

UDC 621.382

სერიულად ვარგისი ელექტრონული სქემების დაპროექტების ამოცანა

არჩილ ფრანგიშვილი¹, ოლეგ ნამიჩეიშვილი², გიორგი ჟღენტი³,
ლევან ჭოლიკიძე⁴

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, მ. კოსტავას ქ., 77, 0175 თბილისი, საქართველო
¹a_prangi@gtu.ge, ²oleg_namichishvili@hotmail.com, ³g.zhgenti@airnav.ge, ⁴levanice@yahoo.de

ანოტაცია

ნაშრომში კვლევის ობიექტია ელექტრონული სქემა, ხოლო კვლევის საგანს წარმოადგენს ამ ობიექტის მანქანური დაპროექტება პარამეტრული მტყუნებების გათვალისწინებით და სერიული ვარგისიანობის უზრუნველყოფა მისი მასობრივი წარმოების პირობებში. უპირატესობა ეძლევა სქემების ან სისტემების დაპროექტებისას სტატისტიკური კრიტერიუმების გამოყენებას და ამ პროცესის განხორციელებას ორ ეტაპად. პირველ - დეტერმინირებულ - ეტაპზე იძებნება ე.წ. დასაშვები ამონახსნი, ანუ ელემენტთა პარამეტრების იმ მნიშვნელობათა ნაკრები ან ერთობლიობა, რომლებისთვისაც სრულდება ტექნიკურ მოთხოვნათა პირობები. მეორე - სტოქასტიკურ - ეტაპზე ხორციელდება პროდუქციის საწყისი გამომავალი ხარისხის ან საიმედოობის მაჩვენებლის ოპტიმიზაცია თანდათანობითი მტყუნებების მიხედვით, სახელდობრ: ა) დაპროექტების ამოცანის ხსენებული დასაშვები ამონახსნი გამოიყენება საწყის წერტილად და ბ) ელემენტთა პარამეტრების სტატისტიკური განაწილებების გათვალისწინებით ხორციელდება ამონახსნის შემდგომი ძებნა.

საკვანძო სიტყვები: მტყუნებათა ტიპები, სერიული ვარგისიანობა, პარამეტრული საიმედოობა, სისტემის შემავალი და გამომავალი მახასიათებლები, სამუშაო მდგომარეობათა სიმრავლე, დაპროექტების ამოცანათა მათემატიკური ასპექტები

§1 ზოგადი ცნობები დაპროექტების შესახებ

ზოგად შემთხვევაში დაპროექტება წარმოადგენს საძიებო, კვლევითი, გამოთვლითი და საკონსტრუქტორო სამუშაოების ერთობლიობას, რომლის მიზანია მოცემული მოთხოვნილებების დამაკმაყოფილებელი ახალი ტექნიკური ობიექტის შექმნა. ელექტრონულ სქემათა დაპროექტების ამოცანათა ერთობლიობას კი ხშირად *სქემატური დაპროექტება* ეწოდება და დღეს ყოველმხრივ შეისწავლება [1-12].

ელექტრონული გამომთვლელი მანქანის სისტემატურ გამოყენებას დაპროექტების პროცესში ამოცანათა მანქანური ამოხსნის, ასევე დამპროექტებელსა და მანქანას შორის ფუნქციათა გამიჯვნის მეცნიერულად დასაბუთებული მეთოდების გამოყენებისას, ჩვეულებრივ, *დაპროექტების ავტომატიზაციად* მიიჩნევა. უკანასკნელი ნიშნავს, რომ ელექტრონულ გამომთვლელ მანქანას უნდა დაეკისროს ამოცანები, რომლებიც აკმაყოფილებს ალგორითმიზაციის სიადვილისა და ალგორითმის შესრულების მეტი

ეფექტურობის მოთხოვნებს ხელით განხორციელების მეთოდთან შედარებით, ხოლო ადამიანს უნდა მიენდოს შემოქმედებითი ხასიათის სამუშაო.

დაპროექტების პროცესის ორგანიზაციის ფორმად, უფრო ხშირად, იყენებენ *ავტომატიზებული დაპროექტების სისტემებს* (ინგლ. CAD – Computer-Aided Design), რომლებშიც ამოცანის გადაწყვეტა უზრუნველყოფილია აპარატული საშუალებების, ასევე ზოგადი და სპეციალური დანიშნულების პროგრამათა ერთობლიობით. ამ პროგრამათა დამუშავება ხდება დასაპროექტებელი ობიექტების მოდელებისა და მათი ეფექტურობის მახასიათებელთა გაანგარიშების საფუძველზე.

§2 სისტემისა და მისი მახასიათებლების ცნება

2.1 სისტემის ზოგადი განსაზღვრება

ნებისმიერ ობიექტს, რომელიც შემდგომ დანაწევრებას არ განიცდის და ამასთან ერთად მისი თვისებები მოცემულად მიიჩნევა, შეიძლება *ელემენტი* ვუწოდოთ.

ელემენტების ერთობლიობას, რომელიც წარმოდგენილია ერთ ორგანიზაციულ მთლიანობად რეგულარული თანამოქმედების გარკვეული ფორმის საშუალებით ფუნქციონირების საერთო მიზნების მისაღწევად, *სისტემას* უწოდებენ, ხოლო სისტემის თვისებები მისი შემადგენელი ელემენტების თვისებათა ფუნქციებია.

2.2 სისტემის შემავალი და გამომავალი მახასიათებლები

სიდიდეს, რომელიც ახასიათებს ობიექტის თვისებებს ან მუშაობის რეჟიმს, ამ ობიექტის *პარამეტრი*, ან *მახასიათებელი* ეწოდება.

ობიექტთა პარამეტრებს შორის განსაკუთრებით გამოყოფენ ე.წ. *გამომავალ პარამეტრებს*, რომლებითაც ხასიათდება სისტემის რეაქციები სხვადასხვა ფაქტორის ცვლილებაზე. სისტემის გამომავალი მახასიათებლები შეიძლება დავეყოთ *პირველად* და *მეორეულ* (მეორად) მახასიათებლებად. პირველადი მახასიათებლები წარმოადგენს სისტემის ეფექტურობისა და ფუნქციონირების მიზნებთან შესაბამისობის ზომას.

პირველად მახასიათებლებს შორის ეფექტურობის მაჩვენებლებად შეიძლება დასახელდეს მწარმოებლურობის, საიმედოობის, ღირებულების, მასის, გაბარიტების, სიზუსტის და ა.შ. მაჩვენებლები.

ფუნქციონირების მიზნებთან სისტემის შესაბამისობის ზომას კი წარმოადგენს ისეთი პირველადი გამომავალი მახასიათებლები, როგორცაა გაძლიერება, გატარების ზოლი, შემავალი და გამომავალი იმპედანსები, სიგნალის დამახინჯების ხარისხი, გენერირებული სიხშირე, გამომავალი ძაბვის პულსაცია, სიგნალის დაყოვნების დრო და სხვ.

მეორეულ (მეორად) პარამეტრთა რიცხვს კი მიეკუთვნება ყველა დანარჩენი გამომავალი პარამეტრი, რომლებიც არ წარმოადგენს სისტემის ეფექტურობისა და დანიშნულებასთან შესაბამისობის მაჩვენებლებს, მაგალითად, ძაბვები, დენები და სიმძლავრეები სქემის ცალკეულ შტოებში, $p-n$ გადასვლების ტემპერატურები ბიპოლარულ ტრანზისტორებში, შეერთებათა ადგილების ტემპერატურები და ა.შ.

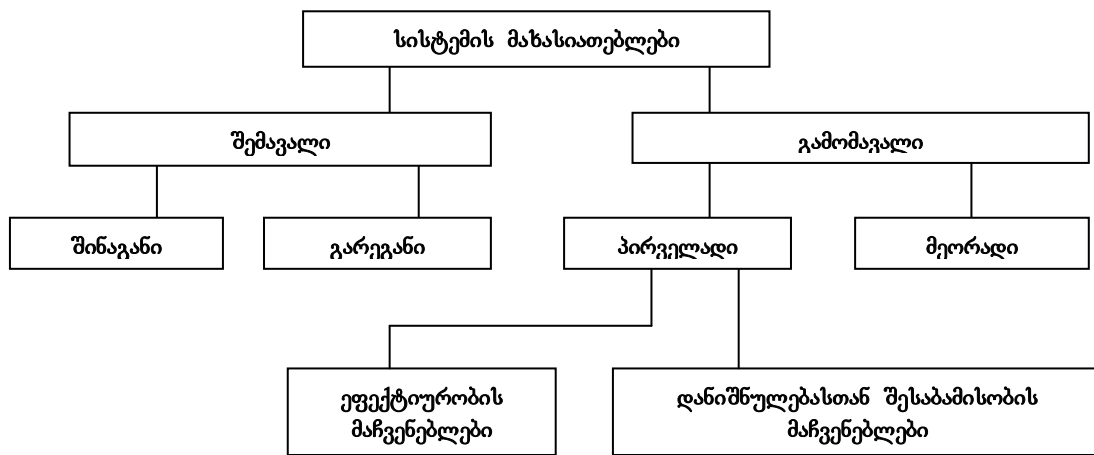
ნებისმიერ ფიზიკურ სიდიდეს, რომლის ცვლილებები იწვევს ცვლილებას სისტემის ფუნქციონირებასა და, მაშასადამე, მის გამომავალ მახასიათებლებში, ფართო გაგებით შეიძლება განიხილებოდეს *შემავალ პარამეტრად*.

სისტემის შემავალი პარამეტრები იყოფა *შინაგანი* და *გარეგანი მახასიათებლების* ორ ჯგუფად.

შინაგანი პარამეტრები ეს ელემენტების პარამეტრებია, რომლებიც უნდა დადგინდეს დაპროექტების პროცესში. ასეთი პარამეტრების მაგალითებია წინაღობა, ინდუქტივობა, ხელსაწყოს ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის დახრილობა, ტრანზისტორის გამლიერების კოეფიციენტი დენის მიხედვით საერთო ემიტერიან სქემაში, ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი და მისთანანი.

გარეგანი პარამეტრები ეს დაპროექტების ობიექტის მიმართ გარეგანი სუნსტანციის პარამეტრებია, რომლებიც გავლენას ახდენს მის ფუნქციონირებაზე. ასეთი სუნსტანციის როლში შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემავალი სიგნალის წყარო, დატვირთვა, გარემო და ა.შ. გარეგანი შემავალი პარამეტრების ტიპურ მაგალითებად მოიაზრება შემავალი სიგნალის პარამეტრები (მაბვა, დენი, სიხშირე, შინაგანი იმპედანსი, სიგნალის წყაროს ხმაური), დატვირთვის პარამეტრები, კვების წყაროს პარამეტრები (ე.მ.ძ, იმპედანსი), პარაზიტული ტევადობები და ინდუქტივობები, გარემოს ტემპერატურა და ტენიანობა, მასში აგრესიული მინარევების პროცენტული შემადგენლობა, რადიაციის, ვიბრაციის აჩქარების დონეები, ხელშეშლათა სიდიდე და ა.შ.

სისტემის მახასიათებელთა აქ გადმოცემული კლასიფიკაცია ასახულია ნახაზზე 1.



ნახ. 1. სისტემის მახასიათებელთა კლასიფიკაცია

დასასრულ უნდა აღინიშნოს, რომ სისტემის გამომავალი პარამეტრები დამოკიდებულია როგორც შემავალ პარამეტრებზე, ასევე ელემენტების ერთმანეთთან კავშირის თავისებურებებზე, რაც სქემის *ტოპოლოგიით* (სტრუქტურით, კონფიგურაციით) განისაზღვრება. ელემენტთა კავშირის ხერხის შეცვლა განსაზღვრავს ახალ სტრუქტურას და იწვევს სისტემის გამომავალი პარამეტრების ცვლილებას. ძირითად მსგავს ცვლილებებს იწვევს *ელემენტის ტიპის* შეცვლა ხარისხობრივად ახალი ტიპით. ამიტომ ელემენტთა ტიპები შეიძლება განვიხილოთ სისტემის *სტრუქტურის თავისებურებად*.

2.3 სისტემური (სასქემო) ფუნქციები

ვთქვათ, რომ

$$\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)' = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{pmatrix}$$

სისტემის გამომავალი პარამეტრების (მახასიათებლების) ვექტორს წარმოადგენს. შინაგანი შემავალი პარამეტრების ვექტორისათვის, სხვანაირად, ელემენტთა პარამეტრების ვექტორისათვის, შემდეგი აღნიშვნა მივიღოთ:

$$\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n).$$

დაბოლოს, შევთანხმდეთ გარეგანი შემავალი პარამეტრების ვექტორის აღნიშვნაზე სიმბოლოთი

$$\bar{W} = (W_1, W_2, \dots, W_p).$$

მაშინ გვექნება:

$$\bar{Y} = \bar{Y}(\bar{X}, \bar{W}),$$

სადაც ფუნქციურ დამოკიდებულებათა სახე სისტემის სტრუქტურით განისაზღვრება.

სკალარული ფორმით სისტემის გამომავალი მახასიათებლები ჩაიწერება როგორც შემავალი (შინაგანი და გარეგანი) პარამეტრების, ზოგად შემთხვევაში, არაწრფივი ფუნქციები:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= Y_1(X_1, X_2, \dots, X_n, W_1, W_2, \dots, W_p) \\ Y_2 &= Y_2(X_1, X_2, \dots, X_n, W_1, W_2, \dots, W_p) \\ &\vdots \\ Y_m &= Y_m(X_1, X_2, \dots, X_n, W_1, W_2, \dots, W_p) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

დამოკიდებულებას (2.1), რომელიც აკავშირებს სისტემის გამომავალ მახასიათებლებს შინაგან და გარეგან შემავალ პარამეტრებთან, *სისტემურ (სასქემო) ფუნქციებს* უწოდებენ.

ეს დამოკიდებულება ჩაკეტილი ანალიზური ფორმით, ჩვეულებრივ, ცნობილი არ არის. უმრავლეს შემთხვევაში კავშირი გამომავალ და შემავალ (გარეგან და შინაგან) პარამეტრთა ვექტორებს შორის მოიცემა ეგრეთ წოდებული *ალგორითმული სახით*, მაგალითად, როგორც განტოლებათა გარკვეული სისტემის ამონახსნი.

§3 დაპროექტების ძირითადი ეტაპები

აქ არ შევჩერდებით დაპროექტების პრობლემის, როგორც დამოუკიდებელი დისციპლინის, წვრილმანებზე, და მხოლოდ აღვწერთ იმ ფაზათა მიმდევრობას, რომლებსაც დაპროექტება შეიცავს (იხ. ნახ. 2). პროცესის ასეთი დანაწევრება, უმთავრესად, ლოგიკურ ასპექტში ხორციელდება მხოლოდ.



ნახ. 2 დაპროექტების ძირითადი ეტაპები

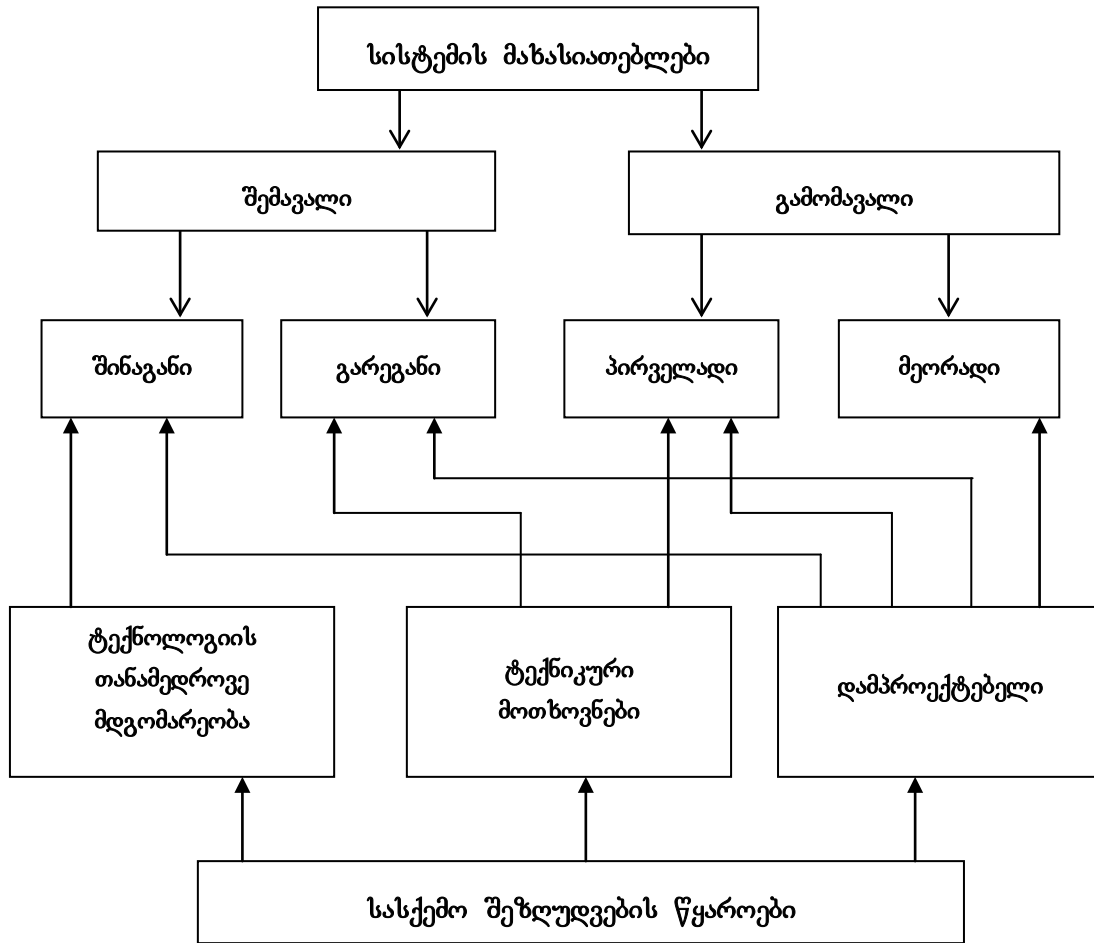
მას შემდეგ, რაც გაცნობიერდება გარკვეული სისტემის აუცილებლობა, იწყება მისი დაპროექტება ტექნიკური დავალების (ტდ) დამუშავებით. მისი შინაარსი განისაზღვრება დასაპროექტებელი ობიექტის დანიშნულებით. კერძოდ, ტექნიკურ დავალებაში ყალიბდება გარკვეული რაოდენობრივი მოთხოვნები გამომავალი პარამეტრების მიმართ, აისახება კონკრეტული რიცხვითი მნიშვნელობები, რომლებიც გარეგანი შემავალი პარამეტრების ცვლილების საზღვრებს ეხება. ტექნიკური დავალება შეიძლება აგრეთვე შეიცავდეს ზოგიერთი შეზღუდვის, მოთხოვნის ან პირობის ხარისხობრივ აღწერას, თუ მათი უშუალო რაოდენობრივი შეფასება ვერ ხერხდება.

შინაგან შემავალ პარამეტრებს ტექნიკურ დავალებაში, რომელიც კონკრეტული ფუნქციური დანიშნულების ელექტრონული სქემის დამუშავებას ეხება, ჩვეულებრივ, არ მიუთითებენ: მათი ჩამონათვალი და არსი სქემის სტრუქტურის არჩევის შემდეგ განისაზღვრება. მიუხედავად ამისა, ყოველთვის მხედველობაში უნდა ვქონდეს საკითხი ელემენტთა პარამეტრების ზღვრული მნიშვნელობების შესახებ. ეს ზღვრული მნიშვნელობები განისაზღვრება ტექნოლოგიის განვითარების არსებული მდგომარეობის (მაგალითად, გაძლიერების ზღვრული სიხშირე ან გადაცემის კოეფიციენტი დენის მიხედვით ტრანზისტორისათვის). შინაგან პარამეტრთა მრავალი შეზღუდვა უბრალოდ იგულისხმება. მაგალითად, რეზისტორების წინააღმდეგობებსა და კონდენსატორების ტევადობებზე დადებულია ბუნებრივი შეზღუდვები ქვემოდან: ამ ფიზიკური სიდიდეებისათვის უარყოფითი რიცხვითი მნიშვნელობები გამორიცხულია. სქემის ინტეგრალური შესრულების პირობებში იმავე პარამეტრებს დამატებით დაეძვება შეზღუდვები ზემოდანაც, რადგან ინტეგრალური ტექნოლოგია დიდი მნიშვნელობის წინააღმდეგობისა და ტევადობის რეზისტორებისა და კონდენსატორების მიღების საშუალებას არ იძლევა.

შესაქმნელი სქემის თავისებურებიდან გამომდინარე, დამპროექტებელს შეუძლია ზოგიერთი შინაგანი პარამეტრის ზღვრული მნიშვნელობის შემცირება, მაგრამ ტექნიკურ დავალებაში, როგორც წესი, ასეთი შეზღუდვები არ აისახება.

დამპროექტებელს შეუძლია შეზღუდვების არჩევა ზოგიერთ გარეგან შემავალ და პირველად გამომავალ პარამეტრებზეც. ასევე მის კომპეტენციაშია მსგავსი შეზღუდვების მთლიანად განსაზღვრა მეორეულ გამომავალ მახასიათებლებზე.

სიდიდეებს, რომლებიც შესულია ტექნიკურ დავალებაში და ასახავს მოთხოვნებს სქემის გამომავალ პარამეტრებზე, ტექნიკურ მოთხოვნებს (ტმ) უწოდებენ. ტექნიკური მოთხოვნები შეადგენს ნებისმიერი ტექნიკური დავალების ძირითად ნაწილს.



N

ნახ. 3 სასქემო შეზღუდვათა წყაროების ურთიერთკავშირი სისტემის მახასიათებლებთან

ნახაზი 3 გრაფიკული ფორმით ასახავს ურთიერთკავშირს სისტემის შემავალ და გამომავალ პარამეტრებზე დადებულ სასქემო შეზღუდვებსა და ამ შეზღუდვათა წყაროებს შორის. ასეთ წყაროებს წარმოადგენს ტექნოლოგიის განვითარების მიმდინარე მდგომარეობა, ტექნიკური მოთხოვნები და თავად დამპროექტებული.

საჭირო თანაფარდობებს გამომავალ პარამეტრებსა და ტექნიკურ მოთხოვნებს შორის შრომისუნარიანობის პირობებს უწოდებენ.

ტექნიკური დავალება დასაპროექტებელი ობიექტის ოპტიმალურობის კრიტერიუმის მითითებას ზოგჯერ ცხადი ფორმით შეიძლება არც კი შეიცავდეს, თუმცა მისი არსებობა სასურველია.

წინასწარი დაპროექტების ეტაპი დაკავშირებულია: ტექნიკური დავალების ანალიზთან მისი რეალიზაციის შესაძლებლობათა შესასწავლად; ახალი პრინციპების, სტრუქტურების, ტექნიკური საშუალებების კვლევასთან; არსებული ანალოგების საპატენტო ძებნასთან; ყველაზე ზოგადი გადაწყვეტილებების დასაბუთებასთან; პროექტის ეფექტურობის შესაფასებლად კრიტერიუმების არჩევასთან; ფუნქციების განაწილებასთან ცალკეულ კვანძსა და ბლოკს შორის (წარმოების მოთხოვნათა და მრეწველობის მიერ ნაწარმოები უნიფიცირებული ნაკეთობების გამოყენების

შესაძლებლობათა გათვალისწინებით). ამის შედეგს ტექნიკური წინადადება წარმოადგენს.

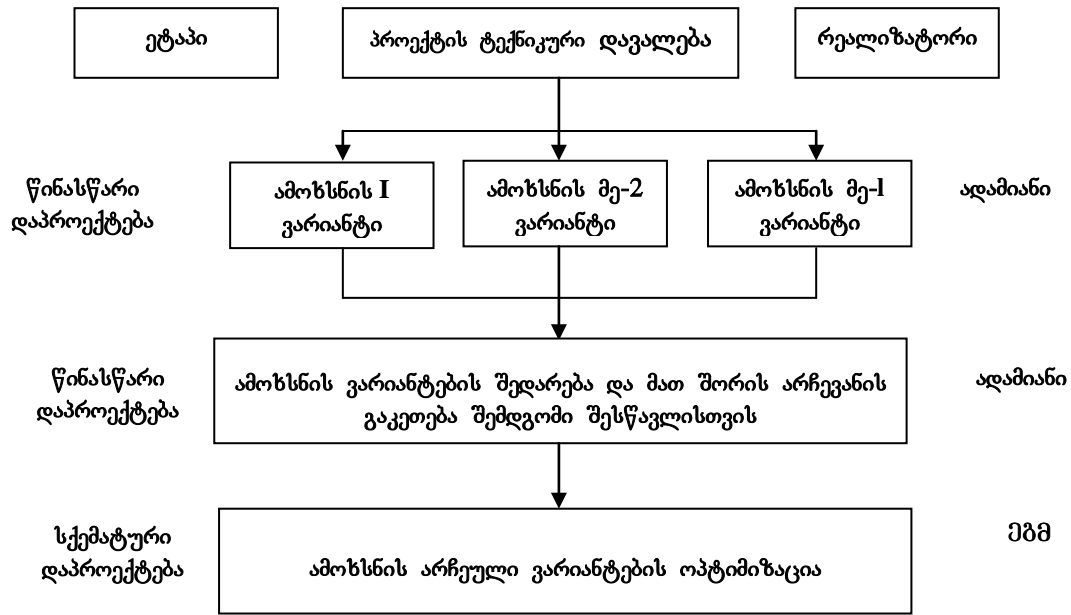
წინასწარი დაპროექტება მნიშვნელოვანწილად არაფორმალიზებადი, შემოქმედებითი პროცესია, რომელიც არასაკმარისად ცნობილი ალგორითმებით მიმდინარეობს. ელექტრონულ გამომთვლელ მანქანას იყენებენ მხოლოდ დამპროექტებლების მიერ მისაღებ გადაწყვეტილებათა ვარიანტების დასათვალიერებლად და ანალოგების მოსაძებნად (*საინფორმაციო-საძებნო სისტემის* საშუალებით).

სქემატური (სასქემო) დაპროექტების (სცჰემატიც დესიგნ) ეტაპზე ხორციელდება ფუნქციური სქემის იმ ვარიანტის ფორმალური სინთეზი, რომელიც წინასწარი დაპროექტების ადრინდელ ეტაპზე შეირჩა. სქემატური დაპროექტების მეთოდები უნდა უზრუნველყოფდეს ოპტიმალურ ელექტრულ გაანგარიშებას (გამოანგარიშებას, გამოთვლას) ზოგიერთი დასაბუთებულად არჩეული კრიტერიუმით.

თუმცა თეორიულ ასპექტში ამ ამოცანის გადაჭრისადმი გარკვეული მიდგომები არსებობს, პრაქტიკულად ფუნქციურ სქემათა მანქანური დაპროექტება გამოიყენება მმართველი და ოპერაციული მოწყობილობების ვიწრო კლასისათვის. არაწრფივი სქემების სინთეზის პრობლემა ემბრიონულ მდგომარეობაშია. საზოგადოდ, ფუნქციური სქემების ავტომატიზებული დაპროექტება წამოჭრის მრავალ ამოცანას, რომელიც გადაჭრას მოითხოვს. მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ დასახელებულ გარემოებათა მიუხედავად ელექტრონული გამომთვლელი მანქანის გამოყენება სქემატური დაპროექტების ფაზაში გაცილებით უფრო ფართოა, ვიდრე წინასწარი დაპროექტების ეტაპზე.

სქემატური დაპროექტება შეიძლება ასევე შეიცავდეს ფიზიკურ მოდელირებასა და სქემათა ვარიანტების შედარებით ანალიზს დასაპროექტებელი მოწყობილობის თავისებურებებზე ინფორმაციის დაგროვებისა და საანგარიშო თანაფარდობათა შემოწმების მიზნით. მაგრამ დაპროექტების მანქანური მეთოდების განვითარების კვალდაკვალ ფუნქციური სქემების ფიზიკური მოდელირების მოცულობა განუხრელად შემცირდება. ეს დაკავშირებულია იმასთანაც, რომ ძნელია ინტეგრალური სქემების საკმარისი დაწვრილებით მოდელირება დისკრეტული კომპონენტებით.

წინასწარი და სქემატური დაპროექტების ეტაპების ზემოთ აღწერილი ურთიერთკავშირი ახსნილია ნახაზით 4. აქ მთავარი ისაა, რომ სქემის ვარიანტის სტრუქტურა ფიქსირდება დამპროექტებლის ნება-სურვილით უკვე წინასწარი დაპროექტების ეტაპზე, ხოლო სქემატური დაპროექტების ეტაპზე მხოლოდ ამ ვარიანტის ოპტიმიზირება ხდება.

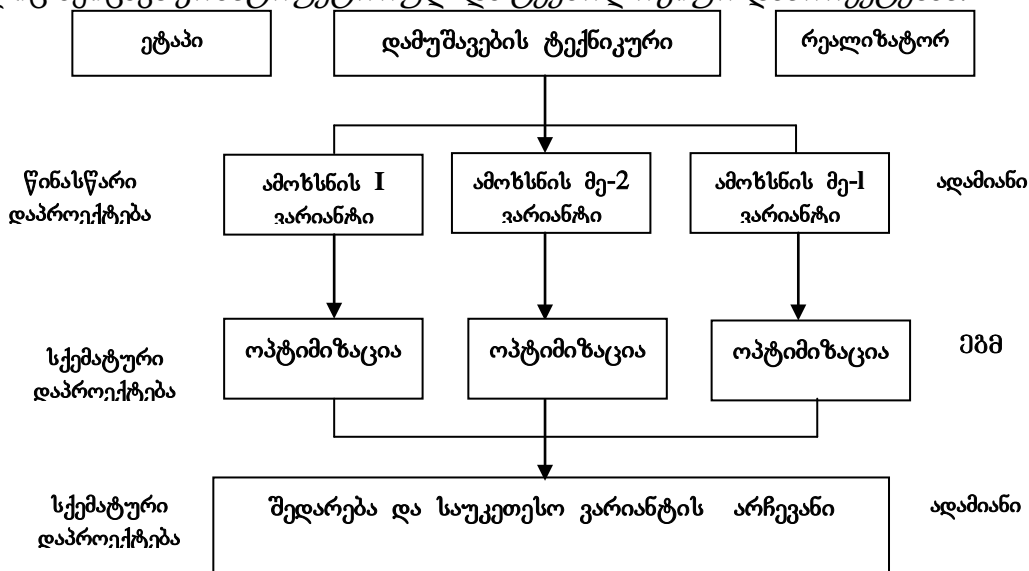


ნახ. 4. წინასწარი და სქემატური დაპროექტების პროცესების პრაქტიკაში რეალიზებული ურთიერთკავშირი

სავსებით შესაძლებელია ნახ. 5-ზე მოცემული ალტერნატიული მიდგომაც, როცა წინასწარი ფაზის ყველა სასქემო გადაწყვეტილების ანალიზი ხორციელდება სქემატური დაპროექტების ეტაპზე, ხოლო საუკეთესო ვარიანტი იმეზნება ერთისა და იმავე კრიტერიუმით ოპტიმიზირებულ სქემათა შორის.

უნდა აღინიშნოს, რომ ნახაზებზე 4 და 5 წარმოდგენილი ორი მიდგომიდან ნებისმიერს სქემატური დაპროექტების ფაზაში აქვს *იტერაციული სტრუქტურა*. ზოგჯერ ასეთი იტერაციების საფუძველზე მიიღება გადაწყვეტილებები გარკვეული კორექტივების შეტანის შესახებ საკვლევ სქემაში.

სქემატური დაპროექტების შედეგები წარმოადგენს შემავალ ინფორმაციას *სამუშაო (დეტალური) დაპროექტების* (detail planning, detail designing) მომდევნო ეტაპზე, რომელიც შეიცავს *კონსტრუქტორულ და ტექნოლოგიურ დაპროექტებას*.



ნახ. 5 ალტერნატიული მიდგომა წინასწარი და სქემატური დაპროექტების პროცესების ურთიერთკავშირის ორგანიზაციისადმი

კონსტრუქტორული დაპროექტების მიზანს წარმოადგენს გადასვლა ფუნქციური სქემიდან ურთიერთდაკავშირებული კონსტრუქციული ელემენტების, მოდულებისა და მოწყობილობების კონკრეტულ ნაკრებზე საჭირო ფუნქციის სარეალიზაციოდ; მათი ზომების, ფორმის, მასალისა და ურთიერთგანლაგების დადგენა; დოკუმენტაციის გამოშვება სისტემის საწარმოებლად და საექსპლუატაციოდ *საკონსტრუქტორო დოკუმენტაციის ერთიანი სისტემის* (უნიფიედ სესტემ ფორ დესიგნ დოკუმენტაციონ) ან ამის მსგავსი სტანდარტის მოთხოვნათა შესაბამისად.

ტექნოლოგიური დაპროექტების მიზანს კი წარმოადგენს ტექნოლოგიური დოკუმენტაციის დამუშავება და შედგენა, რომელიც აუცილებელია დაპროექტებული მოწყობილობის დასამზადებლად, საწარმოებლად.

სამუშაო (დეტალური) დაპროექტების ეტაპის (განსაკუთრებით, საკონსტრუქტორო ფაზის) ამოცანის ფორმალიზება ადვილად ხდება. ამიტომ ავტომატიზებული სისტემები, რომლებიც განკუთვნილია ელექტრონული სქემების საკონსტრუქტორო დაპროექტების ამოცანათა გადასწვეტად, გამოიყენება ფართოდ და ეფექტურადაც.

რა თქმა უნდა, დაპროექტების პროცესში გონივრული და დასაბუთებული გადაწყვეტილებები უნდა მიიღებოდეს უველა ფაზაში, მაგრამ პირველ ორ - წინასწარ და სქემატურ - ეტაპზე გადასაწყვეტი ამოცანების უდიდესი ნაწილი ატარებს შემოქმედებით ხასიათს, ხოლო მიღებული გადაწყვეტილებების გავლენა დასაპროექტებელი სისტემების გამომავალ მახასიათებლებზე განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია. ამიტომ სქემატური დაპროექტების ეტაპი წარმოადგენს განსაკუთრებული განხილვის საგანს მოცემულ ნაშრომში სერიულად ვარგისი ელექტრონული სქემების დაპროექტების პრობლემის გადაწყვეტის ალგორითმული საშუალებების შექმნის ასპექტში.

§4 ამონახსნთა არეების ცნება

გარკვეული, წინასწარ მიღებული, კრიტერიუმის მიხედვით ოპტიმალური შინაგანი შემავალი პარამეტრების გაანგარიშებას ელექტრონული სქემის მოცემული სტრუქტურის პირობებში *პარამეტრული ოპტიმიზაცია* ეწოდება. სხვანაირად რომ ვთქვათ, პარამეტრული ოპტიმიზაცია წარმოადგენს შინაგანი შემავალი პარამეტრების ისეთი $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ ვექტორის განსაზღვრის პროცედურას, რომლისთვისაც *მიზნობრივად* წოდებული რაღაც ფუნქცია ექსტრემალურ მნიშვნელობას იძენს.

შინაგან შემავალ პარამეტრებს, რომლებიც ოპტიმიზაციის პროცესში განისაზღვრება, *მართვადს* უწოდებენ.

ოპტიმიზაციის პროცედურათა აღწერისას ხშირად მიმართავენ *გეომეტრიულ წარმოდგენებს*. ამ წარმოდგენათა ფარგლებში განსახილველად შემოაქვთ n -განზომილებიანი სივრცე, რომლის საკოორდინატო ღერძებს წარმოადგენს მართვადი პარამეტრების ღერძები. ამ სივრცეს *მართვადი პარამეტრების სივრცეს* უწოდებენ. მის ნებისმიერ წერტილს შეესაბამება მართვადი პარამეტრების \bar{X} ვექტორის გარკვეული მნიშვნელობა. წერტილს, რომელიც შეესაბამება \bar{X} -ის არჩეულ მნიშვნელობას, *ამსახველ წერტილს* უწოდებენ. ამავე საფუძველზე შესაძლებელია *გამომავალი პარამეტრების სივრცის* ცნებით სარგებლობაც.

პოსტულატის სახით გამოითქმება აზრი, რომ მართვადი პარამეტრების სივრცეში არსებობს შემდეგი თვისებების მქონე $G_{\bar{Y}}$ არე: სქემებისათვის, რომლებიც მართვად პარამეტრთა სიდიდის შესაბამისად წარმოდგენილია წერტილებად ამ არის შიგნით, სრულდება შრომაუნარიანობის ყველა პირობა. ამ არეს *მისაღები ამონახსნების* არეს უწოდებენ, ხოლო მის შესაბამის ნებისმიერ ამსახველ წერტილს - *მისაღებ ამონახსნს*.

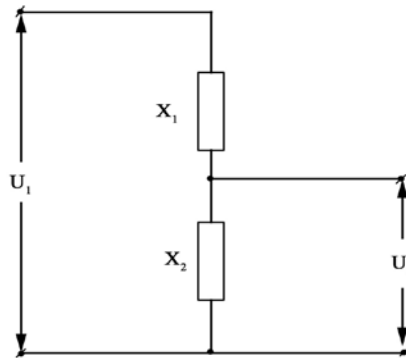
აღსანიშნავია, რომ მართვადი პარამეტრების მამვე არეში, ჩვეულებრივ, გამოყოფენ n -განზომილებიან პოლიედრს, რომლის წიბოები მოიცემა მართვადი პარამეტრების შესაძლო ცვლილებათა საზღვრებით. ამ არეს აღნიშნავენ $G_{\bar{X}}$ სიმბოლოთი და მას *შესაძლო ამონახსნების არეს* უწოდებენ. მისი შესატყვისი ნებისმიერი ამსახველი წერტილი *შესაძლო ამონახსნი* იქნება.

$G_{\bar{Y}}$ და $G_{\bar{X}}$ არეთა გადაკვეთას *დასაშვები ამონახსნების არეს* უწოდებენ და $G_{\bar{X}\bar{Y}}$ სიმბოლოთი აღნიშნავენ:

$$G_{\bar{X}\bar{Y}} = G_{\bar{X}} \cap G_{\bar{Y}}.$$

ნებისმიერი ამსახველი წერტილი, რომელიც ამ არეს მიეკუთვნება, *დასაშვებ ამონახსნს* წარმოადგენს.

შემოტანილი ცნებების გასარკვევად განვიხილოთ ძაბვის რეზისტორული დამყოფის მაგალითი, როლის სქემა ნაჩვენებია ნახაზზე 6.



ნახ. 6 ძაბვის რეზისტორული დამყოფი

მისი შემავალი წინააღმდეგობა შემდეგი სახით ჩაიწერება:

$$Y_1 = X_1 + X_2. \tag{4.1}$$

გადაცემის კოეფიციენტს კი ძაბვის მიხედვით ასეთი თანაფარდობა განსაზღვრავს:

$$Y_2 = X_2 / (X_1 + X_2). \tag{4.2}$$

დავუშვათ, რომ რეზისტორების X_1 და X_2 წინააღმდეგობათა X_{10} და X_{20} ნომინალური მნიშვნელობები აკმაყოფილებს

$$\left. \begin{aligned} X_{10} = X_{20} = x_0 \\ 0 < x_0 < \infty \end{aligned} \right\} \tag{4.3}$$

პირობებს. მაშინ შემავალი Y_1 წინააღმდეგობისა და ძაბვით გადაცემის Y_2 კოეფიციენტის Y_{10} და Y_{20} ნომინალური მნიშვნელობები შემდეგ სახეს შეიძენს:

$$\left. \begin{aligned} Y_{10} = 2x_0 \\ Y_{20} = 0.5 \end{aligned} \right\} \tag{4.4}$$

სქემის შრომისუნარიანობის პირობები ჩავწეროთ უტოლობების ფორმით

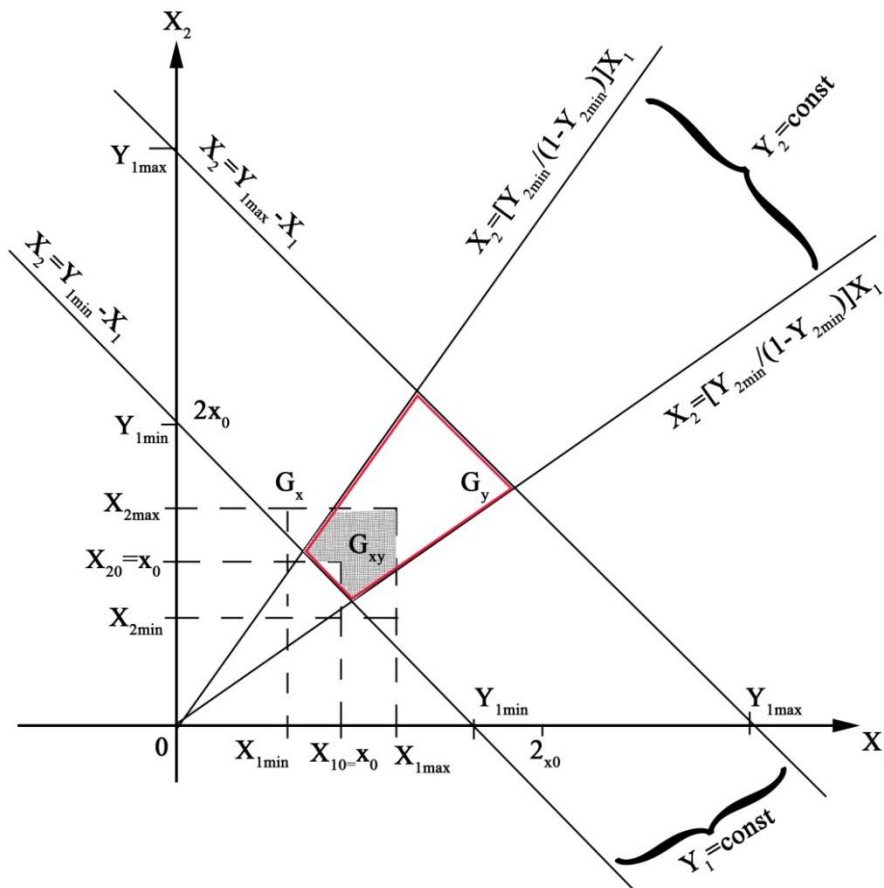
$$\left. \begin{aligned} Y_{1\min} \leq Y_1 \leq Y_{1\max} \\ Y_{2\min} \leq Y_2 \leq Y_{2\max} \end{aligned} \right\}, \quad (4.5)$$

სადაც

$$\left. \begin{aligned} 0 < Y_{1\min} < 2x_0 \\ 2x_0 < Y_{1\max} < \infty \\ 0 < Y_{2\min} < 0.5 \\ 0.5 < Y_{2\max} < \infty \end{aligned} \right\}. \quad (4.6)$$

მაშინ მისაღები ამონახსნების $G_{\bar{y}}$ არე, რომელიც ნაჩვენებია ნახაზზე 7, შემოფარგლული აღმოჩნდება ოთხი წრფით:

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= [Y_{2\min}/(1-Y_{2\min})] \cdot X_1 \\ X_2 &= [Y_{2\max}/(1-Y_{2\max})] \cdot X_1 \\ X_2 &= Y_{1\min} - X_1 \\ X_2 &= Y_{1\max} - X_1 \end{aligned} \right\}. \quad (4.7)$$



ნახ. 7 $G_{\bar{y}}$ მისაღები, $G_{\bar{x}}$ შესაძლო და $G_{\bar{x}\bar{y}}$ დასაშვები ამონახსნების არეები ძაბვის რეზისტორული დამყოფისათვის თითოეული მათგანი შეესაბამება სქემებს, რომლებშიც გადაცემის Y_2 კოეფიციენტს (ძაბვით) და შემვალ Y_1 წინააღმდეგობას ზრვრული მნიშვნელობები აქვს:

$$\left. \begin{aligned} Y_2 &= Y_{2\min} \\ Y_2 &= Y_{2\max} \\ Y_1 &= Y_{1\min} \\ Y_1 &= Y_{1\max} \end{aligned} \right\}. \quad (4.7')$$

შესაძლო ამონახსნების $G_{\bar{X}}$ არე, რომელიც შექმნილია სქემის შინაგან შემავალ პარამეტრებზე დადებული შეზღუდვებით

$$\left. \begin{aligned} X_{1\min} &\leq X_1 \leq X_{1\max} \\ X_{2\min} &\leq X_2 \leq X_{2\max} \end{aligned} \right\}, \quad (4.8)$$

წარმოადგენს მოცემულ შემთხვევაში მართკუთხედს მართვადი პარამეტრების არეში. უდა აღინიშნოს, რომ (4.5) შეზღუდვები, რომლებიც დადებულია სქემის გამომავალ პარამეტრებზე, ასევე ბადებს მოცემულ შემთხვევაში მართკუთხედს გამომავალი პარამეტრების სიბრტყეზე, მაგრამ მართვადი პარამეტრების სიბრტყეზე ამ მართკუთხედის პროექცია მოიცემა $G_{\bar{Y}}$ ტრაპეციის სახით.

ნახაზზე 7 მისაღები ამონახსნების $G_{\bar{Y}}$ სიმრავლის საზღვრები შემოვლებულია უწყვეტი წირით, ხოლო შესაძლო ამონახსნების $G_{\bar{X}}$ სიმრავლის საზღვრები - წყვეტილი წირით. $G_{\bar{X}}$ და $G_{\bar{Y}}$ არეთა გადაკვეთა იძლევა დასაშვები ამონახსნების $G_{\bar{X}\bar{Y}}$ არეს, რომელიც დაშტრიხულია. (X_{10}, X_{20}) ამსახველი წერტილი შეიძლება გამოვიყენოთ ერთ-ერთი დასაშვები ამონახსნის მაგალითად.

დასასრულ ხაზი უნდა გაესვას იმ გარემოებას, რომ მისაღები ამონახსნების $G_{\bar{Y}}$ არე $n > m$ პირობებში შეიძლება ღია აღმოჩნდეს, თუ ერთი ან რამდენიმე გამომავალი პარამეტრი შეზღუდულია მხოლოდ ქვემოდან. მაგალითად, ტექნიკური დავალება ელექტრონული მაძლიერებლის პრინციპული სქემის დასაპროექტებლად შეიძლება შეიცავდეს მოთხოვნას, რომ გაძლიერების კოეფიციენტი, შემავალი წინააღმდეგობა და ზედა ზღვრული სიხშირე აღემატებოდეს გარკვეულ დადგენილ მნიშვნელობებს.

§5 ელექტრონული სქემების დაპროექტების ამოცანათა მათემატიკური ფორმულირება

სქემაქტექნიკური დაპროექტების პრაქტიკული ამოცანების უმრავლესობაში არსებითია: სქემის შინაგან შემავალ პარამეტრებზე (სხვანაირად, ელემენტების პარამეტრებზე) დადებული პირდაპირი შეზღუდვები

$$\left. \begin{aligned} X_{i\min} &\leq X_i \leq X_{i\max} \\ i &= \overline{1, n} \end{aligned} \right\}, \quad (5.1)$$

რომლებიც იძლევა შესაძლო ამონახსნების $G_{\bar{X}}$ არეს; შეზღუდვები გარეგან შემავალ პარამეტრებზე

$$\left. \begin{aligned} W_{k\min} &\leq W_k \leq W_{k\max} \\ k &= \overline{1, p} \end{aligned} \right\}, \quad (5.2)$$

რომლებიც იძლევა დასაპროექტებელი ობიექტის ე.წ. სამუშაო მდგომარეობების $G_{\bar{W}}$ სიმრავლეს; და ასევე შეზღუდვები სქემის Y_1, Y_2, \dots, Y_m გამომავალ მახასიათებლებზე, რომლებიც X_1, X_2, \dots, X_n მართვადი პარამეტრების სივრცეში იძლევა მისაღები ამონახსნების $G_{\bar{Y}}$ არეს.

აქ $X_{i_{\min}}$ და $X_{i_{\max}}$ - სქემის i -ური ($i = \overline{1, n}$) შინაგანი შემავალი პარამეტრის შესაძლო მნიშვნელობების ქვედა და ზედა საზღვრებია შესაბამისად, ხოლო $W_{k_{\min}}$ და $W_{k_{\max}}$ - ანალოგიურ საზღვრებს წარმოადგენს k -ური ($k = \overline{1, p}$) გარეგანი შემავალი პარამეტრისათვის.

(5.1) პირდაპირი შეზღუდვების არსებობა დაკავშირებულია ფიზიკურად არარეალიზებადი (მაგალითად, უარყოფითი წინააღმდეგობების, ინდუქტივობების, ტევადობების), აგრეთვე ტექნიკურად, ეკონომიკურად, ტექნოლოგიურად და სხვა მოსაზრებებით მიუღებელი ამონახსნების განთესვის აუცილებლობასთან.

რაც შეეხება ტექნიკური დავალებითა და დამპროექტებლის მიერ ნაკარნახევ მოთხოვნებს სქემის გამომავალ პარამეტრებზე, ყველაზე უფრო ზოგადია ის შემთხვევა, როცა მათი, ვთქვათ, Y_1, Y_2, \dots, Y_μ ნაწილი უნდა იქნეს დაფიქსირებულ მნიშვნელობებს, ხოლო სხვა $Y_{\mu+1}, Y_{\mu+2}, \dots, Y_{m-1}, Y_m$ გამომავალ მახასიათებლებს შეუძლია ორმხრივი შეზღუდვებით მოცემულ არეებში ცვლილება:

$$\left. \begin{aligned} Y_j(X_1, X_2, \dots, X_n, W_1, W_2, \dots, W_p) &= Y_{j_0} \\ j &= \overline{1, \mu} \\ Y_{s_{\min}} &\leq Y_s(X_1, X_2, \dots, X_n, W_1, W_2, \dots, W_p) \leq Y_{s_{\max}} \\ s &= \overline{\mu+1, m} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

აქ Y_{j_0} სქემის j -ური ($j = \overline{1, \mu}$) გამომავალი პარამეტრის დაფიქსირებული მნიშვნელობაა, ხოლო $Y_{s_{\min}}$ და $Y_{s_{\max}}$ წარმოადგენს s -ური ($s = \overline{\mu+1, m}$) გამომავალი პარამეტრის შესაძლო მნიშვნელობების ქვედა და ზედა საზღვრებს.

ამ განხილვიდან გამომდინარე, ელექტრონული სქემის დაპროექტების ამოცანის მათემატიკურ ფორმულირებას შემდეგი სახე ექნება:

განისაზღვროს ელემენტთა X_1, X_2, \dots, X_n პარამეტრების ერთობლიობა, რომელიც აკმაყოფილებს (5.1) პირდაპირ შეზღუდვებს და უზრუნველყოფს (5.3) პირობათა შესრულებას (5.2) მოთხოვნებით მოცემული ნებისმიერი სამუშაო პირობისათვის.

კერძო შემთხვევაში ყველა მოთხოვნას სქემის გამომავალ პარამეტრებზე შეიძლება ჰქონდეს ორმხრივი შეზღუდვების ხასიათი. მაშასადამე, დაპროექტების ამოცანა შემდეგი ფორმულირებით აღმოჩნდება მოცემული:

განისაზღვროს ელემენტთა X_1, X_2, \dots, X_n პარამეტრების ერთობლიობა, რომელიც აკმაყოფილებს (5.1) პირდაპირ შეზღუდვებს და უზრუნველყოფს

$$\left. \begin{aligned} Y_{j_{\min}} &\leq Y_j(X_1, X_2, \dots, X_n, W_1, W_2, \dots, W_p) \leq Y_{j_{\max}} \\ j &= \overline{1, m} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

პირობათა შესრულებას (5.2) მოთხოვნებით განსაზღვრული ნებისმიერი სამუშაო პირობისათვის.

თუმცა მომდევნო განხილვა შემოიფარგლება (მათემატიკური ხასიათის მიზეზების გამო) უკანასკნელი ფორმულირებით, არ შეიძლება გვერდი ავარიდოთ მეორე უკიდურეს შემთხვევას, როცა დაპროექტების ამოცანა დაიყვანება ისეთი ამსახველი წეტილის განსაზღვრამდე, რომელიც უზრუნველყოფს სქემის ყველა შემავალი პარამეტრის ფიქსირებულ მნიშვნელობებს მოცემული შეზღუდვებისათვის შინაგან პარამეტრებზე გარკვეული სამუშაო მდგომარეობის პირობებში $G_{\overline{w}}$ სიმრავლიდან. თუ

ამასთან ერთად მხედველობაში არ იქნება მიღებული ელემენტების პარამეტრებზე დადებული პირდაპირი შეზღუდვები, მაშინ დაპროექტების ამოცანის დაყვანა შესაძლებელი ხდება განტოლებათა შემდეგი სისტემის ამონახსნის პოვნამდე:

$$\left. \begin{aligned} Y_j(X_1, X_2, \dots, X_n, W_1, W_2, \dots, W_p) = Y_{j0} \\ j = \overline{1, m} \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

სპეციალური შემთხვევების გამოკლებით, განტოლებათა (5.5) სისტემის ამონახსნი ვერ მიიღება.

უმარტივესი მაგალითის სახით განვიხილოთ ისეთი განტოლებების შედგენა, რომლებიც დაპროექტების ამოცანის ამოხსნის საშუალებას იძლევა, როცა სქემის ყველა გამომავალი პარამეტრი წინასწარ არის დაფიქსირებული. საქმე ეხება ნახ. 6-ზე წარმოდგენილ ძაბვის რეზისტორულ დამყოფს მოცემულ სამუშაო მდგომარეობაში. ელემენტების პარამეტრებად შევთანხმდეთ და მივიჩნიოთ რეზისტორების X_1 და X_2 წინააღმდეგობები, ხოლო სქემის გამომავალ მახასიათებლებად - შემავალი Y_1 წინააღმდეგობა და გადაცემის Y_2 კოეფიციენტი (ძაბვით). $X_1 = X_{10}$ და $X_2 = X_{20}$ მნიშვნელობათა არჩევამ უნდა უზრუნველყოს

$$\left. \begin{aligned} Y_1(X_1, X_2) = Y_{10} \\ Y_2(X_1, X_2) = Y_{20} \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

პირობათა შესრულება, სადაც $0 < Y_{20} < 1$ და $Y_{10} > 0$.

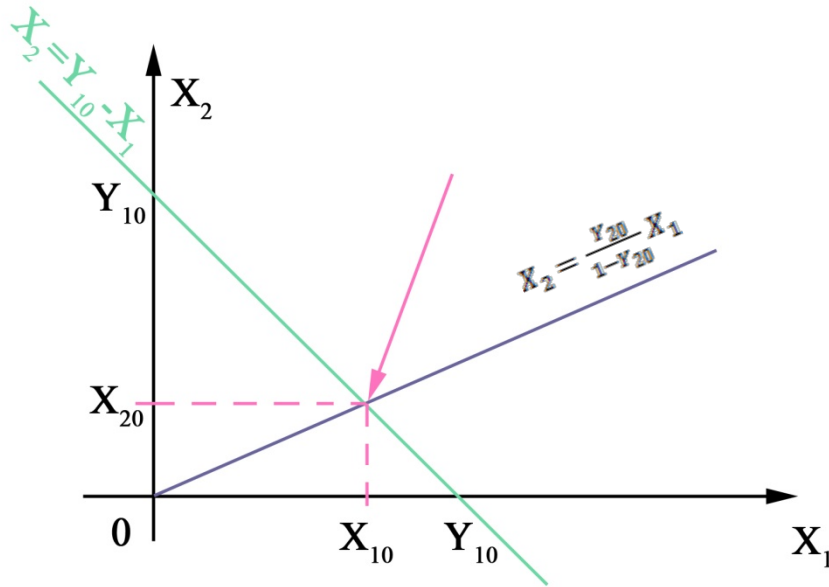
ვინაიდან $Y_1(X_1, X_2) = X_1 + X_2$ და $Y_2(X_1, X_2) = X_2 / (X_1 + X_2)$, (5.6) მოთხოვნების შესაბამისად მივიღებთ ორი - X_1 და X_2 - უცნობის შემცველი ორი განტოლების სისტემას:

$$\left. \begin{aligned} X_1 + X_2 = Y_{10} \\ Y_{20} \cdot X_1 - (1 - Y_{20}) \cdot X_2 = 0 \end{aligned} \right\}$$

აქედან X_1 -სა და X_2 -ის საძიებელი X_{10} და X_{20} მნიშვნელობებისათვის გვექნება:

$$\left. \begin{aligned} X_{10} = (1 - Y_{20}) \cdot Y_{10} \\ X_{20} = Y_{20} \cdot Y_{10} \end{aligned} \right\}$$

განხილულ ამოცანას ძალიან თვალსაჩინო გრაფიკული ინტერპრეტაცია აქვს, რომელიც მოცემულია ნახაზზე 8, სადაც შინაგანი შემავალი პარამეტრების X_1 და X_2 სიბრტყეზე აგებულია $Y_1(X_1, X_2)$ და $Y_2(X_1, X_2)$ გამომავალი პარამეტრების მუდმივი Y_{10} და Y_{20} მნიშვნელობების წირები:



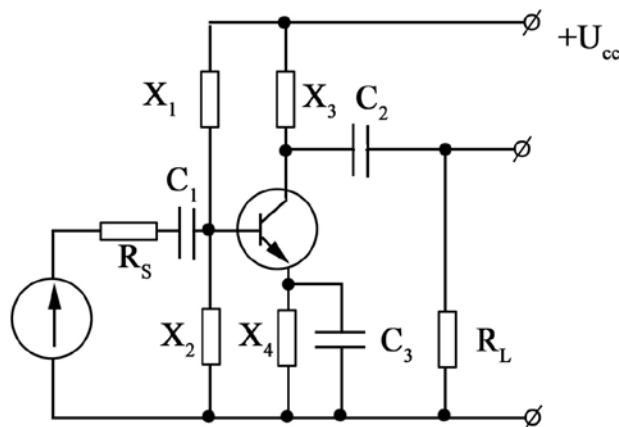
$$\left. \begin{aligned} X_2 &= Y_{10} - X_1 \\ X_2 &= \frac{Y_{20}}{1 - Y_{20}} \cdot X_1 \end{aligned} \right\} \text{ამოცანის } \vec{X}_0(X_{10}, X_{20}) \text{ ამონახსნი}$$

ნახ. 8 დაპროექტების ორგანზომილებიანი ამოცანის ილუსტრაცია (5.5) ტიპის განტოლებებისა და $m = n = 2$ პირობის შემთხვევისათვის

ასეთი მიდგომისას, როგორც ადვილი შესამჩნევია, პირდაპირი შეზღუდვები შინაგან პარამეტრებზე (რეზისტორების წინააღმდეგობებზე) უბრალოდ იგნორირებულია.

§6 დაპროექტების ამოცანის ამოხსნის მაგალითი გამომავალ მახასიათებლებზე პირობების დადებისას მკაცრი ტოლობების ფორმით

განვიხილოთ დაპროექტების ამოცანის ამოხსნის უფრო რთული მაგალითი, როცა გამომავალ მახასიათებლებზე პირობები დადებულია მკაცრი ტოლობების სახით. ამისათვის მივმართოთ დაბალი სიხშირის მაძლიერებელი კასკადის საყოველთაოდ ცნობილ სქემას საერთო ემიტერით ჩართულ $n - p - n$ ტიპის ბიპოლარულ ტრანზისტორზე, რომელიც მოცემულია ნახაზზე 9.



ნახ. 9 დაბალი სიხშირის მამლიერებელი X_1, X_2, X_3 და X_4 მართვადი პარამეტრებით

ამ სქემაში ელემენტების გამოსაანგარიშებელ პარამეტრებს წარმოადგენს X_1, X_2, X_3 და X_4 წინააღმდეგობები. ამიტომ გამომავალ პარამეტრებად შევარჩიოთ ასევე ოთხი მახასიათებელი, სახელდობრ:

- Y_1 - გამლიერების კოეფიციენტი დაბალი სიხშირის ძაბვით;
- Y_2 - შემავალი წინააღმდეგობა;
- Y_3 - ტრანზისტორის მუდმივი კოლექტორული დენი;
- Y_4 - არასტაბილურობის კოეფიციენტი.

ჩამოთვლილი გამომავალი მახასიათებლები მოთხოვნის შესაბამისად მოცემული Y_{10}, Y_{20}, Y_{30} და Y_{40} სიდიდეების ტოლი უნდა იყოს შესაბამისად.

ცნობილ სიდიდეებად სქემაში მიიჩნევა:

- R_L - დატვირთვის წინააღმდეგობა;
- R_S - შემავალი სიგნალის წყაროს წინააღმდეგობა;
- U_{CC} - კოლექტორის კვების წრედის ძაბვა;
- h_{11}, h_{21}, V_{BEO} და I_{CBO} - ტრანზისტორის პარამეტრების მნიშვნელობები.

ტრანზისტორის ხსენებულ პარამეტრთა არსი ასეთია:

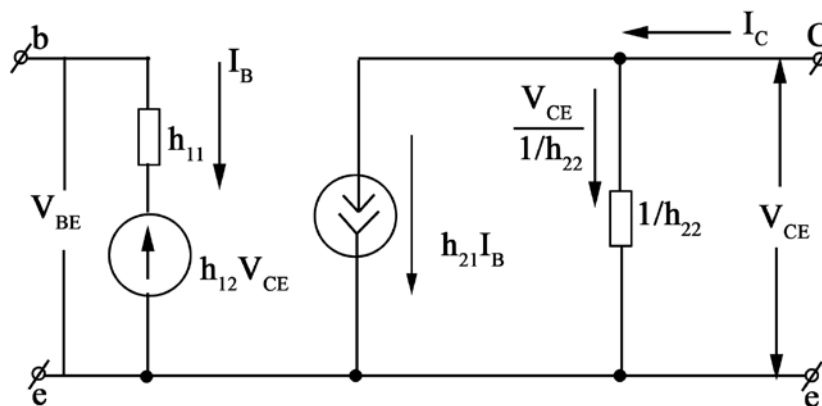
- h_{11} - შემავალი წინააღმდეგობა;
- h_{21} - გადაცემის კოეფიციენტი დენის მიხედვით;
- V_{BEO} - ძაბვის ვარდნა გადასასვლელზე ბაზა-ემიტერი, როცა ბაზის დენი ნულის

ტოლია;

I_{CBO} - კოლექტორულ გადასასვლელში გამავალი არაძირითადი მატარებლების შექცეული დენი, როცა ემიტერული დენი სქემაში საერთო ბაზით ნულს შეადგენს.

რაც შეეხება C_1, C_2 და C_3 ტევადობებს, დაბალ სიხშირეთა არეში ისინი შეიძლება არ განვიხილოთ, თუ მათი სიდიდეები შესაბამისად იქნება არჩეული.

შევუდგეთ $Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4), Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4), Y_3(X_1, X_2, X_3, X_4)$ და $Y_4(X_1, X_2, X_3, X_4)$ სისტემური ფუნქციების დადგენას. ამისათვის, უპირველეს ყოვლისა, მივმართოთ ცვლადი დენის მიხედვით ტრანზისტორის იდეალიზებულ სქემას, რომელიც წარმოადგენილია ნახაზზე 10.



ნახ. 10 ტრანზისტორის ეკვივალენტური სქემა ცვლადი დენით დაბალ სიხშირეთა არეში (მცირე სიგნალების შესატყვისი h – პარამეტრების საფუძველზე)

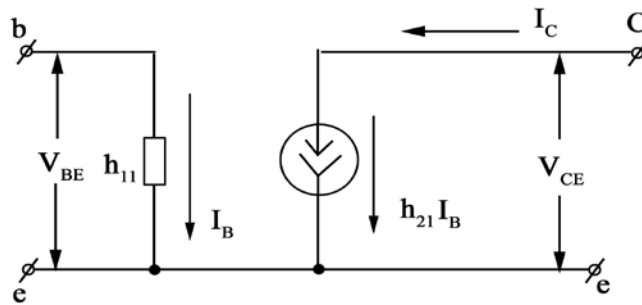
გავითვალისწინოთ აქ, რომ სქემაში საერთო ბაზით ძაბვის შექცეული გადაცემის კოეფიციენტი

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right|_{I_B = const}$$

პრაქტიკულად ნულის ტოლია, ისევე როგორც გამომავალი გამტარობა

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right|_{I_B = const}$$

მაშინ მივიღებთ ტრანზისტორის ჩანაცვლების იდეალიზებულ სქემას, რომელიც ნაჩვენებია ნახაზზე 11.



ნახ. 11. ტრანზისტორის ჩანაცვლების იდეალიზებული სქემა

აქ გამოსახულება

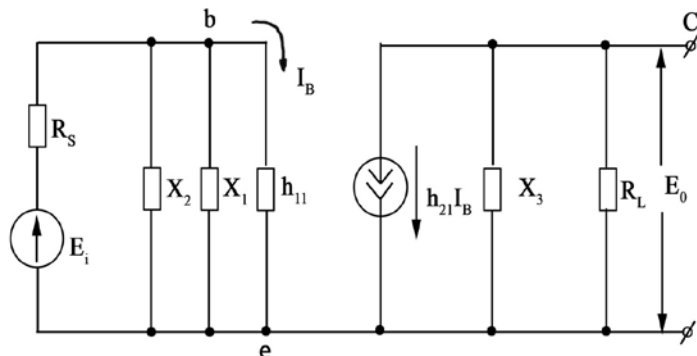
$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE} = const}$$

წარმოადგენს საერთო ემიტერით ჩართული ტრანზისტორის გადაცემის კოეფიციენტს დენით, ხოლო სიდიდე

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE} = const}$$

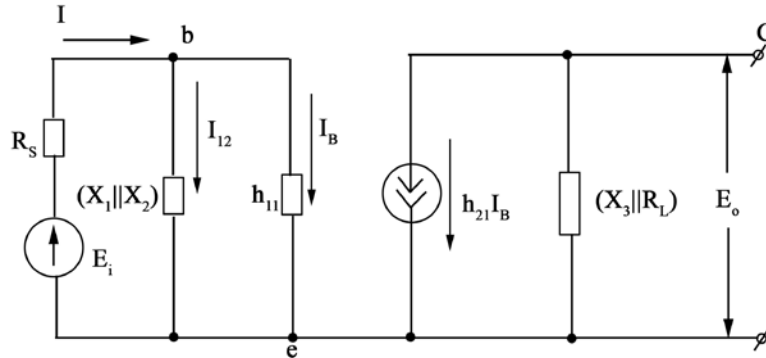
შემავალი წინააღმდეგობაა.

მთლიანად მაძლიერებელი კასკადის ეკვივალენტური სქემა ცვლადი დენის მიხედვით (C_1 , C_2 და C_3 ტევადობების გაუთვალისწინებლად) ნაჩვენებია მეთორმეტე ნახაზზე.



ნახ. 12 მაძლიერებელი კასკადის ეკვივალენტური სქემა ცვლადი დენის მიხედვით დაბალ სიხშირეთა არეში

მარტივი გარდაქმნის შემდეგ იგი იძენს საბოლოო სახეს, რომლითაც იგი წარმოდგენილია ნახაზზე 13.



ნახ. 13 საბოლოო სახემდე დაყვანილი ჩანაცვლების სქემა ცვლადი დენის მიხედვით მაძლიერებელი კასკადისათვის საერთო ემიტერიან ტრანზისტორზე

აქ $(X_1 || X_2)$ - ორი პარალელური - X_1 და X_2 - შტოს წინააღმდეგობაა:

$$(X_1 || X_2) = X_1 X_2 / (X_1 + X_2).$$

სავსებით ანალოგიურად $(X_3 || R_L)$ წარმოადგენს ორი პარალელური - X_3 და R_L - შტოს წინააღმდეგობის სიმბოლურ აღნიშვნას:

$$(X_3 || R_L) = X_3 R_L / (X_3 + R_L).$$

ომის კანონის საფუძველზე ნახ. 13-ზე მოცემული სქემის მარცხენა კონტურისათვის გვაქვს:

$$I = \frac{E_i}{R_s + (X_1 || X_2 || h_{11})}, \tag{6.1}$$

სადაც $(X_1 || X_2 || h_{11})$ წარმოადგენს სამი - X_1 , X_2 და h_{11} - პარალელური შტოს საერთო წინააღმდეგობას. მაშასადამე:

$$(X_1 || X_2 || h_{11}) = \frac{X_1 X_2 h_{11}}{X_1 X_2 + X_1 h_{11} + X_2 h_{11}}. \tag{6.2}$$

კირხჰოფის (გერმ. Gustav Robert Kirchhoff, 1824-1887) პირველი კანონის თანახმად «b» ასოთი აღნიშნული კვანძისათვის მივიღებთ:

$$I = I_{12} + I_B, \tag{6.3}$$

სადაც

$$\frac{I_{12}}{I_B} = \frac{h_{11}}{(X_1 || X_2)}. \tag{6.4}$$

განვსაზღვროთ აქედან I_{12} დენი და ჩავსვათ მისი მნიშვნელობა (6.3) ფორმულაში (6.1) გამოსახულებასთან ერთად I დენისათვის. მაშინ გვექნება:

$$\frac{E_i}{R_s + (X_1 || X_2 || h_{11})} = \frac{h_{11}}{(X_1 || X_2)} \cdot I_B + I_B,$$

საიდანაც

$$I_B = \frac{E_i \cdot (X_1 \parallel X_2)}{[R_s + (X_1 \parallel X_2 \parallel h_{11})] \cdot [h_{11} + (X_1 \parallel X_2)]} \quad (6.5)$$

ამრიგად გენერატორის $I_G = h_{21}I_B$ დენი ნახ. 13-ზე წარმოდგენილ მარჯვენა კონტურში გამოსახება ფორმულით:

$$I_G = \frac{h_{21} \cdot E_i \cdot (X_1 \parallel X_2)}{[R_s + (X_1 \parallel X_2 \parallel h_{11})] \cdot [h_{11} + (X_1 \parallel X_2)]} \quad (6.6)$$

გამომავალი E_0 ძაბვა განისაზღვრება გამოსახულებით

$$E_0 = I_G \cdot (X_3 \parallel R_L) \quad (6.7)$$

ამრიგად, დაბალი სიხშირის ძაბვის მაძლიერებელი კასკადის გაძლიერების კოეფიციენტი

$$E_0 = \frac{h_{21} \cdot E_i \cdot (X_1 \parallel X_2) \cdot (X_3 \parallel R_L)}{[R_s + (X_1 \parallel X_2 \parallel h_{11})] \cdot [h_{11} + (X_1 \parallel X_2)]} \quad (6.8)$$

გამოითვლება თანაფარდობით

$$Y_1 = \frac{E_0}{E_i} \quad (6.9)$$

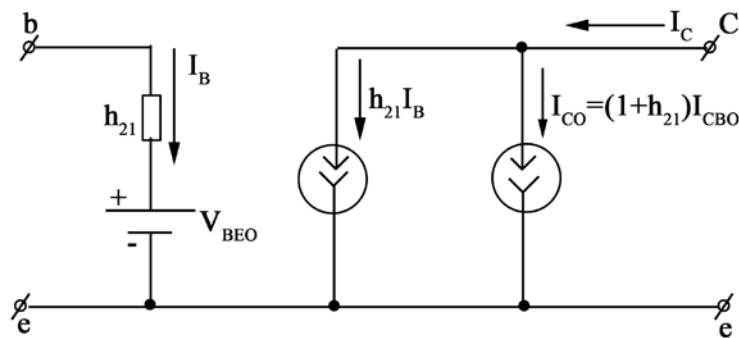
რაც (6.8) ფორმულის გათვალისწინებით ასეთ შედეგს იძლევა:

$$Y_1 = \frac{h_{21} \cdot (X_1 \parallel X_2) \cdot (X_3 \parallel R_L)}{[R_s + (X_1 \parallel X_2 \parallel h_{11})] \cdot [h_{11} + (X_1 \parallel X_2)]} \quad (6.10)$$

ნახ. 13-დან ცხადი ხდება, რომ მაძლიერებელი კასკადის შემავალი წინააღმდეგობა დაბალ სიხშირეთა არეში ატარებს მხოლოდ აქტიურ ხასიათს და განისაზღვრება სამი - X_1 , X_2 და h_{11} - პარალელური შტოს საერთო წინააღმდეგობით. ამიტომ გვაქვს:

$$Y_2 = (X_1 \parallel X_2 \parallel h_{11}) = \frac{X_1 X_2 h_{11}}{X_1 X_2 + X_1 h_{11} + X_2 h_{11}} \quad (6.11)$$

Y_3 და Y_4 გამომავალი პარამეტრების დასადგენად მივმართოთ ტრანზისტორის იმ იდეალიზებულ მოდელს მუდმივი დენით, რომელიც წარმოდგენილია ნახაზზე 14.



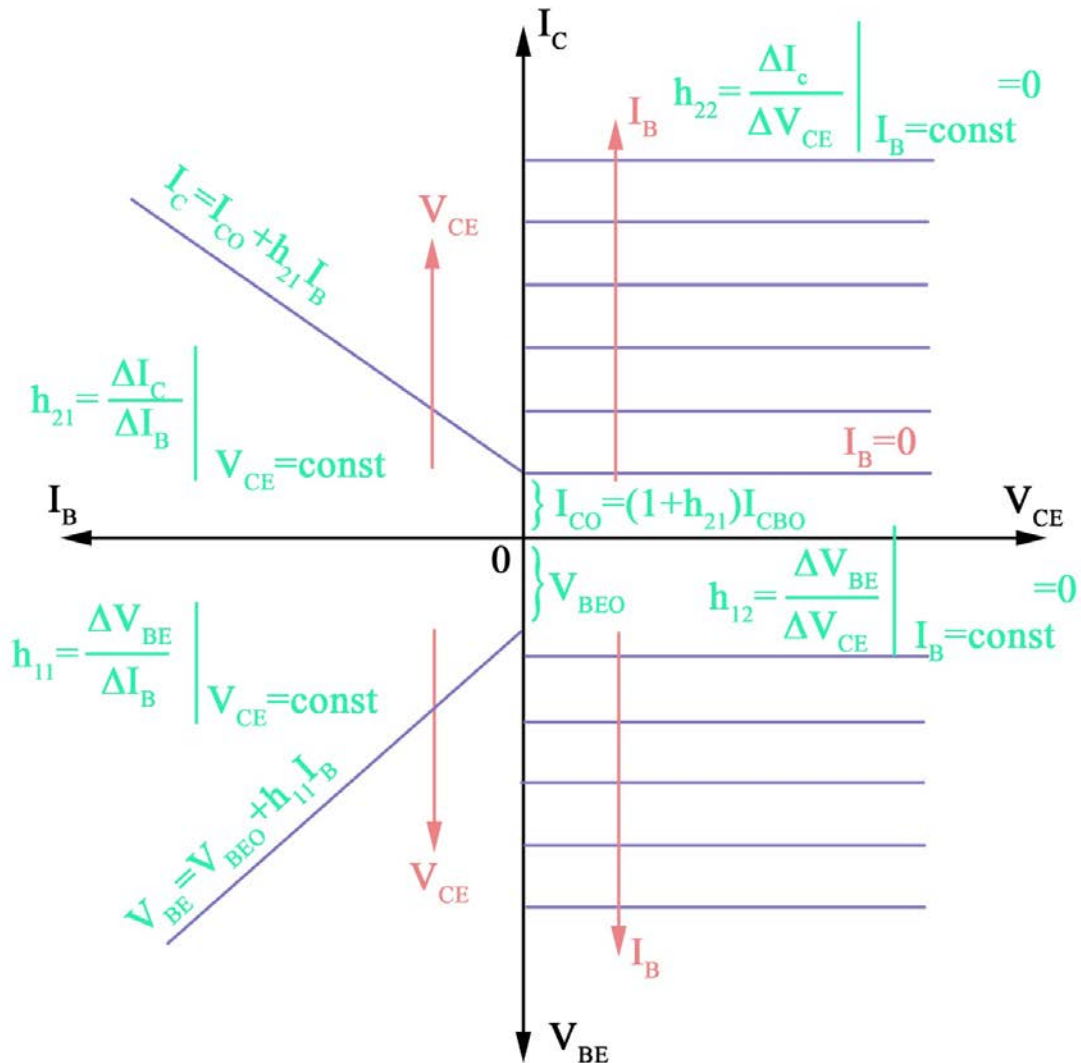
ნახ. 14. ტრანზისტორის იდეალიზებული მოდელი მუდმივი დენით h - პარამეტრების საფუძველზე

ამ მოდელს შეესაბამება სტატიკური მახასიათებლების ოჯახები, რომლებიც მოცემულია ნახაზზე 15.

აქ I_{CO} არის კოლექტორულ გადასასვლელში გამავალი არაპირითადი მატარებლების შექცეული დენი, როცა ბაზის დენი საერთო ემიტერით ჩართულ ტრანზისტორში ნულის ტოლია ($I_B = 0$). ანალოგიურად, I_{CBO} ასეთივე დენია, როცა

ემიტერული დენი საერთო ბაზით ჩართულ ტრანზისტორში ნულის ტოლია ($I_E = 0$). სილიციუმის სიბრტყით ტრანზისტორებში $I_{CO} = (1 + h_{21}) \cdot I_{CBO}$ დენი უმნიშვნელოა $h_{21} \cdot I_B$ დენთან შედარებით და ზოგჯერ მისი უგულვებელყოფაც კი ხდება.

ტრანზისტორის შემავალი h_{11} წინააღობისა და დენით გადაცემის h_{21} კოეფიციენტის მნიშვნელობები უფრო ზუსტი მონაცემების არარსებობისას აიღება h -პარამეტრების საცნობო ჩამონათვალიდან შესაბამისი ტიპის ნახევარგამტარული ტრიოდისათვის. გამომავალი h_{22} გამტარობისა და ძაბვით უკუადაცემის h_{12} კოეფიციენტის მნიშვნელობები ნულის ტოლად მიიჩნევა.



ნახ. 15. საერთო ემიტერით ჩართული ტრანზისტორის იდეალიზებული მოდელის სტატიკური მახასიათებლების ოჯახები

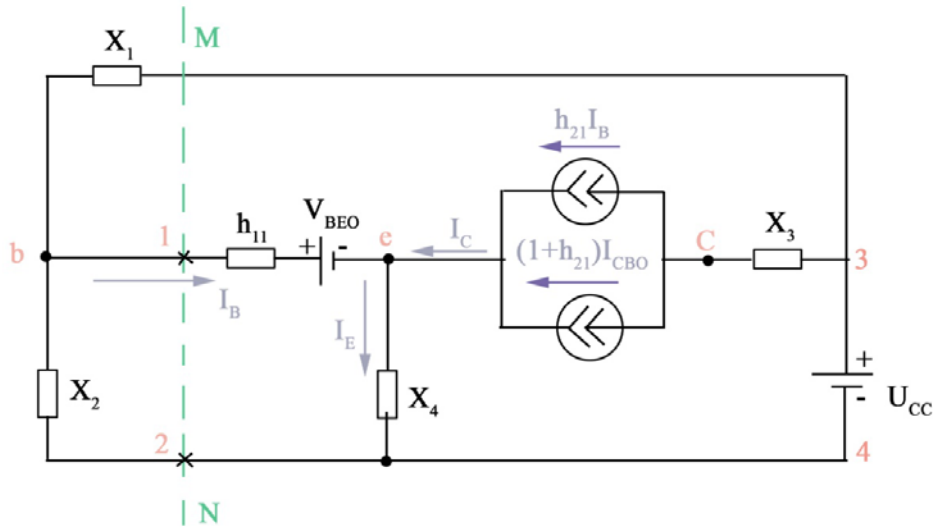
V_{BE} სიდიდე $I_B = 0$ შემთხვევისათვის აღინიშნება V_{BE0} სიმბოლოთი. იგი დაკავშირებულია ძაბვის ვარდნასთან ღია ემიტერულ გადასასვლელზე: როცა $V_{CE} \neq 0$ (თუნდაც სრულდებოდეს $I_B = 0$ პირობა), ემიტერული გადასასვლელი განიცდის გამხსნელი ძაბვის ზემოქმედებას, რომელიც მოდებულია კოლექტორსა და ემიტერს

შორის. ამიტომ ემიტერულ გადასასვლელში გამავალი დენი ქმნის მასზე V_{BEO} ძაბვის ვარდნას. მაგრამ, როცა $V_{CE} = 0$, მაშინ, ბუნებრივია, $V_{BEO} = 0$.

V_{BEO} ძაბვის ვარდნის საშუალო მნიშვნელობა $t_0 = 25^\circ C$ ტემპერატურაზე სილიციუმის სიბრტყითი ტრანზისტორებისათვის, ჩვეულებრივ, 0.65 ვოლტს შეადგენს. ცნობილია, რომ ასეთ ტრანზისტორებში $V_{BEO}(t)$ ტემპერატურული დამოკიდებულება, თუ $t > t_0$, მცირდება 2 მვ/გრად სიჩქარით:

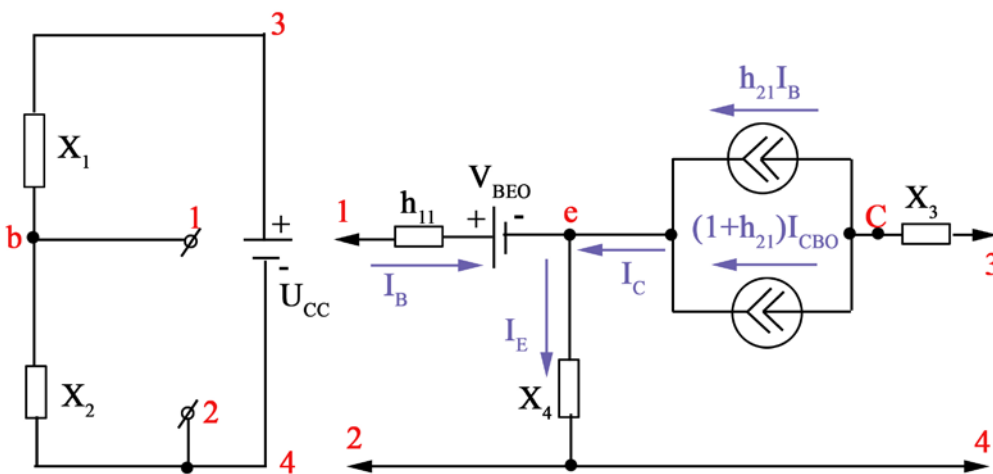
$$V_{BEO}(t) = 0.65 - 0.002 \cdot (t - t_0).$$

მამლიერებელი კასკადის Y_3 გამომავალი მახასიათებლის გამოსაანგარიშებლად იყენებენ ნახ. 16-ზე წარმოდგენილ მის ეკვივალენტურ სქემას მუდმივი დენის მიხედვით.



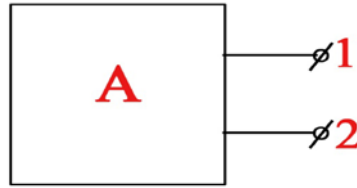
ნახ. 16. მამლიერებელი კასკადის ეკვივალენტური სქემა მუდმივი დენის მიხედვით

გავყოთ ეს სქემა ორ ნაწილად MN წრფით. მაშინ მივიღებთ ნახ. 17-ზე წარმოდგენილ ორ ქვესქემას. აღნიშნულ პროცედურას დეკომპოზიცია ეწოდება.



ნახ. 17. ნახ. 16-ზე წარმოდგენილი სქემის დეკომპოზიციის შედეგი

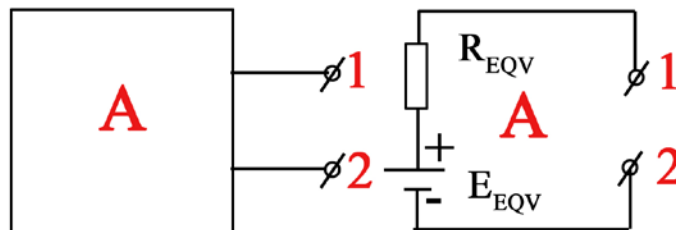
ნახ. 17-ის მარცხენა ქვესქემა მოვათავსოთ რაღაც წარმოსახვით მართკუთხედში, სადაც გამოყოფილია მომჭერები 1 და 2, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახაზზე 18.



ნახ. 18. ნახ. 17-ის მარცხენა ქვესქემის ეკვივალენტური აქტიური ორპოლუსა

A სიმბოლო მართკუთხედზე მოწმობს, რომ მასში არის ელექტრომამოძრავებელი ძალის წყარო და საქმე გვაქვს აქტიურ ორპოლუსასთან. 1–2 მომჭერების მიმართ A ორპოლუსა გაანგარიშების თვალსაზრისით შეიძლება შეიფასოს ეკვივალენტური გენერატორით, რომლის E_{EQV} ელექტრომამოძრავებელი ძალა უდრის U_{12} ძაბვას 1–2 მომჭერებზე უქმი სვლის რეჟიმში (ამ მომჭერებზე ნახ. 17-ის მარჯვენა ქვესქემის მიუერთებლად), ხოლო R_{EQV} შინაგანი წინააღმდეგობა ემთხვევა მთელი A ქვესქემის შემავალ წინააღმდეგობას 1–2 მომჭერების მიმართ A-ში დამოკლებული ელექტრომამოძრავებელი ძალის წყაროს - ე.ი. $U_{CC} = 0$ დაშვების - პირობებში.

ნახ. 19-ით ილუსტრირებული მტკიცება ასეთი ეკვივალენტობის შესახებ შეადგენს იმ დებულების შინაარსს, რომელსაც ეწოდება თეორემა ეკვივალენტური გენერატორის (აქტიური ორპოლუსას) შესახებ. იგი ცნობილია აგრეთვე ტევენენის¹ (ზოგჯერ ჰელმჰოლც²-ტევენენის) თეორემის სახელწოდებითაც.

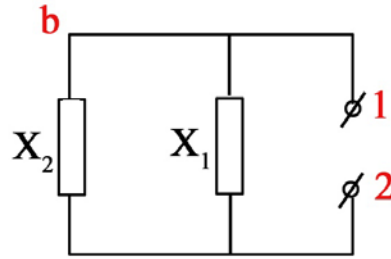


ნახ. 19. ეკვივალენტური გენერატორის შესახებ თეორემის ინტერპრეტაცია

ტევენენის თეორემის საფუძველზე A ქვესქემის R_{EQV} წინააღმდეგობის განსაზღვრა 1–2 მომჭერების მიმართ (A-ში დამოკლებული U_{CC} ელექტრომამოძრავებელი ძალის წყაროს დროს) დაიყვანება წინააღმდეგობის დადგენამდე ნახ. 20-ზე ნაჩვენები პასიური ორპოლუსას 1–2 წერტილებს შორის.

¹ Léon Charles Thévenin (1857-1926) - ფრანგი ინჟინერი ტელეგრაფიის დარგში.

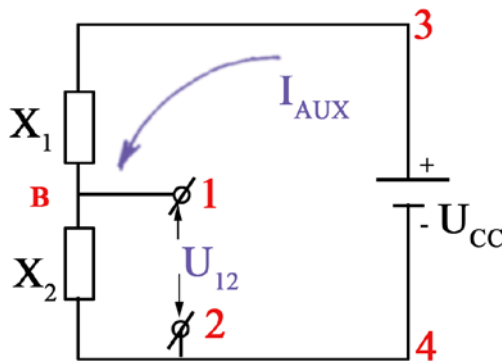
² Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) - გერმანელი ფიზიკოსი, ფიზიოლოგი, ექიმი, ფსიქოლოგი.



ნახ. 20. პასიური ორპოლუსა R_{EQV} სიდიდის გამოსათვლელად ამდიგად,

$$R_{EQV} = (X_1 \parallel X_2) = X_1 X_2 / (X_1 + X_2). \quad (6.12)$$

$E_{EQV} \equiv U_{12}$ სიდიდის დასადგენად უნდა მივმართოთ ნახ. 21-ს.



ნახ. 21. აქტიური A ორპოლუსას წარმოდგენა მისი ეკვივალენტური გენერატორის E_{EQV} ელექტრომამოძრავებელი ძალის დადგენის პროცესში, I_{AUX} - დამხმარე (ინგლ. AUXiliary) დენი

ადვილი შესამჩნევია, რომ

$$E_{EQV} \equiv U_{12} = I_{AUX} \cdot X_2,$$

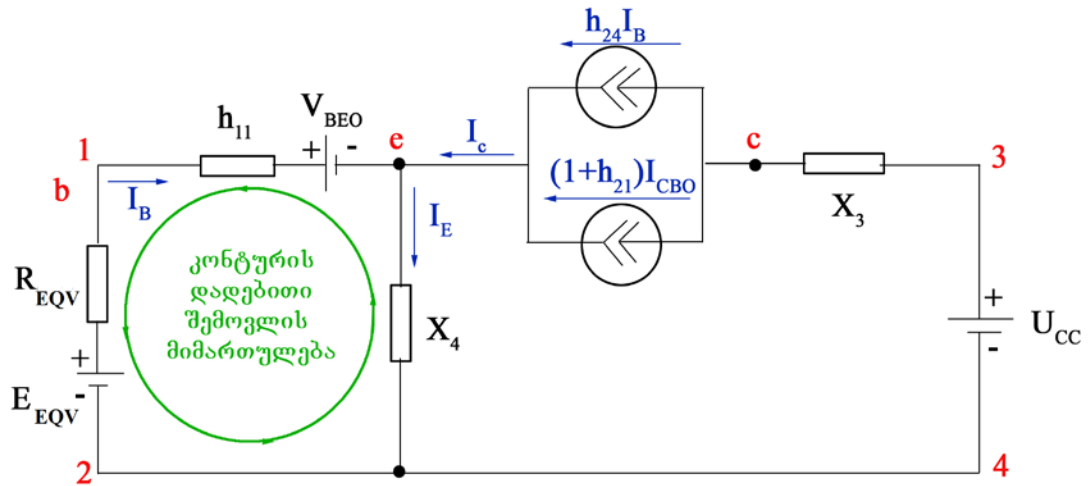
სადაც I_{AUX} დამხმარე დენის სიდიდე შემდეგი ფორმით ჩაიწერება:

$$I_{AUX} = U_{CC} / (X_1 + X_2).$$

მაშასადამე,

$$E_{EQV} = U_{CC} X_2 / (X_1 + X_2). \quad (6.13)$$

მიღებული შედეგები საშუალებას იძლევა წარმოვადგინოთ ნახ. 16-ის სქემა საბოლოო სახით, რომელიც ნაჩვენებია ნახაზზე 22, სადაც R_{EQV} და E_{EQV} სიდიდეები მოიცემა შესაბამისად (6.12) და (6.13) ფორმულებით.



ნახ. 22. ტევენენის თეორემის საფუძველზე გარდაქმნილი ნახ. 16-ის სქემა

განვიხილოთ აქ წარმოდგენილი წრედის მარცხენა კონტური და ავირჩიოთ ამ კონტურის შემოვლის დადებითი მიმართულება საათის ისრის საწინააღმდეგოდ. მაშინ კირხჰოფის მეორე კანონი ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$-h_{11}I_B - X_4I_E - R_{EQV}I_B = V_{BEO} - E_{EQV} \quad (6.14)$$

კირხჰოფის პირველი კანონი კი «e» კვანძისათვის იძლევა:

$$I_E = I_B + I_C \quad (6.15)$$

(6.15)-ის ჩასმით (6.14)-ში მივიღებთ:

$$-h_{11}I_B - X_4I_B - X_4I_C - R_{EQV}I_B = V_{BEO} - E_{EQV},$$

ან, რაც იგივეა,

$$-I_B \cdot (h_{11} + X_4 + R_{EQV}) = X_4I_C - E_{EQV} + V_{BEO}.$$

აქედან

$$I_B = \frac{E_{EQV} - V_{BEO}}{h_{11} + X_4 + R_{EQV}} - \frac{X_4}{h_{11} + X_4 + R_{EQV}} \cdot I_C \quad (6.16)$$

უკანასკნელი ფორმულიდან I_B მნიშვნელობის ჩასმით

$$I_C = (1 + h_{21})I_{CBO} + h_{21}I_B$$

კოლექტორული დენის გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$I_C = (1 + h_{21})I_{CBO} + h_{21} \cdot \frac{E_{EQV} - V_{BEO}}{h_{11} + X_4 + R_{EQV}} - \frac{h_{21}X_4}{h_{11} + X_4 + R_{EQV}} \cdot I_C.$$

მაშასადამე,

$$\left(1 + \frac{h_{21}X_4}{h_{11} + X_4 + R_{EQV}}\right) \cdot I_C = (1 + h_{21})I_{CBO} + h_{21} \cdot \frac{E_{EQV} - V_{BEO}}{h_{11} + X_4 + R_{EQV}}.$$

და, ამრიგად,

$$(h_{11} + X_4 + R_{EQV} + h_{21}X_4) \cdot I_C = (1 + h_{21})(h_{11} + X_4 + R_{EQV})I_{CBO} + h_{21}(E_{EQV} - V_{BEO}).$$

აქედან

$$I_C = \frac{(1 + h_{21})(h_{11} + X_4 + R_{EQV})}{h_{11} + X_4 + R_{EQV} + h_{21}X_4} \cdot I_{CBO} + \frac{h_{21}(E_{EQV} - V_{BEO})}{h_{11} + X_4 + R_{EQV} + h_{21}X_4} \quad (6.17)$$

თუ ამ ფორმულაში ჩავსვამთ გამოსახულებებს (6.12) და (6.13) R_{EQV} და E_{EQV} სიდიდეებისათვის, მარტივი გარდაქმნების შედეგად გვქვნიება:

$$I_C = \frac{h_{21} [X_2 (U_{CC} - V_{BEQ}) - X_1 V_{BEQ}]}{(1+h_{21})X_4 (X_1 + X_4) + X_1 h_{11} + (X_1 + h_{11})X_2} + \frac{1+h_{21}}{1+h_{21}X_4 / \left(h_{11} + X_4 + \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \right)} \cdot I_{CBO}. \quad (6.18)$$

ამ გამოსახულების წარმოებული I_{CBO} ცვლადით წარმოადგენს მაძლიერებელი კასკადის არასტაბილურობის საძიებელ კოეფიციენტს, ე.ი. სქემის Y_4 გამომავალ მახასიათებელს:

$$Y_4 = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{1+h_{21}}{1 + \frac{h_{21}X_4}{h_{11} + X_4 + X_1 X_2 / (X_1 + X_2)}}. \quad (6.19)$$

მუდმივი კოლექტორული (6.18) დენი კი წარმოადგენს სქემის Y_3 გამომავალ მახასიათებელს:

$$Y_3 = I_C. \quad (6.20)$$

აღნიშნული Y_3 და Y_4 მახასიათებლებისათვის შეიძლება შემდეგი მიახლოებითი ფორმულების გამოყენებას:

$$Y_3 \approx \frac{h_{21} [X_2 (U_{CC} - V_{BEQ}) - X_1 V_{BEQ}]}{(1+h_{21})X_4 (X_1 + X_4) + X_1 h_{11} + (X_1 + h_{11})X_2}, \quad (6.21)$$

$$Y_4 \approx \frac{X_1 X_2}{X_4 (X_1 + X_2)}. \quad (6.22)$$

ამრიგად, მაძლიერებელი კასკადის დაპროექტების პრობლემა დაიყვანება ოთხი უცნობის შემცველი ოთხი არაწრფივი განტოლების სისტემის ამოცანის ამოხსნამდე:

$$\left. \begin{aligned} Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) &= Y_{10} \\ Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) &= Y_{20} \\ Y_3(X_1, X_2, X_3, X_4) &= Y_{30} \\ Y_4(X_1, X_2, X_3, X_4) &= Y_{40} \end{aligned} \right\}, \quad (6.23)$$

სადაც Y_1, Y_2, Y_3 და Y_4 ფუნქციათა სახე განისაზღვრება (6.10), (6.11), (6.18) და (6.19) გამოსახულებებით შესაბამისად. ამ სისტემის ამოხსნა შეიძლება ნიუტონის იტერაციული მეთოდით მისი შეთავსებისას გაუსის გამორიცხვის ან გაუს-ჟორდანის ალგორითმებთან. შედეგად მივიღებთ X_1, X_2, X_3 და X_4 უცნობ სიდიდეთა მნიშვნელობებს. მაგრამ მოცემულ შემთხვევაში (6.23) სისტემის ამოხსნა შესაძლებელია ჩაკეტილი ანალიზური ფორმითაც.

ამისათვის სისტემის მეორე განტოლებიდან პოულობენ $(X_1 \parallel X_2)$ სიდიდეს და შეაქვთ იგი ამავე სისტემის პირველ განტოლებაში. შედეგად მიიღება განტოლება X_3 -ის მიმართ.

თუ $(X_1 \parallel X_2)$ სიდიდეს ჩავსვამთ (6.23) სისტემის მეოთხე განტოლებაში, მაშინ მივიღებთ X_4 პარამეტრის განსაზღვრის საშუალებას.

X_1 და X_2 უცნობების დასადგენად უნდა განხორციელდეს სისტემის მეორე და მესამე განტოლებათა ერთად ამოხსნა.

§7 დასაშვები ამონახსნის ძებნა დაფიქსირებული სამუშაო მდგომარეობის პირობებში

$\bar{X}_0 = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0})$ დასაშვები ამონახსნის მანქანური ძებნა ლოგიკურია ისეთნაირად მოხდეს, რომ ეს პროცესი შეესაბამებოდეს ელექტრონული სქემის შექმნას, რომელშიც საუკეთესოდ არის უზრუნველყოფილი შრომისუნარიანობის ყველა პირობა გარეგანი შემავალი პარამეტრების ცვლილებისას მათთვის მითითებულ საზღვრებში, აგრეთვე შინაგან შემავალ პარამეტრებზე დადებული პირდაპირი შეზღუდვებისა და ტექნიკური დავალების ყველა ხარისხობრივი მოთხოვნის შესრულება. მაშასადამე, ელექტრონული სქემების დაპროექტების ამოცანა უნდა განიხილებოდეს *ოპტიმიზაციის* პრობლემად, ე.ი. გარკვეული სიმრავლიდან საუკეთესო ვარიანტის არჩევის ასპექტად. ასეთი მიდგომა გულისხმობს *ოპტიმალურობის კრიტერიუმად* წოდებული უპირატესობის მინიჭების გარკვეული წესის არსებობას. როგორც ცნობილია, უპირატესობის მინიჭების წესის აგებას საფუძვლად უდევს ე.წ. *მიზნობრივი ფუნქცია*, რომელიც ელექტრონული სქემის *ხარისხის* რაოდენობრივ აღწერას იძლევა. არჩევანის მიხედვით, სქემის ხარისხის გაუმჯობესებისას მიზნობრივი ფუნქციის მნიშვნელობები შეიძლება როგორც იზრდებოდეს, ასევე მცირდებოდეს. პირველ შემთხვევაში *ოპტიმიზაცია* დაიყვანება მიზნობრივი ფუნქციის მაქსიმუმის პოვნამდე, ხოლო მეორეში - მისი მინიმუმის განსაზღვრამდე. მიზნობრივი ფუნქციის არგუმენტებად გვევლინება *მართვადი პარამეტრები*, ესე იგი შინაგანი შემავალი პარამეტრები, რომლებიც შეიძლება ვცვალოთ დაპროექტების პროცესში. შემოვიღოთ მიზნობრივი ფუნქციისათვის, რომელიც შეესაბამება გარეგანი შემავალი პარამეტრების \bar{W} ვექტორით მოცემულ დაფიქსირებულ სამუშაო მდგომარეობას, $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ აღნიშვნა.

ძირითადი სიძნელე მიზნობრივი ფუნქციის ფორმულირებისას დაკავშირებულია იმ გარემოებასთან, რომ სქემის გამომავალი პარამეტრები არ შეიძლება იცვლებოდეს ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად, რადგან ისინი წარმოადგენს შემავალი პარამეტრების \bar{X} ვექტორის ფუნქციებს გარეგანი პარამეტრების \bar{W} ვექტორის ფიქსირებული მნიშვნელობისათვის. გამომავალ მახასიათებლებს შორის გვხვდება *კონფლიქტური პარამეტრებიც*. გამომავალი პარამეტრების წყვილი წარმოადგენს კონფლიქტური პარამეტრების წყვილს, თუ ერთ-ერთი მათგანის გაუმჯობესება იწვევს მეორე პარამეტრის გაუარესებას. მაგალითად, განმხოლოებულ რხევით კონტურში გატარების ზოლი და ვარგისიანობა არის კონფლიქტური პარამეტრები. ამის გამო ელექტრონული სქემის *ოპტიმიზაციის* დროს ყველა გამომავალი პარამეტრის გაუმჯობესება შეუძლებელია.

ელექტრონული სქემის მიზნობრივი ფუნქცია უნდა ავაგოთ როგორც სკალარული ფუნქცია. მისი ფორმირება უნდა მოხდეს შრომისუნარიანობის იმ ვექტორული კრიტერიუმის გამოყენებით, რომელიც მოცემულია ტექნიკური დავალებით $\bar{Y}(\bar{X}, \bar{W})$ გამომავალი პარამეტრების ერთობლიობის მიმართ. ასეთ გადასვლას *ვექტორული კრიტერიუმის შეკვეცა* ეწოდება. უფრო ხშირად შეკვეცა ხორციელდება *ხარისხის მაჩვენებლის კომპლექსური, ანუ განზოგადებული მაჩვენებლის* აგებით, რომელშიც ამა თუ იმ ხერხით აერთიანებენ სქემის ყველა გამომავალ მახასიათებელს. ამასთან ერთად წამოიჭრება გამომავალი პარამეტრების ერთმანეთთან შესადარ განყენებულ (სახელდაუდებელ) სიდიდეებად გარდაქმნის პრობლემა. ხარისხის განზოგადებულ მაჩვენებელს წაეყენება ასევე მოთხოვნა მიიღოს მცირე მნიშვნელობები, როცა ყველა

გამომავალი პარამეტრი ახლოსაა მათვის დაწესებული არეების ცენტრებთან, და მკვეთრად გაიზარდოს, როცა გამომავალ პარამეტრებზე დადებული შეზღუდვები ირღვევა.

ყველა ამ მოთხოვნას სავსებით აკმაყოფილებს $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ მიზნობრივი ფუნქცია, რომელიც მოცემულია შემდეგი სახით:

$$\Pi_0(\bar{X}, \bar{W}) = \sum_{j=1}^m a_j(\bar{W}) \cdot \delta_j(\bar{X}, \bar{W}), \quad (7.1)$$

სადაც

$$\delta_j(\bar{X}, \bar{W}) = \left[\frac{\bar{Y}_j(\bar{X}, \bar{W}) - (Y_{j\min} + Y_{j\max})/2}{(Y_{j\max} - Y_{j\min})/2} \right]^{b_j}. \quad (7.2)$$

აქ $a_j(\bar{W})$ - ნამდვილი დადებითი რიცხვია, რომელიც წარმოადგენს წონით კოეფიციენტს j -ური გამომავალი პარამეტრისათვის გარეგანი შემავალი პარამეტრების \bar{W} ვექტორით მოცემულ და დაფიქსირებულ სამუშაო მდგომარეობაში, ხოლო b_j - ნამდვილი დადებითი ლუწი რიცხვია. სიმარტივისათვის შეიძლება დავუშვათ, რომ

$$\left. \begin{array}{l} b_j = 2 \\ j = 1, m \end{array} \right\}$$

δ_j სიდიდის Y_j სიდიდეზე დამოკიდებულების გრაფიკი მოცემული $Y_{j\min}$ და $Y_{j\max}$ მნიშვნელობების პირობებში ნაჩვენებია ნახაზზე 23.

ნახ. 23 (7.1) მიზნობრივი ფუნქციის δ_j კომპონენტის დამოკიდებულება სქემის Y_j გამომავალ პარამეტრზე

ასეთნაირად შემოტანილი $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ მიზნობრივი ფუნქცია წარმოადგენს სქემის შეუთანხმებლობის ზომას ტექნიკურ დავალებასთან გამომავალ პარამეტრებზე. (7.1) განზოგადებული კრიტერიუმის გამოყენება თავიდან გვაცილებს შრომაუნარიანობის პირობათა არსის მქონე ფუნქციურ შეზღუდვებს. მაშასადამე, ყველა გამომავალი პარამეტრის გათვალისწინება მიზნობრივ ფუნქციაში გახდა ჩვენთვის გადასვლის საშუალება ოპტიმიზაციის ამოცანიდან შეზღუდვების არსებობისას (პირობითი

ოპტიმიზაციიდან უპირობო ოპტიმიზაციის ამოცანაზე, როცა იძებნება $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ მიზნობრივი ფუნქციისათვის მინიმუმის მიმნიჭებელი $\bar{X}_0 = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0})$ ვექტორი.

მაგრამ დაპროექტების ამოცანაში, როგორც დავრწმუნდით, ზოგჯერ ფიგურირებს პირდაპირი შეზღუდვები, რომლებიც ედება შინაგან შემავალ პარამეტრებს და განსაზღვრავს შესაძლო ამონახსნების $G_{\bar{X}}$ არეს:

$$\left. \begin{aligned} X_{i_{\min}} \leq X_i \leq X_{i_{\max}} \\ i = \overline{1, n} \end{aligned} \right\},$$

სადაც $X_{i_{\min}}$ და $X_{i_{\max}}$ - i -ური მართვადი პარამეტრის ზღვრული მნიშვნელობებია.

აღინიშნა ასევე, რომ პირდაპირი შეზღუდვები რიგ შემთხვევაში პრინციპულად აუცილებელია, მაგალითად, ისეთი პარამეტრისათვის, რომელიც თავისი ფიზიკური შინაარსით არ შეიძლება იყოს უარყოფითი (წინააღმდეგობა, ტევადობა, ინდუქტივობა, მასისა და გაბარიტის მაჩვენებლები და მისთანანი). ზოგჯერ კი პირდაპირი შეზღუდვები პრინციპულად აუცილებელი არ არის, მაგრამ ისი შემოაქვთ ხელოვნურად ექსტრემუმის ძებნის არის შესაზღუდავად.

პირდაპირი შეზღუდვების მოსაშორებლად და პირობითი ოპტიმიზაციიდან გადასასვლელად უპირობოზე შეიძლება საჯარიმო ფუნქციათა მეთოდის გამოყენება. ვუჩვენოთ ამ მეთოდის არსი ჩვენი ამოცანის მაგალითზე. იგი ჩამოყალიბდა როგორც $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ მიზნობრივი ფუნქციის მინიმუმის პოვნა $X_{i_{\min}} \leq X_i \leq X_{i_{\max}}$ პირობებში, სადაც $i = \overline{1, n}$.

საჯარიმო ფუნქციათა მეთოდის იდეა მდგომარეობს საწყისი $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ მიზნობრივი ფუნქციის ჩანაცვლებაში $\Pi(\bar{X}, \bar{W})$ ფუნქციით, რომელიც მაქსიმალურად უნდა უახლოვდებოდეს $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ ფუნქციას \bar{X} ვექტორის შესაძლო მნიშვნელობათა არეში და მნიშვნელოვნად უნდა განსხვავდებოდეს მისგან მის გარეთ. სხვანაირად რომ ვტყვათ, პირდაპირი შეზღუდვების დარღვევა შეიძლება განიხილებოდეს ჯარიმად ახალი $\Pi(\bar{X}, \bar{W})$ მიზნობრივი ფუნქციის გაუარესების ფორმით.

ჩვეულებრივ, $\Pi(\bar{X}, \bar{W})$ ფუნქცია აიგება საწყისი $\Pi_0(\bar{X}, \bar{W})$ მიზნობრივი ფუნქციის შეკრებით გარკვეულ $S(\bar{X}, \bar{W})$ საჯარიმო ფუნქციასთან:

$$\Pi(\bar{X}, \bar{W}) = \Pi_0(\bar{X}, \bar{W}) + S(\bar{X}, \bar{W}). \tag{7.3}$$

საჯარიმო $S(\bar{X}, \bar{W})$ ფუნქციად შეიძლება ავირჩიოთ, მაგალითად, შემდეგი გამოსახულება:

$$S(\bar{X}, \bar{W}) = \sum_{i=1}^n C_i(\bar{W}) \cdot \Delta_i(X_i), \tag{7.4}$$

სადაც

$$\Delta_i(X_i) = \left[\frac{X_i - (X_{i_{\min}} + X_{i_{\max}})/2}{(X_{i_{\max}} - X_{i_{\min}})/2} \right]^{d_i}. \tag{7.5}$$

აქ $C_i(\bar{W})$ - ნამდვილი დადებითი რიცხვია, რომელიც წარმოადგენს წონით კოეფიციენტს i -ური შინაგანი შემავალი პარამეტრისათვის გარეშე შემავალი

პარამეტრების \overline{W} ვექტორით მოცემულ დაფიქსირებულ სამუშაო მდგომარეობაში, ხოლო d_i - ნამდვილი დადებითი ლუწი რიცხვია. სიმარტივისათვის შეიძლება დავუშვათ, რომ

$$\left. \begin{array}{l} d_i = 2 \\ i = 1, n \end{array} \right\}.$$

ადვილი შესამჩნევია, რომ ნებისმიერი i -ური ($i = \overline{1, n}$) შესაძლო ($X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}$) პირდაპირი შეზღუდვისათვის

$$\frac{X_i - (X_{i\min} + X_{i\max})/2}{(X_{i\max} - X_{i\min})/2}$$

გამოსახულება იცვლება საზღვრებში (-1) -დან $(+1)$ -მდე. წინააღმდეგ შემთხვევაში იგი მკვეთრად იზრდება აბსოლუტური მნიშვნელობით.

ხარისხის განზოგადებული $\Pi(\overline{X}, \overline{W})$ მაჩვენებლის ალგორითმის გამოყენება გარეგანი შემავალი პარამეტრების \overline{W} ვექტორით მოცემული სამუშაო მდგომარეობით განსაზღვრული \overline{X}_0 დასაშვები ამონახსნის დასადგენად, შემდეგნაირად გამოიყურება.

ფიქსირდება გარეგანი შემავალი W_1, W_2, \dots, W_p პარამეტრების მნიშვნელობათა ნაკრები, რომელიც *სქემის სამუშაო მდგომარეობას* ასახავს. თავისთავად იგულისხმება, რომ ეს მნიშვნელობები აღებულია სქემის დაპროექტებასთან დაკავშირებული ტექნიკური დავალების (5.2) არიდან.

შემდეგ, მსგავსი სქემების ანალიზის წინა გამოცდილებისა და მათი ელექტრული გაანგარიშების არსებული მიახლოებითი მეთოდების საფუძველზე, დამპროექტებელი გვთავაზობს ელემენტთა პარამეტრების \overline{X} ვექტორის გარკვეულ საწყის \overline{X}_H მნიშვნელობას:

$$\overline{X}_H = (X_{1H}, X_{2H}, \dots, X_{nH}).$$

\overline{X}_H ვექტორი, რომელსაც, ლოგიკურია, *საწყისი ამონახსნი* ვუწოდოთ, იძლევა სქემის შინაგანი შემავალი პარამეტრების ნომინალებს გარეგანი შემავალი პარამეტრების მოცემული მნიშვნელობების პირობებში.

სქემის მოცემული სამუშაო მდგომარეობის შესაბამისი საწყისი ამონახსნისათვის ფასდება მისი გამომავალი პარამეტრების $Y_1(\overline{X}_H, \overline{W}), Y_2(\overline{X}_H, \overline{W}), \dots, Y_m(\overline{X}_H, \overline{W})$ მნიშვნელობები. ამ სიდიდეთა საშუალებით ხდება სქემის $\Pi(\overline{X}_H, \overline{W})$ განზოგადებული ხარისხის მაჩვენებლის ფორმირება.

დაბოლოს, შინაგანი შემავალი პარამეტრების სიდიდეებს ისე ცვლიან, რომ არჩეულმა მიზნობრივმა ფუნქციამ მიაღწიოს მინიმუმს გარკვეულ $\overline{X}_0 = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0})$ მნიშვნელობაზე. ამისათვის უხდებათ ელემენტთა $X_{1H}, X_{2H}, \dots, X_{nH}$ პარამეტრების ვარირება მინიმიზაციის გარკვეული პროცედურის შესაბამისად. ეს პროცედურა ოპტიმიზაციის არჩეული მეთოდითაა ნაკარნახევი. ოპტიმიზაციის მეთოდები დაპროექტების ამოცანისათვის, ცხადია, სპეციალურ განხილვას ითხოვს.

თუ \overline{X}_0 წერტილი - რომელიც ხარისხის $\Pi(\overline{X}, \overline{W})$ განზოგადებულ მაჩვენებელს $\Pi(\overline{X}_0, \overline{W})$ მინიმუმს ანიჭებს - ნაპოვნია, მაშინ იგი საძიებელ დასაშვებ ამონახსნად უნდა იქნას მიჩნეული.

§8 დასაშვები ამონახსნის ძებნა სამუშაო მდგომარეობათა სიმრავლის გათვალისწინებით

სქემის გარეგანი შემავალი პარამეტრების W_1, W_2, \dots, W_p მნიშვნელობათა სიმრავლე განსაზღვრავს, როგორც აღინიშნა, *სქემის სამუშაო მდგომარეობას*. სქემის შესაძლო სამუშაო მდგომარეობათა $G_{\bar{W}}$ სიმრავლე გამოიყვანება ტექნიკური დავალებითა და დამპროექტებლის მიერ გარეშე შემავალ პარამეტრებზე დადებული პირობებით:

$$\left. \begin{array}{l} W_{k \min} \leq W_k \leq W_{k \max} \\ k = \overline{1, p} \end{array} \right\},$$

სადაც $W_{k \min}$ და $W_{k \max}$ - k -ური გამომავალი პარამეტრის შესაძლო მნიშვნელობების ქვედა და ზედა საზღვრებია.

წინა პარაგრაფში აღწერილი დასაშვები ამონახსნის ძებნის ალგორითმი გამოდის იმ დაშვებიდან, რომ სამუშაო მდგომარეობა დაფიქსირებულია, ვთქვათ, გარეგანი პარამეტრების საშუალო მნიშვნელობებისათვის. მაგრამ ამასთან ერთად არ შეიძლება სრული დარწმუნებით იმის თქმა, რომ ნაპოვნი \bar{X}_0 ამონახსნი დასაშვები აღმოჩნდება გარეგანი პარამეტრების ნებისმიერი სხვა შესაძლო კომბინაციისათვის.

უფრო ზუსტად რომ ვთქვათ, როცა სქემა სამუშაო მდგომარეობათა სიმრავლით ხასიათდება, აუცილებელია ელემენტთა პარამეტრების ისეთი \bar{X} ვექტორის პოვნა, რომელიც მიეკუთვნება ცალკეული სამუშაო მდგომარეობის შესატყვისი დასაშვები ამონახსნების არეთა გადაკვეთას.

ზოგჯერ ცალკეული სამუშაო მდგომარეობის შესატყვისი დასაშვები ამონახსნების არეთა გადაკვეთა შეიძლება ცარიელი აღმოჩნდეს. ასეთ შემთხვევაში დასაშვები ამონახსნი საერთოდ არ არსებობს. საზრვრები, რომლებიც დადგენილია ტექნიკური დავალებით სქემის გამომავალი პარამეტრების ცვლილებებისათვის, ძალიან ვიწრო ხდება განხილული სტრუქტურის პირობებში და ამიტომ, შესაძლებლობის ფარგლებში, საჭიროა მათი გაფართოება. ალტერნატიული მიდგომის დროს შეიძლება შეიცვალოს კიდევ გარეშე შემავალი პარამეტრების ცვლილების არეც, თუ, ცხადია, ასეთი რამ დასაშვებია.

როცა ტექნიკური მოთხოვნები სქემის გამომავალი პარამეტრების მიმართ და გარეგანი შემავალი პარამეტრების შესაძლო ვარიაციათა არეებზე დადებული პირობები არ შეიძლება შეიცვალოს, ხოლო დასაშვები მნიშვნელობა არ არსებობს, საჭიროა სხემის სხვა სტრუქტურას ან მისი დამზადების ტექნოლოგიას მივმართოთ.

სქემის დასაპროექტებლად ტექნიკურ დავალებაში წამოყენებულ მოთხოვნათა თავსებადობის გამოსაკვლევად სატესტო პროცედურები არ არსებობს, თუ მხედველობაში არ მივიღებთ შეზღუდვათა დაწესებას გამომავალ მახასიათებლებზე წრფივი უტოლობების სახით. ამიტომ შეუძლებელია წინასწარ საკითხის გადაწყვეტა დასაშვები ამონახსნის არსებობის შესახებ.

აღნიშნულ გარემოებათა მიუხედავად, ამოცანის გადაჭრისადმი არსებობს მიდგომა, რომელიც *სქემის სამუშაო მდგომარეობათა სიმრავლის დისკრეტიზაციის იდეას* იყენებს. თავად იდეას კი საფუძვლად უდევს დაშვება იმის შესახებ, რომ ყოველი გარეგანი გამომავალი W_k ($k = \overline{1, p}$) პარამეტრი შეიძლება იღებდეს მხოლოდ სამ

მნიშვნელობას შესაძლო ცვლილებათა ინტერვალიდან - საშუალოსა და ორ სასაზღვროს:

$$\left. \begin{aligned} W_k &= (W_{k \min} + W_{k \max}) / 2 \\ W_k &= W_{k \min} \\ W_k &= W_{k \max} \end{aligned} \right\}.$$

მაშინ p გარეგანი შემავალი პარამეტრის შემთხვევაში სქემის შესაძლო სამუშაო მდგომარეობათა N რიცხვი სასრული იქნება, სახელდობრ:

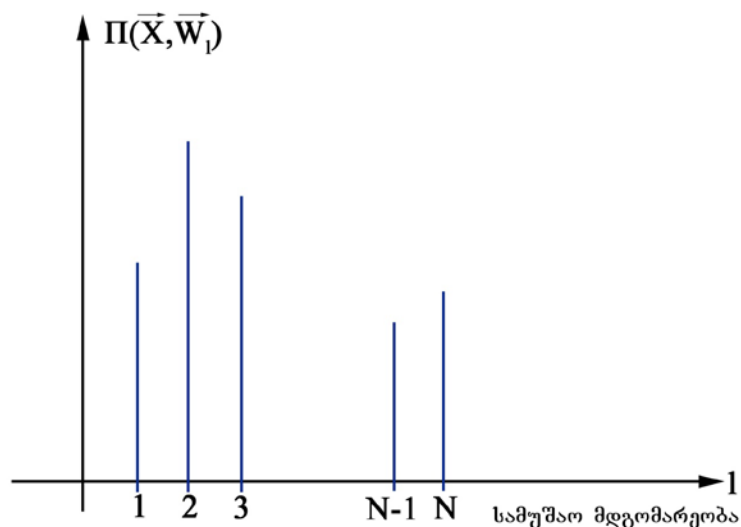
$$N = 3^p. \tag{8.1}$$

ამ რაოდენობიდან რიგი ნაკლებად მნიშვნელოვანი სამუშაო მდგომარეობა ხშირად შეიძლება წინასწარ გამოირიცხოს.

ყოველი მდგომარეობა განისაზღვრება გარეგანი შემავალი პარამეტრების კონკრეტული ვექტორით:

$$\left. \begin{aligned} \bar{W}_l &= (W_1, W_2, \dots, W_p)_l \\ l &= \overline{1, N} \end{aligned} \right\}.$$

შინაგანი შემავალი პარამეტრების ყოველ \bar{X} ვექტორს შეესაბამება ხარისხის განზოგადებული $\Pi(\bar{X}, \bar{W})$ მაჩვენებლის N მნიშვნელობა $\Pi(\bar{X}, \bar{W}_1), \Pi(\bar{X}, \bar{W}_2), \Pi(\bar{X}, \bar{W}_3), \dots, \Pi(\bar{X}, \bar{W}_{N-1}), \Pi(\bar{X}, \bar{W}_N)$, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახაზზე 24.



ნახ. 24. სქემის ხარისხის განზოგადებული მაჩვენებლის მნიშვნელობები სხვადასხვა სამუშაო მდგომარეობისათვის

ელემენტების პარამეტრების (ე.ი. \bar{X} ვექტორის მდგენელების) სიდიდეთა ცვლილებისას, თავისთავად ცხადია, შეიცვლება $\Pi(\bar{X}, \bar{W}_l)$ მნიშვნელობათა ნაკრები ($l = \overline{1, N}$). ეს გარემოება საშუალებას გვაძლევს დასაშვები ამონახსნის ძებნა სქემის N სამუშაო მდგომარეობის გათვალისწინებით დავიყვანოთ ისეთი $\bar{X}_0 = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0})$ ვექტორის დადგენამდე, რომლისთვისაც მინიმალურია

$$\Pi(\bar{X}) = \sum_{i=1}^N \Pi(\bar{X}, \bar{W}_i) \quad (8.2)$$

ხარისხის ინტეგრალური განზოგადებული მაჩვენებელი.

§9 სერიულად ვარგისი ელექტრონული სქემების დაპროექტების სტატისტიკური ასპექტები

თუ ელექტრონული სქემა მასობრივი წარმოების ნაკეთობაა, მაშინ მოწყობილობათა ცდომილებების, საწყისი მასალების პარამეტრთა გაზნევისა და ტექნოლოგიური პროცესის სხვა გარდაუვალი შემფოტებების გამო, ელემენტების X_1, X_2, \dots, X_n პარამეტრებისათვის არ ხერხდება ყველა ნიმუშში მათი ტოლობის უზრუნველყოფა \bar{X}_0 დასაშვები ამონახსნის ვექტორის $X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0}$ მდგენელების დონეზე. ამიტომ იძულებული ვართ X_1, X_2, \dots, X_n შინაგანი შემავალი პარამეტრები განვიხილოთ შემთხვევით სიდიდეებად, რომელთა მხოლოდ საშუალო მნიშვნელობები ემთხვევა $X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0}$ სიდიდეებას, ხოლო ჭეშმარიტი რეალიზაციები განაწილებულია შემთხვევითად ნიმუშიდან ნიმუშამდე გარკვეული კანონებით მოცემული X_i^- და X_i^+ საზღვრების ფარგლებში ყველა $(i = \overline{1, n})$ -სათვის. ამრიგად, $X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0}$ შეიძლება განიხილებოდეს სქემის ელემენტთა X_1, X_2, \dots, X_n პარამეტრების მხოლოდ ნომინალურ მნიშვნელობებად, X_i^- და X_i^+ კი აუცილებელია ყველა $(i = \overline{1, n})$ -სათვის მივიჩნიოთ X_i შემთხვევითი სიდიდის შესაძლო რეალიზაციათა საზღვრებად. ეს საზღვრები განისაზღვრება δ_i^- და δ_i^+ დაშვებებით (tolerance, permissible variation, tolerable limit) X_{i0} ნომინალზე:

$$\left. \begin{aligned} X_i^- &= X_{i0} (1 - 0.01 \cdot \delta_i^-) \\ X_i^+ &= X_{i0} (1 + 0.01 \cdot \delta_i^+) \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

სადაც δ_i^- და δ_i^+ დაშვებათა გამოსახვა ნაგულისხმევია პროცენტობით. სიმეტრიული დაშვებების შემთხვევაში $\delta_i^- = \delta_i^+ \equiv \delta_i$.

ვინაიდან ელექტრონული სქემების გამომავალი მახასიათებლები ფუნქციურად დაკავშირებულია ელემენტების პარამეტრებთან, ამიტომ ისინიც შემთხვევით სიდიდეებას წარმოადგენს. აქედან გამომდინარე, ელექტრონული სქემის სერიული წარმოების დროს ყოველ ცალკეულ ნიმუშს როგორც შინაგანი შემავალი, ასევე გამომავალი პარამეტრების (ერთისა და იმავე სამუშაო მდგომარეობისათვის) საკუთარი მნიშვნელობა ექნება. ამასთან ერთად სქემათა ერთ ნაწილში შრომისუნარიანობის პირობები აღმოჩნდება დაცული, ხოლო მეორეში - დარღვეული.

ელექტრონული სქემის გამომავალი პარამეტრების მნიშვნელობათა შესაბამისობა ტექნიკურ მოთხოვნებთან წარმოებიდან გამოსვლის მომენტში განსაზღვრავს ვარგისი ნაკეთობების გამოსავლიანობას, ანუ ამ ნაკეთობათა სერიულვარგისიანობას.

ელექტრონული სქემის ექსპლუატაციის პროცესში მისი ელემენტები როგორც გარეგანი ფაქტორების (ტემპერატურის, ტენიანობის, ვიბრაციის, აჩქარების და ა.შ.), ასევე შინაგანი მიზეზების (მოლეკულური ცვლილებების, შინაგანი დამაბულობების და სხვა) მნიშვნელოვან ზემოქმედებას განიცდის. ეს გარემოებები შეიძლება იცვლებოდეს საკმაოდ ფართო საზღვრებში, რაც იწვევს ელემენტთა მასალის ფიზიკური თვისებებისა

და, ამრიგად, მათი პარამეტრების, ცვლილებასაც. თავის მხრივ ამას თან ახლავს სქემის გამომავალი მახასიათებლების ცვლილება და შრომისუნარიანობის პირობათა დარღვევა.

აქ საჭირო იქნება იმის შეხსენება, რომ *შრომისუნარიანობად* მიღებულია ობიექტის მდგომარეობა, რომლის დროსაც მას შეუძლია მოთხოვნილი ფუნქციების შესრულება გამომავალი პარამეტრების მნიშვნელობათა შენარჩუნებით დაწესებულ საზღვრებში. მოვლენა, რომელიც ობიექტის შრომისუნარიანობის დარღვევას შეესაბამება, აღიქმება *მტყუნებად*.

ამრიგად, თუ განვიხილავთ ერთისა და იმავე ტექნოლოგიური პროცესის მეშვეობით იდენტურ პირობებში დამზადებული ელექტრონული სქემების დიდ რაოდენობას ობიექტების გარკვეულ *ანსამბლად*, მაშინ შეიძლება მტყუნებათა ორი ძირითადი ტიპის გამოყოფა:

- შრომისუნარიანობის პირობების დარღვევასთან დაკავშირებული მტყუნებები, რომლებსაც წარმოებიდან გამოსვლის მომენტში აქვს ადგილი;

- შრომისუნარიანობის პირობების დარღვევასთან დაკავშირებული მტყუნებები, რომლებიც ექსპლუატაციის პროცესში გამომავალი მახასიათებლების თანდათანობითი ცვლილებების გამო ხდება.

ფიზიკური თვალსაზრისით ეს მტყუნებები არსებითად განსხვავდება ერთმანეთისაგან, რადგან მათი გაჩენის მექანიზმი, როგორც ამაში დავრწმუნდით, ერთნაირი არ არის. მათემატიკურ ასპექტში კი მტყუნებათა ორივე ტიპი ანალოგიურია, რადგან მათი გავლენა ფასდება სქემის ერთი ან რამდენიმე გამომავალი პარამეტრის სასრული ცვლილების საფუძველზე. ამიტომ მტყუნებათა აღნიშნული სახეები შეიძლება გავაერთიანოთ და მათ *პარამეტრული მტყუნებები* ვუწოდოთ. ამ ტერმინის სინონიმებად გამოიყენება ისეთი სახელწოდებები, როგორიცაა *თანდათანობითი* და *მოდრეიფე მტყუნებები*.

მე-8 პარაგრაფში აღწერილი ხარისხის ინტეგრალური განზოგადებული მაჩვენებლის საფუძველზე ელექტრონული სქემის დაპროექტება ხდება ელემენტთა პარამეტრების სტატისტიკური გაზნევის გაუთვალისწინებლად წარმოებიდან გამოსვლის მომენტში. ოპტიმალურობის $\Pi(\bar{X})$ კრიტერიუმი *დეტერმინირებულია*.

მაგრამ ხარისხის უფრო მაღალი მაჩვენებლების უზრუნველყოფა მოითხოვს ელექტრონული სქემის დამატებით ოპტიმიზაციას შესაბამისი *სტატისტიკური კრიტერიუმით*. ასეთ კრიტერიუმად, მაგალითად, შეიძლება გამოვიყენოთ $R_d(\bar{X}, \bar{W}, t)$ ალბათობა იმისა, რომ დროის t მომენტში არ არსებობს პარამეტრული მტყუნებები, ესე იგი ალბათობა იმისა, რომ დროის t მომენტში შესრულებულია შრომისუნარიანობის ყველა პირობა \bar{W} ვექტორით განსაზღვრული მოცემული სამუშაო მდგომარეობისათვის.

ასეთი მიდგომის გამოყენებისას *სერიულვარგისიანობის* სტატისტიკურ მაჩვენებლად უნდა ავიღოთ შრომისუნარიანობის პირობათა შესრულების $R_d(\bar{X}, \bar{W})$ ალბათობა წარმოებიდან გამოსვლის მომენტისათვის:

$$R_d(\bar{X}, \bar{W}) = R_d(\bar{X}, \bar{W}, 0). \quad (9.2)$$

მაშინ სერიულად ვარგისიანი ელექტრონული სქემის დაპროექტების ამოცანა შემდეგ სახეს შეიძენს: $\bar{X} = (X_{10}, X_{20}, \dots, X_{n0})$ დასაშვები ამონახსნის გამოყენებით საწყის

ამონახსნად დადგინდეს ელემენტთა პარამეტრების ახალი $\overline{X}^* = (X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)$ ვექტორი, რომელიც $R_d(\overline{X}, \overline{W})$ ალბათობის $R_d(\overline{X}^*, \overline{W})$ მაქსიმუმს უზრუნველყოფს.

ცხადია, რომ ამისათვის, უპირველეს ყოვლისა, უნდა შეიქმნას მათემატიკური მოდელი $R_d(\overline{X}, \overline{W})$ ალბათობის გამოსაანგარიშებლად და განხორციელდეს გადასვლა ამ ალბათობიდან სერიულვარგისიანობის სტატისტიკურ $R_d(\overline{X})$ მაჩვენებელზე, რომელიც გაითვალისწინებს სქემის სამუშაო მდგომარეობათა სიმრავლის არსებობას.

ლიტერატურა

1. P.W. Becker and F.B. Jensen. Design of Systems and Circuits for Maximum Reliability or Maximum Production Yield.-New York: McGraw-Hill, 1977.-293 pages.
2. G.A. Allan. Yield prediction by sampling IC layout. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 19(3):359–371, 2000.
3. Y. Bourai and C.J.R. Shi. Layout compaction for yield optimization via critical area minimization. In *Proc. Design Automation and Test in Europe*, pages 122–125, 2000.
4. X. Bai, C. Visweswariah, P.N. Strenski, and D.J. Hathaway. Uncertainty-aware circuit optimization. In *IEEE/ACM Design Automation Conference*, pages 58–63, 2002.
5. S. Borkar, T. Karnik, S. Narendra, J. Tschanz, A. Keshavarzi, and V. De. Parameter variations and impact on circuits and micro architecture. In *IEEE/ACM Design Automation Conference*, pages 338–342, 2003.
6. H. Chang and S.S. Sapatnekar. Statistical timing analysis considering spatial correlations using single pert like traversal. In *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*, pages 621–625, 2003.
7. G.A. Allan. Targeted layout modifications for semiconductor yield/reliability enhancement. *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 17(4):573–581, Nov. 2004.
8. M. Orshansky, L. Milor, and C. Hu. Characterization of spatial intrafield gate Cd variability, its impact on circuit performance, and spatial mask-level correction. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 17(1):2–11, 2004.
9. International technology roadmap for semiconductors: Front end processes. <http://public.itrs.net>, 2005.
10. International technology roadmap for semiconductors: Yield enhancement. <http://public.itrs.net>, 2005.
11. P. Gupta, A.B. Kahng, Y. Kim, and D. Sylvester. Self-compensating design for focus variation. In *IEEE/ACM Design Automation Conference*, pages 365–368, 2005.
12. R.R. Rao, A. Devgan, D. Blaauw, and D. Sylvester. Modeling and analysis of parametric yield under power and performance constraints. *IEEE Design & Test*, pages 376–384, July-August 2005.

Article received: 2013-05-11