

## მაკორექტირებელი რგოლების ანალიზი ავტომატური რეგულირების სისტემებში

ომარ კოტრიკაძე, ქეთევან კოტრიკაძე, ალექსანდრე დემეტრაშვილი  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### რეზიუმე

ავტომატური რეგულირების სისტემების დაგეგმარება და რეალიზაცია საკმაოდ შრომატევადი სამუშაოა. ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიღებული ამ სისტემის უცვლელი ნაწილის შენარჩუნებაა. ამისათვის აუცილებელია მაკორექტირებელი რგოლების შერჩევა, ისე, რომ ისინი აკმაყოფილებდეს მასში მიმდინარე დინამიკურ პროცესებს და შეესაბამებოდეს ტექნიკური დავალების მოთხოვნებს. ასეთი ამოცანის გადაჭრა პრაქტიკული ექსპერიმენტების საშუალებით საკმაოდ რთულია და ხშირად უშედეგო ამოცანაა. სტატიაში ნაჩვენებია არსებული პრობლემის გადაჭრის გზები, მეთოდები და სირთულეები. განხილულია მაკორექტირებელი რგოლის რეალური, იდეალური და ბალასტის გადაცემის ფუნქციები. შემავალი სიგნალის წყაროს წინაღობის კომპენსაციის და მახასიათებელი განტოლების ფესვთა ტრანექტორიების (ფესვური ჰოდოგრაფების) აგების შესაძლებლობები. განხილულია მაკორექტირებელი რგოლის პარამეტრების სინთეზის ამოცანის გადაწყვეტის შესაძლებლობა ფესვური ჰოდოგრაფების მეთოდით.

**საკვანძო სიტყვები:** ავტომატური რეგულირების სისტემა. მაკორექტირებელი რგოლი. თვისობრივობის მაჩვენებელი. გადაცემის ფუნქცია. ფესვური ჰოდოგრაფი.

### 1. შესავალი

ავტომატური რეგულირების სისტემის (არს) დაგეგმარების პროცესი მოიცავს სამ ძირითად ეტაპს: ენერგეტიკული ანგარიში, დინამიკური ანალიზი და სინთეზი, ექსპერიმენტული კვლევები. ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიიღება არს-ის ფუნქციონალური სქემა. დაგეგმარების ამ ეტაპზე ხდება არს-ის ძირითადი ელემენტების შერჩევა (მავალელები, საზომი გარდამსახები, წინასწარი და სიმძლავრის მამლიერებლები, შემსრულებელი მექანიზმები, მარეგულირებელი ორგანოები და ფუნქციონალური გარდამსახები, საზომი გარდამსახი და ა.შ.); ხორციელდება ტექნიკური მოთხოვნილი სიზუსტის უზრუნველყოფა; შუალედური ელემენტების ანგარიში და შერჩევა. ამგვარად, ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად შეიძლება აგებული იქნას არს-ის ფუნქციონალური სქემა ელემენტების ტიპის ან პარამეტრების მითითებით. სქემის ყველა ელემენტი შერჩეულია ტექნიკური მოთხოვნების შესაბამისად და რეგულირებით ობიექტის თვისებებიდან გამომდინარე. გამოდის, რომ ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიღებული არს-ის სქემა შეიცავს ისეთ ელემენტებს, რომელთა შეცვლაც სხვა იგივე დანიშნულების ელემენტებით ან შეუძლებელია ან არასასურველია.

### 2. ძირითადი ნაწილი

ავტომატური რეგულირების სისტემისთვის (არს) ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიღებული არს-ის სქემა თავის ელემენტებით უცვლელად უნდა იქნას შენარჩუნებული, ამიტომ ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიღებულ არს-ს, სისტემის უცვლელ ნაწილს უწოდებენ [1,2].

დინამიკის ანალიზის სინთეზის ეტაპის საწყისი მონაცემებია: სისტემის ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიღებული უცვლელი ნაწილის სქემა და ტექნიკურ დავალებებში მოცემული და მოთხოვნილი დინამიკის თვისობრივობის მაჩვენებლები.

ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიღებული არს-ი უმეტეს შემთხვევაში არამდგრადია ან თუ მდგრადია მისი დინამიკა მიუღებელია. ტექნიკური დავალების მოთხოვნების შესაბამისი დინამიკური პროცესის მისაღებად აუცილებელია არს-ის სქემაში შეტანილ იქნას ისეთი ცვლილებები, რომლებიც უზრუნველყოფს სასურველ დინამიკურ პროცესს. რადგანაც ჩვენ ხელთ არის არს-ის სქემა, რომლის ელემენტების შეცვლა არ შეიძლება (სისტემის უცვლელი ნაწილი), ამიტომ ერთადერთი გზა სასურველი მიზნის მისაღწევად არის სისტემაში ჩართონ დამატებითი მოწყობილობა, რომელიც არს-ს მიანიჭებს სასურველ დინამიკურ თვისებებს.

ავტომატური მართვის თეორიაში ამისთვის იყენებენ მაკორექტირებელ მოწყობილობას. მისი სქემა მუდმივი უნდა იყოს. გარდა ამისა, ამ მოწყობილობის სისტემაში ჩართვა არ უნდა იწვევდეს ტექნიკურ და ტექნოლოგიურ სიძნელებებს და მაკორექტირებელი მოწყობილობის ჩართვით, არს-ის საიმედოობა არ უნდა შემცირდეს.

ყველა ამ თვისებებს აკმაყოფილებს პასიური RC რგოლები. ასეთი წრედების სქემები ხშირად მოცემულია სპეციალურ ცხრილებში [3], რომლებშიც სქემის გარდა მითითებულია: წრედის გადაცემის ფუნქცია, პარამეტრების საანგარიშო ფორმულები და სინთეზის მახასიათებლები. ამგვარი საცნობარო მასალა არს-ის დამგეგმარებელს ათავისუფლებს მაკორექტირებელი RC წრედის სინთეზის ამოცანის ამოხსნისაგან. კერძოდ, თუ ინჟინერისთვის ცნობილია მაკორექტირებელი RC წრედის გადაცემის ფუნქცია, მას შეუძლია RC წრედების ცხრილიდან შეარჩიოს სათანადო სქემა. ასეთი სქემებისთვის ასევე შეიძლება შეირჩეს ლოგარითმულ-ამპლიტუდურ-სინთეზის მახასიათებლებიც.

არს-ის დაგეგმარების ბოლო ეტაპია სისტემის ექსპერიმენტული კვლევა. ამ ეტაპის ერთ-ერთ ძირითადი ამოცანაა მაკორექტირებელი RC წრედების პარამეტრების ისეთი მნიშვნელობების მოძებნა და დაყენება, რომლებიც უზრუნველყოფს სასურველ დინამიკურ პროცესს. მაკორექტირებელი წრედების პარამეტრების ექსპერიმენტულ კვლევას ყოველთვის არ მიყვარათ სასურველ შედეგამდე და უმეტეს შემთხვევაში აუცილებელი ხდება დინამიკის სინთეზის შედეგად მიღებული სქემის შეცვლა.

აღსანიშნავია, ის გარემოება, რომ სისტემის მკვლევარს აპრიორულად არავითარი ინფორმაცია არ აქვს იმის თაობაზე, თუ როგორ შეცვალოს მაკორექტირებელი მოწყობილობის სქემა და რა მიმართულებით ცვალოს მისი პარამეტრები სასურველი მიზნის მისაღწევად. გამორიცხული არაა შემთხვევებიც, როცა ექსპერიმენტით მაკორექტირებელი წრედის სქემის და პარამეტრების დადგენა შეუძლებელია.

რა არის მიზეზი იმისა, რომ თეორიულად მიღებული შედეგი ასე შორსაა პრაქტიკულად საჭირო შედეგისაგან? რა უნდა გაკეთდეს, იმისათვის, რომ დინამიკის სინთეზის შედეგად მიღებული მაკორექტირებელი მოწყობილობის სქემამ პრაქტიკულად უზრუნველყოს სასურველი დინამიკური პროცესი?

თეორიულად მიღებული შედეგების აცდენა პრაქტიკულ შედეგებთან შედარებით გამოწვეულია იმ ფაქტით, რომ მაკორექტირებელი რგოლების სტანდარტულ ცხრილებში არ არის გათვალისწინებული შემავალი სიგნალის წყაროს შიგა წინაღობა. რეალობაში

მაკორექტირებელი რგოლისათვის, რომელიც ჩართულია არს-ში შემავალი სიგნალის წყაროს წინაღობა არ არის ნულის ტოლი და იგი რამდენიმე ასეულ ომს შეიძლება აღწევდეს. ასევე მას აქვს, როგორც ინდუქტიური ასევე ტევადური მდგენელებიც, რაც უზუსტობას მაკორექტირებელი რგოლების ცხრილურ მონაცემებთან შედარებით კიდევ უფრო ზრდის.

მაკორექტირებელი რგოლის ზუსტი მუშაობისათვის ასევე აუცილებელია მისი გამოსავალი წრედის წინაღობა, რაც შეიძლება დიდი იყოს. პრაქტიკაში ეს პირობა ძირითადად დაცულია და მიზნის მიღწევა მარტივად შეიძლება, დატვირთვის წრედთან მიმდევრობით დამატებითი წინაღობის ჩართვით.

თუ მაკორექტირებელი რგოლის გადაცემის ფუნქციაში არ გავითვალისწინებთ შემავალი სიგნალის წყაროს (შსწ) შიგა წინაღობის ოპერატორის პარამეტრების მნიშვნელობებს, მაშინ ადგილი ექნება მაკორექტირებელი წრედის სიხშირული და დინამიკური თვისებების მნიშვნელოვან გადახრას იმ თვისებებიდან, რომლებსაც საკუთრივ მაკორექტირებელი წრედის ცხრილური გადაცემის ფუნქცია განაპირობებს [3].

სწორედ ეს გახლავთ მიზეზი იმისა, რომ ანგარიშის შედეგად მიღებული მაკორექტირებელი სქემა ვერ უზრუნველყოფს სისტემის სასურველ დინამიკურ პროცესს.

სინთეზის ამოცანის ამოხსნისას შსწ-ს შიგა წინაღობას, როგორც წესი, უგულებელყოფენ, რასაც მივყავართ იმ განსხვავებამდე, რაც რეალურ და სასურველ დინამიკას შორის არსებობს. გამოდის, რომ კორექტირებული არს-ის კომპლექსური სტრუქტურა განსხვავდება იმ სტრუქტურისგან, რომელიც დინამიკის სინთეზის ამოცანის ამოხსნის შედეგადაა მიღებული.

თანამედროვე მართვის ტექნოლოგიით თუ ვისარგებლებთ, შეიძლება ითქვას, რომ საქმე გვაქვს სტრუქტურულ რობასტულობასთან (სისტემის რეალური სტრუქტურა, განასხვავდება საანგარიშო სტრუქტურისგან).

რა უნდა გაკეთდეს იმისათვის, რომ მაკორექტირებელი მოწყობილობის სინთეზის დროს გათვალისწინებული იქნას შსწ-ს შიგა წინაღობის ოპერატორი? ან თუ შეიძლება ამ ოპერატორის ავტომატური მართვის სისტემაზე (ამს) სტრუქტურაზე ზეგავლენის კომპენსაცია. ასეთი სახის ამოცანა შეიძლება გადაიჭრას ფესვური ჰოდოგრაფების მეთოდით. ამ მეთოდის საშუალებით შესაძლებელია ავგოთ ფესვთა მოძრაობის ტრექტორია, როდესაც ადგილი აქვს არს-ის კორექციის რამდენიმე პარამეტრის ერთდროულ ცვლილებას.

განვიხილოთ მაგალითი. დავუშვათ, ლოგარითმულ-ამპლიტუდურ-სიხშირული მახასიათებლების (ლასმ) მეთოდით მაკორექტირებელი წრედის სინთეზის შედეგად, მიღებული იქნა ამ წრედის გადაცემის ფუნქცია:

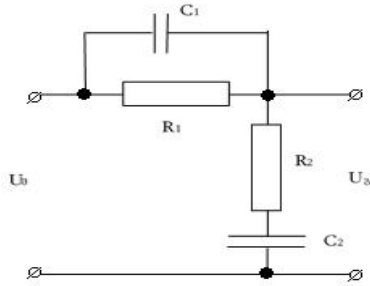
$$W(s) = \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{(T_3s + 1)(T_4s + 1)} \quad (1)$$

სადაც

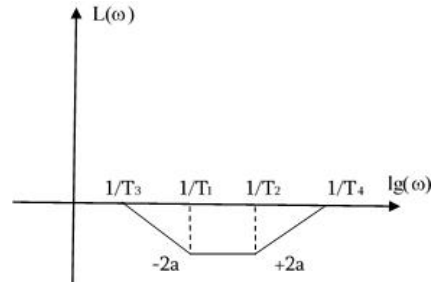
$$T_1 = R_1C_1; T_2 = R_2C_2; T_3T_4 = T_1T_2; T_3 + T_4 = T_1 + rT_2 \quad \text{და}$$

$$r = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

მაკორექტირებელი წრედის სქემა გამოსახულია 1-ელ ნახაზზე, ხოლო შესაბამისი ლასმ-ი მე-2 ნახაზზე.



ნახ. 1. მაკორექტირებელი წრედის სქემა



ნახ. 2. მაკორექტირებელი წრედის ლასმ-ი

(1) გადაცემის ფუნქციაა, როგორც აღვნიშნეთ, დაწერილია იმ შემთხვევისთვის როცა  $U_a$  ძაბვის წყაროს გამომავალი წინაღობა ნულია, ხოლო  $U_b$  ძაბვა მოდებულია დატვირთვის უსასრულო წინაღობაზე. თუ  $U_a$  ძაბვის წყაროზე გასავალი წინაღობის ოპერატორია  $r+LS$ , ხოლო დატვირთვის წინაღობა  $R_2 \rightarrow \infty$ , მაშინ 1-ელ ნახაზზე გამოსახული სქემის გადაცემის ფუნქცია იქნება:

$$W(S) = \frac{(T_1S + 1)(T_2S + 1)}{P(S)} \quad (2)$$

სადაც

$$P(S) = T_1T_2\ddagger S^3 + (mT_1T_2 + T_2\ddagger + T_1T_2)S^2 + (mT_2 + nT_2 + T_1 + T_2)S + 1 \quad (3)$$

$$\ddagger = \frac{L}{R_2}; m = \frac{r}{R_2}; n = \frac{R_1}{R_2}$$

(1) და (2) გადაცემის ფუნქციების შედარებით იოლად დავრწმუნდებით, რომ  $P(S)$  პოლინომი მნიშვნელოვნად განსხვავდება (1) ფუნქციის მნიშვნელობისგან, ე.ი. ადგილი აქვს მაკორექტირებელი წრედის სტრუქტურის ცვლილებას, რომელიც ამ წრედის სინთეზის დროს მხედველობაში არ მიიღება, ანუ ადგილი აქვს სტრუქტურულ რობასტულობას.

კორექტირებული არს-ის სტრუქტურული რობასტულობა შეიძლება დახასიათებული იქნას ბალასტის გადაცემის ფუნქციით, რომელსაც ხშირად იყენებენ სამრეწველო ავტომატიკაში [2,7]:

$$W(S) = W_b(S)W_{\text{ფ}}(S) \quad (4)$$

სადაც  $W_b(S)$  – ბალასტის გადაცემის ფუნქციაა, რომელიც ჩვენს შემთხვევაში ტოლი იქნება:

$$W_b(s) = \frac{(T_3S + 1)(T_4S + 1)}{P(S)} \quad (5)$$

ცხადია, რომ მაკორექტირებელი წრედის (1) იდეალური ფუნქციის მისაღებად საჭიროა  $W_b(S)$  ტოლი იყოს ერთის. ამ ტოლობის ზუსტი მიღწევა ამ შემთხვევაში შეუძლებელია, მაგრამ იგი შეიძლება უზრუნველყოთ მიახლოებით. ამისათვის საჭიროა  $P(S)$  პოლინომის კოეფიციენტთა მნიშვნელობების ისეთი კომპლექტის პოვნა, რომლიც უზრუნველყოფს  $P(S)$  -ის პოლინომის ფესვებს:  $-1/T_3$ ,  $-1/T_4$  და  $S_0$ .

ამ პოლინომის კოეფიციენტები ისე უნდა იქნას შერჩეული, რომ  $S_0$  ფესვი რაც შეიძლება დაშორებულ იქნას ფესვთა სიბრტყის წარმოსახვითი ღერძიდან მარცხნივ.

თუ დაცული იქნება ეს პირობები, მაშინ

$$W_0(s) = \frac{1}{\ddagger S_0(S/S_0 - 1)} \quad (6)$$

რადგანაც  $|S_0| \gg \frac{1}{T_4}$ , ამიტომ (6) ფორმულაში მამრავლი  $(S/S_0 - 1)$  შემავალი უგულებელყოფთ და

$$W_0(S) = \frac{1}{\ddagger S_0} \quad (7)$$

ამგვარად, სტრუქტურული რობასტულობა დაყვანილი იქნა პარამეტრულ რობასტულობად, რაც გამოწვეულია (7) ბალასტით.

$P(S)$  პოლინომის ფესვების სასურველი მიმართულებით და სიდიდით ცვლილების ერთადერთი საშუალებაა ფესვური ჰოდოგრაფების მეთოდის გამოყენება, როგორც (3)-დან  $P(S)$ -ის პარამეტრზე  $\ddagger$ ,  $m$  და  $n$  ცვლილების შედეგად ჩვენ დავადგენთ  $P(S)$  პოლინომის ფესვების ტრაექტორიებს  $\ddagger$ ,  $m$  და  $n$  პარამეტრების ერთდროული ცვლილებებისას.

ასეთი ტრაექტორიების აგების შემდეგ საშუალება გვძლევა ვიპოვოთ პარამეტრების ის მნიშვნელობები, რომლებიც მოგვცემს სასურველ ფესვების განაწილებას.

$\ddagger$ ,  $m$  და  $n$  პარამეტრების ცვლილების შედეგად მიღებული ფესვების ტრაექტორიების ანალიზით ცხადად გამოჩნდება  $P(S)$  პოლინომის ფესვების ჩვენთვის სასურველი განაწილების შედეგის შესაძლებლობა. გარდა ამისა, მარტივად დგინდება ცვლადი პარამეტრების ის მნიშვნელობები, რომელსაც სასურველ შედეგამდე მივყავართ.

ზოგჯერ  $P(S)$ -ის სასურველი ფესვების მნიშვნელობები შეიძლება მიღებული იქნას პარამეტრების სხვადასხვა მნიშვნელობებისას. ასეთ შემთხვევაში შერჩეული უნდა იქნას პარამეტრების მნიშვნელობები, რომლებიც გამართლებული იქნება ტექნიკური რეალიზაციის თვალსაზრისით [4, 5].

ამგვარად კორექტირებული სისტემის სტრუქტურული რობასტულობის თავიდან აცილებით, ანუ მისი კომპენსაცია შესაძლებელია ერთადერთი გზით;  $P(S)$  პოლინომის ფესვების ჩვენთვის სასურველი განაწილებით, რაც შეიძლება მიღწეული იქნას მხოლოდ და მხოლოდ ამ პოლინომის ფესვების ტრაექტორიების სრული სურათის გამოყენებით. ამისათვის კი შესაძლებელია ფესვური ჰოდოგრაფის აგების გრაფო-ანალიზური მეთოდის გამოყენება. ასეთი მიდგომა გაცილებით აიოლებს სინთეზის ამოცანის გადაწყვეტას.

### 3. დასკვნა

ავტომატური რეგულირების სისტემის ენერგეტიკული ანგარიშის შედეგად მიღებული არს-ის უცვლელი ნაწილის შენარჩუნება ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი საკითხია. სტატიაში ამ პრობლემის გადასაჭრელად განვიხილეთ მაკორექტირებელი რგოლების დანიშნულება, მათი პარამეტრების სინთეზის ამოცანა, როდესაც მხვედლობაში ვდებულობთ შემავალი სიგნალის წყაროს აქტიურ წინაღობას; მაკორექტირებელი RC რგოლის გადაცემის ფუნქცია, ბალასტის ფუნქცია და და მისი კომპენსაციის გზები ფესვური ჰოდოგრაფის მეთოდის გამოყენებით.



**ლიტერატურა - References – Литература:**

1. გუგუშვილი ა., ხუროძე რ., და სხვ. (1999). მართვის თეორია, წ.1, სტუ; თბ.
2. Бессекерский В.А. (1996). Руководство по проектированию систем автоматического управления. -М., изд. „Высшая школа“
3. Зайцев Т.Ф. (1989). Коррекция систем автоматического управления потаянного и переменного тока. -М., изд. „Энергия“
4. Evans W.R. (1950). Control systems sintesis by root locus method. Trans AJEE 69
5. Котрикадзе О.Г. (2004). Аналитические основы построения корневых годографов. Сб. Док. Межд. научной конф. "Проблемы урпавления и энергетики", №8, Тб.
6. Richard C., Dorf R.H. (2008). Modern Control Systems. USA: Pearson Education Inc.

**ANALYSIS OF CORRECTIVE UNITS IN AUTOMATIC  
CONTROL SYSTEMS**

Kotrikadze Omar, Kotrikadze Ketevan, Demetrashvili Alexander  
Georgian Technical University

**Summary**

Creation and implementation of Automatic Control Systems is quite laborious work. One of the main tasks is to preserve the unchanged part of the Automatic Control System, after the energy calculation. To do this, you need to choose a correction device that will provide the desired dynamic process and will meet the requirements of the technical specifications. The solution of such a problem with the help of practical experiments is rather difficult and often unsuccessful. The article shows the ways, methods and complexity of solving the problem. In article are considered the real, ideal and ballast predicative functions of the corrective element. The possibility of constructing root trajectories (root locus) under the conditions, when the resistance of the input source of the corrective element is different from zero. The possibility solving the problem of the synthesis correction parameters by the root locus method.

**АНАЛИЗ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЗВЕЬЕВ В СИСТЕМАХ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Котрикадзе О., Котрикадзе К., Деметрашвили А.  
Грузинский Технический Университет

**Резюме**

Создание и реализация систем автоматического регулирования довольно трудоемкая работа. Одной из основных задач является сохранение неизменной части системы автоматического регулирования после энергетического расчета. Для этого необходимо выбрать корректирующее устройство, которое обеспечит желаемый динамический процесс и будет соответствовать требованиям технического задания. Решение такой задачи с помощью практических экспериментов довольно трудемко и часто безуспешно. В статье показаны пути, методы и сложности решения проблемы. Рассмотрены реальные, идеальные и балластные предаточные функции корректирующего звена. Возможность построения корневых траекторий (корневых годографов) при условиях, когда сопротивление источника входного сигнала корректирующего звена отличается от нуля. Рассматривается возможность решения задачи синтеза корректирующих параметров методом корневого годографа.