარდნის დრო 12-ჯერ, მაშინ, როცა საყრდენი ტრაექტორიის სიხშირე იყო 2 ჰერცის მახლობლობაში. მიუხედავად დადებითი შედეგისა, აუცილებელია შემდგომი კვლევები, როგორიცაა სისტემის რეაქციის კვლევა დიდი ინფორმაციის მქონე ნეირონულ-არამკაფიო ალგორითმებზე ანდა გენეტიკურ-არამკაფიო ალგორითმებზე.

ლიტერატურა

1. Premkumar, K., & Manikandan, B. V. (2013). Adaptive fuzzy logic speed controller for brushless DC motor. *IEEE International Conference on Power, Energy and Control*, 290. https://ieeexplore.ieee.org/document/6527668 *(Accessed November 27, 2024)*
2. Jayetileke, H. R., de Mei, W. R., & Ratnayake, H. U. W. (2014). Real-time fuzzy logic speed tracking controller for a DC motor using Arduino Due. *IEEE Conference Publication*. https://ieeexplore.ieee.org/document/7069560 *(Accessed November 27, 2024)*
3. Grigalashvili, J. (2011). Imprecise control in mechatronic systems. In *Innovative Technologies and Materials: Proceedings of the International Scientific Conference Dedicated to Academician T. Loladze* (pp. 117–124). Tbilisi: Georgian Technical University. *(In Georgian)*
4. Khurodze, R., & Grigalashvili, J. (2024). *Fundamentals of Programming Programmable Logic Controllers* (ISBN 978-9941-512-39-1). Tbilisi: Georgian Technical University Library, CD–7436, 292 pages. *(In Georgian)*

UDC 004.896:621.43:621.3.049.77
SCOPUS CODE 1802
https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-180-189

A Fuzzy logic Controller for Servo Motor Speed Based on Arduino Due

Jemal Grigalashvili Department of Control Systems and Automation, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 75, M. Kostava str.
E-mail: j.grigalashvili@gtu.ge

Reviewers:
S. Khoshtaria, Associate Professor, Faculty of Informatics and Control Systems, GTU
E-mail: s.xoshtaria@gtu.ge
N. Maglakelidze, Associate Professor, Faculty of Informatics and Control Systems, GTU
E-mail: n.maglakelidze@gtu.ge

Abstract. In the article, the author discusses the development of a real-time fuzzy logic controller for controlling the speed of a DC servo motor, which is currently very relevant (in FPV and winged drones, animatronics, etc.), using the Arduino Due controller. The proposed controller is based on Mamdani's approach and verified with the resources of the MATLAB Fuzzy Logic toolbox and Simulink extension packages. During real-time operation, the behavior of the DC motor and the response of the fuzzy logic controller are recorded graphically, and the data are stored in MATLAB without interrupting the operation of the logic controller. Based on these data observations, the system setup and fall times are calculated for each individual period of the input trajectory. It is observed that the system reset time was reduced using this approach. The paper analyzes the performance of Arduino Due using fuzzy logic control approach for DC servo motor. The system response showed satisfactory performance for the specific application.

Keywords: Analog-to-digital converter; Arduino Due controller; Assignment functions; Defuzzification; functional/arbitrary generator Hunteck 1225; Fuzzification; Fuzzy inference system; Fuzzy logic controller; Fuzzy rule base; Linguistic fuzzy variables; Mixed-signal oscilloscope PicoScope 2205; Pulse width modulation; Servo motor.

განხილვის თარიღი 14.03.2025
შემოსვლის თარიღი 18.03.2025
ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.09.2025