

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გიორგი ბაინდურაშვილი

გაზგამანაწილებელი ქსელების საშუალო წნევის გაზსადენების  
საიმედოობის გამოკვლევა და ეფექტურობის გაზრდის  
საკითხები

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2019 წ.

საავტორო უფლება © 2019 წელი, გიორგი ბაინდურაშვილი

თბილისი

2019 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გიორგი ბაინდურაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „გაზგამანაწილებელი ქსელების საშუალო წნევის გაზსადენების საიმედოობის გამოკვლევა და ეფექტურობის გაზრდის საკითხები“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

\_\_\_\_\_, 2019 წელი

ხელმძღვანელი: \_\_\_\_\_ პროფესორი დ. ნამგალაძე

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019

**ავტორი:** გიორგი ბაინდურაშვილი

**თემის დასახელება:** „გაზგამანაწილებელი ქსელების სამუალო წნევის გაზსადენების საიმედოობის გამოკვლევა და ეფექტურობის გაზრდის საკითხები“

**ფაკულტეტი:** ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

**ხარისხი:** აკადემიური დოქტორი

**სხდომა ჩატარდა:** \_\_\_\_\_, 2019 წ.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს ლიტერატურის მიმოხილვას, რომლის ძირითადი ამოცანა იყო, გაზგამანაწილებელი საშუალო წნევის ქსელების საიმედოობის, საინჟინრო მდგომარეობის ანალიზი ეფექტურობის თვალსაზრისით.

ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების, განაწილებისა და მოხმარების პროცესის კომბინაცია ქმნის ენერგეტიკის ბაზას. მომავალში გაზის მიწოდების მნიშვნელობის გაზრდა, განსაზღვრავს ენერჯის ფაქტორების განვითარების პროცესში მზარდ როლს. მიუხედავად იმისა, რომ გაზგამანაწილებელი ქსელების ტექნიკური მდგომარეობა საკმარისად მაღალ დონეზეა, მათი საიმედოობისა და ეფექტურობის უზრუნველყოფის პრობლემა ერთ-ერთი მთავარი პრიორიტეტული პრობლემაა, რომელიც სულ უფრო და უფრო მნიშვნელოვანი ხდება ყოველწლიურად. იგი უკავშირდება გაზგამანაწილებელი ქსელების მუდმივ დაბერებას და დაზიანებების ზრდას. ამ სიტუაციიდან გამოსავალი, უპირველეს ყოვლისა, გაზსადენებისა და მოწყობილობის რეკონსტრუქცია და ტექნიკური ხელახალი აღჭურვილობაა.

ტექნოლოგიური საიმედოობის გაუმჯობესება შეუძლებელია შესაბამისი მეთოდიკების შექმნის გარეშე. ამავდროულად, მეთოდოლოგიური დახმარების საკითხები საჭიროებს გაუმჯობესებას, როგორც დამაჯერებლობის შეფასების გაზრდისა და ახალი ალგორითმებისა და პროგრამების შემუშავების თვალსაზრისს. განსახილველი პრობლემების კონტექსტში, საჭიროა შემდგომი კვლევა გაზგამანაწილებელი ქსელების ინოვაციური პოტენციალის გაზრდის ხარისხი.

საქართველოს ეკონომიკის ბაზრის ტრანსფორმაცია ქმნის ეკონომიკის მრავალ პრობლემას, რაც მოითხოვს ღრმა თეორიულ გააზრებას და პრაქტიკული გადაწყვეტის გზების დასაბუთებას. ერთ-ერთი მათგანია ბუნებრივი მონოპოლიების საკითხები, კერძოდ, გაზის სექტორში საწარმოების მართვის პრობლემა. საბაზრო ეკონომიკის გარდა, რომელმაც დაიწყო საგარეო ეკონომიკური საქმიანობის ლიბერალიზაცია, ეკონომიკური ურთიერთობები რადიკალურად შეიცვალა. სამრეწველო საწარმოების წარმოება ქვეყნის ეკონომიკურ საქმიანობაში სულ უფრო მნიშვნელოვან როლს ასრულებს.

ბუნებრივი გაზის სექტორში, ისევე როგორც თანამედროვე მსოფლიო ეკონომიკას, ახასიათებს გლობალიზაციის მაღალი დონით, ასევე ინდივიდუალური სუბიექტებისა და მრეწველობის ურთიერთ დამოკიდებულების ზრდას. ამასთანავე, აქვს გლობალური საწვავისა და ენერგეტიკული კომპლექსის განვითარება, რომელიც, სულ უფრო გლობალურ სისტემად იქცევა, განსაზღვრავს არა მარტო ცალკეული ქვეყნების და რეგიონების ეკონომიკის განვითარება, არამედ სხვადასხვა პოლიტიკური და ეკონომიკური ინტერესების შეჯერება.

XX-საუკუნის ბოლოს და XXI საუკუნის დასაწყისში, მსოფლიო ენერგეტიკულ ბაზარზე ბუნებრივი გაზის როლი მნიშვნელოვნად გაიზარდა, რაც, 2018 წლის მონაცემებით, მსოფლიო ენერგეტიკული ბალანსის 24% -ია და განაგრძობს ბუნებრივი გაზის ეკონომიკის და გარემოსდაცვით ეფექტურობას.

დღეისათვის არსებობს პრობლემის გადაუდებელი აუცილებლობა. კერძოდ, კაპიტალური მშენებლობის ზრდის გამო, საბინაო და კომუნალური სექტორში ბუნებრივი გაზის მოხმარება მუდმივად იზრდება, მაგალითად, საქართველოში ბუნებრივი გაზის მოხმარება საშუალოდ 4.5% -ით იზრდება. ბუნებრივი გაზით სარგებლობის წილი ამჟამად 75-80%-ს აღწევს. ამჟამად, საერთაშორისო ენერგეტიკულ სივრცეში გაჩნდა სხვა ქვეყნის, კერძოდ აზერბაიჯანის როლის ტენდენციის ზრდა.

ნაშრომში გამოყენებულია ფუნდამენტური თეორიები და ცნებები დასაბუთებულია და წარმოდგენილია საქართველოს, აზერბაიჯანის, რუსეთისა და სხვა ქვეყნების საერთაშორისო ორგანიზაციებისა და სახელმწიფო ორგანოების ეკონომიკური ლიტერატურის, პროგრამა და პროგნოზირება, თეორიული და მეთოდური საფუძვლები. პროგნოზების, სამეცნიერო კლასიფიკაციისა და სამეცნიერო განზოგადების შეფასების შედარებითი, სისტემური, სტრუქტურული ფუნქციონალური, გრაფიკული, ეკონომიკური და სტატისტიკური ანალიზი, მეთოდების პროგნოზირება და შეფასება, მონაცემთა დამუშავების ისეთი მეთოდები, როგორცაა განზოგადება, დაჯგუფება, შერჩევა, შედარება და ა.შ. ამ კვლევაში საქართველოს გაზგამანაწილებელი ქსელების განვითარების გარე ეკონომიკური ასპექტების შეფასების გარდა, განხორციელდა მცდელობა, გეოეკონომიკური მეთოდოლოგიის ძირითადი ელემენტების შემუშავება ქვეყნის საგარეო ეკონომიკური და გეოპოლიტიკური ინტერესების გათვალისწინებით, მთავარი საერთაშორისო გაზის პროექტების ანალიზისთვის.

პროგნოზირებადი გაზის მოხმარების რეჟიმების დადგენა უდავოა, ვინაიდან პერსპექტიული დაგეგმვისა და მართვის სფეროში პროგნოზების დასაბუთება ეფექტური საშუალებაა. კვლევის რელევანტურობა გამოიხატება ოპერატიულ-ტაქტიკური მართვის შედეგების გამოყენებით.

ნაშრომის მიზანია ბუნებრივი გაზის მოთხოვნის სიმულაცია, ანალიზი და პროგნოზირება. ვინაიდან მიმდინარე და გრძელვადიანი დაგეგმარება საშუალებას იძლევა დაგეგმილი პერიოდის ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების მოცულობებზე, მომხმარებლებისთვის მათი განაწილების მოცულობა. ამ მიზნის მისაღწევად აუცილებელია შემდეგი ამოცანების გადაჭრა: ბუნებრივი გაზის მოცულობების მაჩვენებლების მოდელირების თეორიისა და პრაქტიკის ანალიზი; ცნობილი პროგნოზირების მოდელები და გავითვალისწინეთ ბუნებრივი აირის მოთხოვნის ანალიზისა და პროგნოზირების დროის სუსტი მხარეები, ანალიზისა და პროგნოზირების ცნობილი მოდელების ადაპტაციისა და მოდიფიცირების შესაძლებლობების იდენტიფიცირება. გაზგამანაწილებელი ქსელის საიმედოობის ანალიზი, კერძოდ

მტყუნებებისა და ადგენების ალბათური მახასიათებლების ანალიზი, მარკოვის პროცესების საშუალებით.

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე წარმოადგენს ბუნებრივი გაზის მოთხოვნის ანალიზისა და პროგნოზირების მეთოდური და პრაქტიკული ასპექტების განვითარება., საიმედოობის მახასიათებლების დადგენა და მათ ეფექტურობა.

## Resume

The thesis includes a review of literature, the main task of which was to analyze the average pressure of the gas distribution network reliability, engineering analysis of the situation in terms of efficiency.

Natural gas transportation, distribution and use of the combination creates an energy base. Increasing the importance of gas supply in the future, determines the energy factors in the development process of the growing role. Despite the fact that the technical condition of the gas distribution networks is quite high, the problem of ensuring their reliability and efficiency is one of the main priorities that is becoming increasingly important every year. It is connected to the continuous aging of gas distribution networks and the increase of damages. The solution out of this situation, first of all is the technical re-equipment and reconstruction of the devices and the gas pipelines.

Technological reliability can not be improved without forming appropriate methods. At the same time, the methodological assistance issues need to be improved in terms of increasing the credibility assessment and the development of new algorithms and programs. In the context of problematic issues, a further study is needed to increase the innovation potential of gas distribution networks.

The transformation of Georgian market economy creates a lot of economics problems which require deep theoretical understanding and justification for practical solutions. One of them is the issue of natural monopolies, in particular the problem of management of enterprises in the gas sector. Besides the market economy, which started liberalization of foreign economic activity, economic relations have changed radically. The production of industrial enterprises plays an increasingly important role in the country's economic activity.

In the natural gas sector, as well as the modern world economy, it is characterized by the high level of globalization, as well as the increase of individual dependence and industry dependence. Furthermore, the development of global fuel and energy complexes, which become a more global system, determines not just the development of economies of individual countries and regions, but also the integration of various political and economic interests.

At the end of the XX-XXI century and the beginning of the XXI century, the role of natural gas in the world energy market has increased significantly, according to 2018, 24% of the world's energy balance and continues to maintain the natural gas economy and environmental effectiveness.

Nowadays there is an urgent need for the problem. In particular, because of the increase in capital construction, natural and natural gas consumption in the housing and utility sector continues to grow, for example, natural gas consumption in Georgia increases by 4.5%. The share of natural gas consumption now reaches 75-80%. Nowadays, the growth of the role of another country, in particular the role of Azerbaijan in the international energy space has emerged.

Fundamental theories and concepts are used in the paper and are presented as theoretical and methodical basis for economic literature, program and

forecasting of international organizations and state agencies of Georgia, Azerbaijan, Russia and other countries. Comparative, systemic, structural functionality, graphic, economic and statistical analysis of predictions, scientific classification and scientific generalization evaluation, prediction and evaluation of methods, methods of data processing such as generalization, grouping, selection, comparison, etc. In addition to assessing external economic aspects of Georgia's development of gas distribution networks in this study, an attempt has been made to elaborate the main elements of geo-economic methodology for the country's foreign economic and geopolitical interests to analyze major international gas projects.

The predictable gas consumption patterns are unmistakable, as it is an efficient way to predict forecasts in prospective planning and management. The research relevance is reflected in the use of operative-tactical management results.

The goal is to simulate, analyze and predict the natural gas demand. Since current and long-term planning allows the volume of natural gas transportation to the planned period, the volume of their distribution to consumers. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: Analysis of the theory and practice of modeling of natural gas volumes; Famous Forecasting models and we consider the weakness of the time-consuming and forecasting of natural gas demand, identifying possibilities of adaptation and modification of well-known models of analysis and forecasting. Analysis of the reliability of gas distribution networks, in particular the analysis of probabilities of disadvantages and precautions, through Markov processes.

Scientific innovation of the thesis is the development of methodical and practical aspects of natural gas demand analysis and forecasting, determining reliability characteristics and their effectiveness.



შესავალი .....17

**თავი 1. მსოფლიოსა და საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის და ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა და ანალიზი.....23**

1.1. მსოფლიოსა და საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის მიმოხილვა.....23

1.2. ლიტერატურის წყაროების მიმოხილვა და ანალიზი, გაზსადენების ავარიებისა და რისკების შესახებ.....24

1.3. გაზგამანაწილებელი ქსელის მტყუნებებისა და აღდგენების ალბათური მახასიათებლების დადგენის მეთოდოლოგია.....34

1.4. გაზგამანაწილებელი ქსელების საიმედოობის თეორიის კრიტერიუმები და მახასიათებლები.....36

**თავი 2. გაზგამანაწილებელი ქსელის გაზსადენის გამტარუნარიანობის გაანგარიშება ლუპინგის საშუალებით.....41**

2.1. საშუალო წნევის გაზსადენები ლუპინგით.....41

2.2. საშუალო წნევის გაზსადენების ზღუდარების ეფექტურობა.....43

**თავი 3. გაზგამანაწილებელი სისტემების საიმედოობა.....59**

3.1. საშუალო წნევის გაზსადენების დაზიანების აღდგენის ალბათური მახასიათებლების დადგენა, შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ საშუალო ქსელის გაზსადენების მაგალითზე.....62

3.2. ნამუშევარის ნარევის უმტყონო მუშაობის ალბათობის დადგენა.....68

3.3. აღდგენადი სისტემის საიმედოობა.....70

3.4. მტყუნების საფრთხეს წირი.....82

**თავი 4. ქსელის ზღუდარიანი ელემენტის ალბათობა.....85**

4.1 გაზსადენის ორი პარალელური ხაზი და ზღუდარი.....92

4.2 არააღდგენადი სისტემის დუბლირების ნამუშევრის უმტყუნების მუშაობის ალბათობის განაწილების დადგენა, მსუბუქი რეზერვის სქემისას.....	94
4.3. საიმედოობის პროცესები აღდგენის დროით გაზომვარაგებაში.....	97
4.4. რეზერვირების საკითხები გაზომვარაგებაში.....	100
4.5. საიმედოობის სამი მდგომარეობის მქონე გრაფი გაზომვარაგებაში.....	109
<b>თავი 5. დაბალი წნევის გაზომვარაგების ორი რგოლის და ჩიხის საიმედოობის მახასიათებლების დადგენა.....</b>	<b>119</b>
<b>დასკვნები.....</b>	<b>134</b>
<b>გამოყენებული ლიტერატურა.....</b>	<b>137</b>

## ცხრილების ნუსხა

83

ცხრილი 1. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის 20 მსხვილი ქვეყნების მარაგები..25

ცხრილი 2. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ<sup>3</sup>, %)..26

ცხრილი 3. ბუნებრივი გაზის დამტკიცებული ქვეყნების ნუსხა.....29

ცხრილი 4. მაგისტრალური გაზსადენების მტყუნებების წილი (%).....33

ცხრილი 5. მსოფლიო გაზსადენების ავარიის მიზეზები 2014-2018 წწ და მათი მტყუნების საფრთხეს ცვლილება (ავარია/(წელი·1000 კმ)).....34

ცხრილი 6.  $f(n) = \frac{(n+1)^2}{2n+1}$  ფუნქციის მნიშვნელობები.....53

ცხრილი 7.  $f\left(\chi/\sqrt{p}\right) = \left[1 - \frac{1}{\left(\chi/\sqrt{p}\right)^2}\right]$  ფუნქციის მნიშვნელობები.....53

ცხრილი 8.  $\frac{x_L}{L} = f(n) \left[1 - \frac{1}{\left(\chi/\sqrt{p}\right)^2}\right]$  ფუნქციის მნიშვნელობები.....54

ცხრილი 9.  $\frac{x_L}{L} = f(n) \left[1 - \frac{1}{\left(\chi/\sqrt{p}\right)^2}\right]$  ფუნქციის ზღვრული მნიშვნელობები...54

ცხრილი 10. ქ. თბილისის უბნების დაზიანების კრებსითი ცხრილი (რუსთავისა და მარნეულის გზატკეცილები, ლომინაძის, ჟორდანიას, ლოლობერიძის, სურგულაძის ქუჩები, ზემო ფონიჭალა, ლისი ვერანდა).....63

ცხრილი 11. ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკური მონაცემები, შესაბამისი ამონაკრების მიხედვით (სრული მექანიკური დაზიანება).....64

<b>ცხრილი 12.</b> ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკური მონაცემები, შესაბამისი ამონაკრების მიხედვით (კოროზიული დაზიანება).....	65
<b>ცხრილი 13.</b> ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკური მონაცემები, შესაბამისი ამონაკრების მიხედვით (შემთხვევითი დაზიანება).....	67
<b>ცხრილი 14.</b> ლოგიკური ოპერაციები.....	86
<b>ცხრილი 15.</b> ქსელის გაზსადენების ტექნიკური პარამეტრები, კერძოდ უბნების (ელემენტების) სიგრძეები $L_i$ და დიამეტრები $D_i$ .....	124
<b>ცხრილი 16.</b> ქსელის სიტუაციური ანალიზის საიმედოობის პოზიციებ.....	126
<b>ცხრილი 17.</b> გრაფის გადასვლის ინტენსივობები, - მტყუნებების საფრთხე და აღდგენის ინტენსივობები.....	129

## ნახაზების ნუსხა

83.

ნახაზი 1. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის 20 მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ <sup>3</sup> ).....	26
ნახაზი 2. მსოფლიო ქვეყნების მარაგების წილი (%).....	27
ნახაზი 3. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ <sup>3</sup> ).....	27
ნახაზი 4. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ <sup>3</sup> ).....	28
ნახაზი 5. ბუნებრივი გაზის დამტკიცებული ქვეყნების ნუსხა და შესაბამისი მოცულობები (ტრლნ. მ <sup>3</sup> ).....	31
ნახაზი 6. უმსხვილესი საცალო მიმწოდებლის მიერ მიწოდებული გაზის წილი მთლიან საცალო მიწოდებაში.....	32
ნახაზი 7. მაგისტრალური გაზსადენების მტყუნებების წილი (%).....	33
ნახაზი 8. მსოფლიო გაზსადენების ავარიის მიზეზები 2014-2018 წწ და მათი მტყუნების საფრთხეს ცვლილება (ავარია/(წელი·1000 კმ)).....	35
ნახაზი 9. გაზის სექტორში ავარიების მაგალითები: ა. ავარია მაგისტრალურ გაზსადენზე; ბ. გასადენის მაღალი წნევის დაზიანებული კოროზირებული უბანი; გ. გაზსადენის გაგლეჯა; დ. გაზ-ჰაერის ნარევის აფეთქების რღვევა ქვებში.....	35
ნახაზი 10. ლუპინგის საანგარიშო სქემა.....	41
ნახაზი 11. m -ის x/L -ზე დამოკიდებულების გრაფიკი.....	44
ნახაზი 12. ლუპინგის საშუალებით გამტარუნარიანობის გაზრდის საანგარიშო სქემა.....	49
ნახაზი 13. ა. $f(n) = \frac{(n+1)^2}{2n+1}$ ფუნქციის გრაფიკი; ბ. $f\left(\frac{x}{\sqrt{p}}\right) = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{x}{\sqrt{p}}\right)^2}\right]$ ფუნქციის გრაფიკი.....	56

<b>ნახაზი 14.</b> ა. $\frac{x_T}{L} = f(n) \left[ 1 - \frac{1}{\left( \chi / \sqrt{p} \right)^2} \right]$ გრაფიკები; ბ. იგივე შესაბამისი გრაფიკები ზღვრული მნიშვნელობებისათვის.....	56
<b>ნახაზი 15.</b> $\frac{\chi_{Lim}}{\sqrt{p}} = \frac{n+1}{n}$ დამოკიდებულების გრაფიკი.....	57
<b>ნახაზი 16.</b> ჰისტოგრამა და შესაბამისი ვაიბულის ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია (სრული მექანიკური დაზიანება).....	64
<b>ნახაზი 17.</b> ჰისტოგრამა და შესაბამისი ვაიბულის ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია (კოროზიული დაზიანება).....	66
<b>ნახაზი 18.</b> ჰისტოგრამა და შესაბამისი ვაიბულის ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია (შემთხვევითი დაზიანება).....	67
<b>ნახაზი 19.</b> ნარევის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების გრაფიკები სხვადასხვა პარამეტრებისათვის.....	68
<b>ნახაზი 20.</b> მტყუნების საფრთხეს ფუნქციების გრაფიკები სხვადასხვა პარამეტრებისათვის.....	69
<b>ნახაზი 21.</b> აღდგენადი სისტემის გადასვლის გრაფი: $S_0$ - მუშაუნარიანი მდგომარეობა; $S_1$ - არამუშაუნარიანი მდგომარეობა (მტყუნება).....	70
<b>ნახაზი 22.</b> დუბლირებული აღდგენადი სისტემის გრაფი.....	74
<b>ნახაზი 23.</b> სისტემის გადასვლების გრაფი ორი ელემენტით, რომლებიც მუშაობს პირველ რეჟიმში: $S_0$ - მუშა მდგომარეობა; $S_1$ - პირველი ელემენტის მტყუნება (მუშაუნარო მდგომარეობა); $S_2$ - მეორე ელემენტის მტყუნება (მუშაუნარო მდგომარეობა).....	79
<b>ნახაზი 24.</b> სისტემის გადასვლების გრაფი შეიცავს ორ ელემენტს, რომლებიც მუშაობს მეორე რეჟიმში. $S_0$ - მუშა მდგომარეობა; $S_1$ - პირველი ელემენტის მტყუნება (მუშაუნარო მდგომარეობა); $S_2$ - მეორე ელემენტის მტყუნება (მუშაუნარო მდგომარეობა); $S_3$ - ორი ელემენტის მტყუნება (მუშაუნარო მდგომარეობა).....	81
<b>ნახაზი 25.</b> $K_T$ -ს გრაფიკები: $\lambda_1 = 0,001 \div 0,005$ დღე <sup>-1</sup> ; $\lambda_2 = 0,0015$ დღე <sup>-1</sup> ; $\mu_1 = 0,1$ დღე <sup>-1</sup> ; $\mu_2 = 0,09$ დღე <sup>-1</sup> .....	81

ნახაზი 26. $K_T$ -ს გრაფიკები: $\lambda_1 = 0,001$ დღე <sup>-1</sup> ; $\lambda_2 = 0,0015$ დღე <sup>-1</sup> ; $\mu_1 = 0,1 \div 0,4$ დღე <sup>-1</sup> ; $\mu_2 = 0,09$ დღე <sup>-1</sup> .....	82
ნახაზი 27. მტყუნებების საფრთხე რეგლამინტერებული რემონტით.....	83
ნახაზი 28. საწყისი ინფორმაციის წარმოდგენის რაოდენობრივი ფორმები..	84
ნახაზი 29. ლოგიკური სტრუქტურის გარდაქმნა.....	88
ნახაზი 30. ორმაგი რგოლური ქვეყსელი .....	91
ნახაზი 31. ექვივალენტური სქემები: ა. მინიმალური გზები; ბ. მინიმალური კვითები.....	91
ნახაზი 32. უმტყუნო მუშაობის გრაფიკი მინიმალური გზებით, ან კვითების საშუალებით.....	92
ნახაზი 33. სისტემის მტყუნების საფრთხეები $\lambda_1(t)$ , $\lambda_2(t)$ და $\lambda_3(t)$ .....	93
ნახაზი 34. სისტემის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობის გრაფიკი.....	93
ნახაზი 35. მტყუნების საფრთხეს ფუნქციების გრაფიკები $\lambda_1$ და $\lambda_2$ -თვი...	94
ნახაზი 36. ა. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის $f(t)$ ფუნქცია; ბ. $P(t)$ განაწილების ალბათობის ფუნქცია; გ. ინტენსივობის ფუნქცია $\mu(t)$ ; დ. აღდგენის ნაკედის $\Omega(t)$ ფუნქცია.....	99
ნახაზი 37. სხვადასხვა საიმედოობის ელემენტების დუბლირებული სისტემა.....	101
ნახაზი 38. მდგომარეობების ფუნქციები: ა. $P_0(t)$ ; $P_1(t) = P_2(t)$ ; $P_3(t)$ .....	103
ნახაზი 39. სხვადასხვა ელემენტების მქონე დუბლირებული სისტემის ერთჯერადი მტყუნების მარკოვის მოდელი გამსხვილებული მდგომარეობის მცდელობა.....	106
ნახაზი 40. სხვადასხვა ელემენტების მქონე დუბლირებული სისტემის ერთჯერადი მტყუნების მარკოვის მოდელი მიახლოებითი გამსხვილებული მდგომარეობა.....	106
ნახაზი 41. ერთნაირი ელემენტების მქონე დუბლირებული სისტემის ერთჯერადი მტყუნების მარკოვის მოდელი ზუსტი გამსხვილებული მდგომარეობისათვის.....	107

<b>ნახაზი 42.</b> შემსუბუქული რეზერვიანი დუბლირებული სისტემის მარკოვის მოდელი.....	108
<b>ნახაზი 43.</b> საიმედოობის სამი მდგომარეობის მქონე გრაფის დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის მეთოდის სქემა.....	109
<b>ნახაზი 44.</b> გაზმომარაგების ობიექტის სამმდგომარეობიანი გრაფიკი.....	115
<b>ნახაზი 45.</b> მზადყოფნის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მოლოდინის ინტენსივობაზე.....	118
<b>ნახაზი 46.</b> გაზის მიწოდება მომხარებლებს ჩიხური და რგოლური ქსელებით: ა,გ. რგოლური ქსელების ვარიანტები; ბ,დ. ჩიხური ქსელების ვარიანტები. $k, k'$ - ნაკადის გადანაწილების სხვადასხვა ვარიანტები, ნაკადების შეხვედრების წერტილები. 1 - გაზის მიწოდების კვანძი; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 - გაზის მოხმარების კვანძები.....	122
<b>ნახაზი 47.</b> ორი რგოლური ქსელი, ჩიხური ქსელის მიერთებით.....	124
<b>ნახაზი 48.</b> გაზგამანწილებელი ქსელის იდეალიზირებული სქემა.....	125
<b>ნახაზი 49.</b> გაზგამანწილებელი ქსელის შესაბამისი გრაფიკი.....	128
<b>ნახაზი 50.</b> გაზგამანწილებელი ქსელის უბნის მტყუნების საფრთხეს დამოკიდებულებები, გაზსადენის საშუალო დიამეტრზე.....	132



## შესავალი

გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის ავარიული მტყუნებები, რომლებსაც თან სდევს დიდი დანახარჯები აღდგენაზე, ზიანს აყენებს მომხმარებლებს, ხოლო ყველაზე მძიმე შემთხვევებში იწვევს მომიჯნავე მოწყობილობის და სამშენებლო კონსტრუქციების რღვევას და მომსახურე პერსონალის ტრავმირებას. ამასთან დაკავშირებით გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის საიმედოობა, გადაიქცა ქსელის ერთ-ერთ (შესაძლებელია ყველაზე მთავარ) ტექნიკურ მახასიათებლად. ამიტომ დღის წესრიგში დგება ისეთი მოვლენების შესწავლა, რომლებიც გავლენას ახდენს საიმედოობის სხვადასხვა თვისებებზე. კერძოდ – უმტყუნობაზე, ხანგამძლეობაზე, რემონტუნარიანობაზე და მზადყოფნაზე.

გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის საიმედოობის შესწავლისათვის, დაგროვილი გამოცდილებიდან გამომდინარე, მისი გაზრდის ეფექტური გზების მოსანახად, დღეისათვის გაკეთებულია და შესწავლილა საკმაოდ ბევრი სიტუაცია.

საიმედოობის უზრუნველყოფის პრობლემას კომპლექსური ხასიათი გააჩნია და იგი შესაძლებელია გადაწყდეს, მხოლოდ მეცნიერების, კონსტრუქტორების, ტექნოლოგ-დამამზადებლების, ექსპლუატაციისა და რემონტის სპეციალისტების ერთობლივი ძალისხმევით. მეტად მნიშვნელოვანია სწორედ შერჩეული კონსტრუქციული გადაწყვეტები, რომლებიც უზრუნველყოფს მოწყობილობის ნორმალურ და ეკონომიკურ ფუნქციონირებას. ამგვარად, გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის საიმედოობას, განსაზღვრავს მრავალმხრივი ამოცანების ამოხსნა. მათ შორის ერთ-ერთი უმთავრესია ისეთი ინჟინრების და ტექნიკური მომსახურე პერსონალის მომზადება, რომლებიც გაცნობილი არის გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის საიმედოობის პრობლემებს, კარგად არიან დაუფლებული პროექტირების,

დამზადების და ექსპლუატაციის სტადიაზე საიმედოობის გაანგარიშების მეთოდებს და გააჩნიათ უნარი დაგეგმონ, გაუწიოს ორგანიზაცია და გაატაროს ისეთი ღონისძიებები, რომლებიც უზრუნველყოფს მუშაობის და რემონტების ოპტიმალურ რეჟიმებს.

მიუხედავად იმისა, რომ დღეისათვის არსებობს მრავალი კვლევა, რომელიც ითვალისწინებს, გაზგამანაწილებელი ქსელის მოწყობილობის საიმედოობას, ასევე არსებობს, ბევრი საცნობარო და ინფორმაციული წყარო, აღნიშნული საკითხი მაინც არ არის მწყობრად გადმოცემული ლიტერატურის წყაროებში. ამიტომ ნაშრომის მთავარი მიზანია, არსებული ინფორმაციის სისტემატიზაცია და ხარვეზის აღმოფხვრა.

ნაშრომში განიხილება ისეთი გაზგამანაწილებელი ქსელის მექანიკური მოწყობილობის საიმედოობა, რომლებსაც განეკუთვნება გაზსადენები და მოწყობილობა. მოყვანილი ინფორმაცია ძირითადად ეყრდნობა წყაროებში მოყვანილ მონაცემებს.

ნაშრომში სპეციალურად გვერდი აქვს ავლილი ზოგიერთ საკითხს, რომლებიც ეხება გაზგამანაწილებელი ქსელის ისეთი მოწყობილობის საიმედოობის პრობლემებს, რომელთა შესახებ არსებობს დიდი რაოდენობის ლიტერატურული წყაროები და დღეისათვის მათი დამაჯერებლობა ეჭვს არ იწვევს.

გაზგამანაწილებელი ქსელის გაზსადენების საიმედოობას განსაზღვრავს მისი ელემენტების, კვანძების და უბნების ტექნიკური მდგომარეობა: მათ შორის ჩამკეტი არმატურის, კოროზიის საწინააღმდეგო ელექტროქიმიური დაცვის მდგომარეობა; ტექნიკური მომსახურეობისა და რემონტის დონე; მილსადენის დაცვის დონე არასასურველი ზემოქმედებებისაგან. სახაზო ნაწილის საიმედოობაზე დიდ გავლენას ახდენს გამოყენებული კონსტრუქციების, მშენებლობის ხარისხი, ნაკეთობების და მასალების ხარისხი, სამუშაოების ჩატარების ტექნიკური დონე.

გაზსადენების მტყუნებად ითვლება მილის მოლიანობის რღვევა, ანუ გაგლეჯა. ამიტომ ვიყენებთ ტერმინებს მტყუნება და ავარია. ნაკლებად არსებითი მტყუნებები მაგალითად, მცირე ნახვრეტები, სვიშები და ა.შ. რომლებშიც ხდება ბუნებრივი გაზის გაჟონვები, ხშირად ოფიციალური სამსახურების მიერ არ ფიქსირდება. ვინაიდან სარემონტოდ გაჩერება გაჟონვების აღმოსაფხვრელად უფრო ძვირია, ვიდრე დაკარგული პროდუქტის ღირებულება.

გაზსადენის გაგლეჯებს თან ახლავს აფეთქებები და ხანძრები. აფეთქებისას შეიძლება მოხდეს მილის და არმატურის ნაწილების გაბნევა, ზოგჯერ იქმნება ქვაბულები. დაფიქსირებულია შემთხვევები, როდესაც ნაწილების გაბნევის რადიუსი 300 მეტრამდე აღწევდა. მაქსიმალური დაფიქსირებული ქვაბულის ზომებია – 35მX30მX12მ.

მტყუნების საფრთხე დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე: ლითონის ხარისხი და მილების დამზადება; გაშვების ვადები; მილის კედლის სისქე და წნევა; მილსადენის ჩალაგების ხერხი; კლიმატური პირობები, რელიეფი და ა.შ. იმის გამო, რომ ფაქტორები მრავალმხრივია, ხოლო ავარიები – შედარებით იშვიათი, ამიტომ დაგროვილი მონაცემების მიხედვით ძნელია თითოეული ფაქტორის მტყუნების ნაკადის პარამეტრზე გავლენის დადგენა. თუმცა შესაძლებელია ანალიზის გაკეთება მილის დიამეტრის მიხედვით, რადგანაც განსხვავება ავარიულობაში სხვადასხვა დიამეტრის მილებისათვის, საკმაოდ მნიშვნელოვანია.

მოლიანობაში სიტუაციის დასახასიათებლად, შესაძლებელია გაკეთდეს ორი ძირითადი დასკვნა: 1. ავარიულობის დინამიკის დასახასიათებლად, მათემატიკური სტატისტიკის ცნობილი მეთოდების გამოყენების გარდა, საჭიროა ყოველი კონკრეტული სიტუაციის ევრისტიკული ანალიზი. 2. მიზანშეწონილია რეტროსპექტული ინფორმაციის სრული ანალიზის ორგანიზება და რეგულარული ჩატარება, კერძოდ მტყუნებების გარკვეულ ფაქტორებზე (მათ შორის ექსპლუატაციის ხანგრძლივობაზე) დამოკიდებულების დადგენა.

ავარიის ყველაზე ხშირი მიზეზია – გარე კოროზია (ავარიების სრული რაოდენობის დაახლოებით 40%). მილის კოროზიული დაზიანების მიზეზებია: ა. გრუნტის მაღალი კოროზიული აქტივობა (ტენიანობა, მარილები); ბ. იზოლაციის დეფექტები; გ. კათოდური დაცვის სადგურის არასაკმარისად საიმედო მუშაობა. კოროზიის გამო მილის კედლის სისქის შემცირება, იწვევს გამტარუნარიანობის 7-10%-მდე შემცირებას, რადგანაც მტყუნების დიდი ალბათობის გამო, მილსადენებს ამუშავებენ საანგარიშოზე ნაკლებ წნევაზე. გაზსადენებს, განსხვავებით ნავთობსადენებისაგან, გააჩნიად უფრო დიდი მტყუნების საფრთხე (განსაკუთრებით მისახმარისი პერიოდის განმავლობაში), თუმცა მისახმარისი მტყუნებების დიდი რაოდენობა აღმოიფხვრება მისახმარისი პერიოდის განმავლობაში, წინასწარი გამოცდების შედეგად. [1]

მოქმედ გაზსადენების მტყუნებების ლოკალიზაცია – მეტად უთანაბროა – როგორც მთლიანად სისტემაში, ასევე სახაზო ნაწილის ნებისმიერ უბანში. გაზსადენების ფიზიკური ხანგამძლეობა, ასევე ძლიერად ირხევა გაზის შემადგენლობის, მილების ლითონის მარკის და ტიპის, ჩალაგების პირობების მიხედვით. ასევე განსხვავებულია სახაზო ნაწილის სხვადასხვა კონსტრუქციული ელემენტების (ბუნებრივი მოხვეულობები, ამრინები, არმატურა და ა.შ.) მტყუნებები.

არსებობს მნიშვნელოვანი განსხვავება ავარიულობის მიზეზებში, ყოფილი საბჭოთა კავშირისა და დასავლეთის გაზგამანაწილებელი ქსელის მტყუნებებს შორის. ეს აიხსნება იმით, რომ აშშ-ში მტყუნების ავარიების ინტენსივობა ტოლი იყო  $0,58 \pm 0,71$  ავარია/1000კმ-წელიწადი.

ყველაზე დიდი მტყუნების საფრთხე, დაფიქსირებულია კოროზიული დაზიანებებისათვის  $\lambda = 0,22$  ავარია/1000კმ-წელიწადი. აღსანიშნავია, რომ აშშ-ში, მტყუნებების ყველაზე დიდი რაოდენობა, დაკავშირებულია გარე ზემოქმედებასთან, ე.ი. ყველაზე ხშირია შემთხვევითი მტყუნებები.

გაზგამანაწილებელი ქსელის არსებულ თანამედროვე დიაგნოსტიკურ სამსახურს გააჩნია მრავალი ხელსაწყო და მეთოდი მილსადენის მდგომარეობის დიაგნოსტიკისათვის. ყველაზე თანამედროვე (და შესაბამისად ძვირი), არის დიდი რაოდენობის გადამწოდების მქონე “ინტელექტუალური ღორის” გატარება (შესაძლებელია ეს პროცესი შეუთავსდეს მილის გაწმენდას), რომელიც იძლევა სრულ სურათს მილსადენის გარე და შიდა კოროზიული მდგომარეობისა და სხვა დეფექტების შესახებ. ასევე ხდება მილსადენების დამაბუღ-დეფორმირებული მდგომარეობის (მილის გრძივი ღერძის ჩაღუნვის, მისი ზედაპირის კონფიგურაციის) და კედლებში არსებული ძაბვების ანალიზი.

გაზგამანაწილებელი ქსელის უმტყუნო მუშაობის ამაღლებისათვის, შესაძლებელია დაისახოს შემდეგი გზები:

- 1.ავტომატიზაციის დონის ამაღლება და პირველ რიგში ექსპლუატაციაში საიმედო გადამწოდების, გარდამქმნელების, ავტომატიკის და ტელემექანიკის აგრეგატული სისტემების გამოყენება.
2. მილსადენების მდგომარეობის დიაგნოსტიკის გაუმჯობესება, თანამედროვე ტექნიკური საშუალებების ბაზაზე.
3. საიზოლაციო საფარის და მილის კედლების მუდმივი კონტროლი. კათოდური დაცვის სადგურების მდგომარეობის გეგმიური, კომპლექსური შემოწმება.
4. დეფექტოსკოპიის არსებული საშუალებების სრული გამოყენება და ახალი საშუალებების შექმნა.
5. კავშირგაბმულობის ახალი სისტემების (მათ შორის თანამგზავრულის) გამოყენება, მილსადენის ყველაზე საშიში უბნების მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის ოპერატიული გადაცემისათვის.
6. გაჟონვების კონტროლის სამსახურის და ხერხების სრულყოფა, ლაზერული ხელსაწყოების მქონე ვერტმფრენების და თვითმფრინავების მიერ ტრასის შემოფრენა.

ასევე მეტად მნიშვნელოვანია მოხდეს მტყუნებების შესახებ ინფორმაციის აღრიცხვის ავტომატიზაცია, მონაცემების ოპერატიულად მოწოდების შესაბამისად. [2]

# თავი 1. მსოფლიოსა და საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის და ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა და ანალიზი

## 1.1. მსოფლიოსა და საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის მიმოხილვა

საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორის სტრუქტურა წარმოდგენილია შემდეგნაირად: გაზის მიმწოდებლები, ტრანსპორტირების და განაწილების ლიცენზიატები, ლიცენზიატი, პირდაპირი მომხმარებლები და საცალო მომხმარებლები.

საქართველოს პოლიტიკას განსაზღვრავს ეკონომიკის სამინისტრო და სემეკი (საქართველოს ენერჯეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისია). საქართველოში გაზის მოპოვება, გადამუშავება და ამ გაზის ტრანსპორტირების საქმიანობებს აწარმოებს საქართველოს ეკონომიკის სამინისტროს სისტემაში შემავალი სსიპ „ნავთობისა და გაზის სახელმწიფო სააგენტო“.

საქართველო, აზერბაიჯანის „შაჰ-დენიზის“ საბადოდან ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირება ხდება „სამხრეთ-კავკასიური მილსადენით“ (ბაქო-თბილისი-ერზრუმის გაზსადენი). „ოფციური“ და „დამატებითი“ გაზის ვაჭრობა ხდება ხელშეკრულებებით, რომლის მიხედვით ყოველ წელს „ოფციური“ გაზის ხარჯი განისაზღვრება აზერბაიჯანიდან თურქეთში გატარებული გაზის მოცულობის შესაბამისად და ამ ხელშეკრულების მოქმედების ვადა 2068 წლამდეა. დამატებით გაზი და შესაძლოა 2026 წლამდე ქვეყანაში შემოვიდეს 500 მლნ. მ<sup>3</sup>.

ბუნებრივი გაზის განაწილების სექტორში მოქმედებს სამი ძირითადი ლიცენზიატი: შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისი“, შპს „სოკარ ჯორჯია გაზი“ და სს „საქორგაზი“. ამ ლიცენზიატის მიერ განაწილებული ბუნებრივი გაზის ჯამური მოცულობა სრული მოცულობის თითქმის 90%-ს შეადგენს, ხოლო დანარჩენი კომპანიების წილი სრულ არეალში - მცირეა.

სემეკი წარმოადგენს საჯარო სამართლის იურიდიულ პირს, რომელსაც არ გააჩნია სახელმწიფო მაკონტროლებელი ორგანო. ეს კომისია დამოუკიდებელია და ემორჩილება მხოლოდ საქართველოს კანონმდებლობას. მისი დაფინანსების წყარო არის კომისიის რეგულირების სფეროში შემავალი პირებისაგან მიღებული რეგულირების საფასური.

საქართველოს ბუნებრივი გაზის სექტორი წარმოადგენს ბუნებრივ მონოპოლიას, კერძოდ, გაზის ტრანსპორტირება და განაწილება, ხოლო მიწოდება – კონკურენტული საქმიანობაა.

საქართველოს დამოუკიდებლობის პირველ წლებში გაზომომარაგება მკვეთრად გაუარესდა. 1990-2000 წლებში მისი მოხმარება 6 მლრდ მ<sup>3</sup>-დან 5,5-ჯერ შემცირდა. 2001-2005 წლებში მდგომარეობა შედარებით გამოსწორდა. 2005 წელს გაზის მიწოდებამ სულ შეადგინა 3,125 მლრდ მ<sup>3</sup>, ხოლო სომხეთისთვის ტრანზიტი იყო მხოლოდ 1,685 მლრდ მ<sup>3</sup>.

## **1.2 ლიტერატურის წყაროების მიმოხილვა და ანალიზი, გაზსადენების ავარიებისა და რისკების შესახებ**

რესურსების ბაზა 2017 წლისათვის დაფიქსირებულია დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მარაგების 6 588 ტრლნ ფუტ<sup>3</sup> (186,5 ტრლნ მ<sup>3</sup>). დღეისათვის დონის მარაგების მიმდინარე უზრუნველყოფა მეტია 32 წელზე.

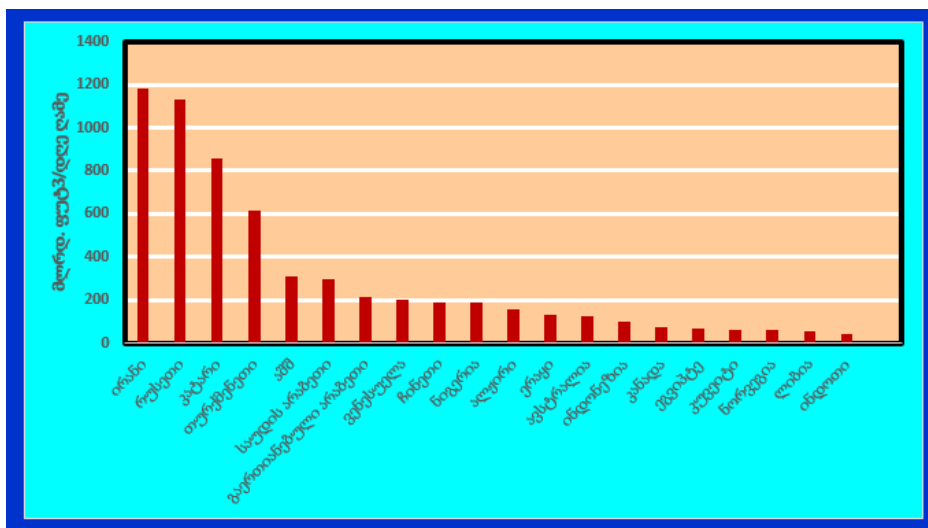
ახლო აღმოსავლეთი წარმოადგენს მსოფლიო მარაგების 42,5%-ს და ეს რეგიონი ყველაზე მსხვილია. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მარაგების მიხედვით

ცხრილში 1 და ნახ. 1-ზე მოყვანილია დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის 20 მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ<sup>3</sup>) [3].



ცხრილი 1. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის 20 მსხვილი ქვეყნების მარაგები  
(ტრლნ მ<sup>3</sup>)

		მლრდ. ფუტ <sup>3</sup> /დღე ღამე	% მსოფლიოს მარაგებიდან
1	ირანი	1183	18
2	რუსეთი	1133	17.3
3	კატარი	858	13
4	თურქმენეთი	617.3	9.4
5	აშშ	307.7	4.7
6	საუდის არაბეთი	297.6	4.5
7	გაერთიანებული არაბეთი	215.7	3.3
8	ვენესუელა	201.3	3.1
9	ჩინეთი	189.5	2.9
10	ნიგერია	186.6	2.8
11	ალჟირი	158.1	2.4
12	ერაყი	130.5	2
13	ავსტრალია	122.6	1.9
14	ინდონეზია	101.2	1.5
15	კანადა	76.7	1.2
16	ეგვიპტე	65.2	1
17	კუვეიტი	63	1
18	ნორვეგია	62.3	0.9
19	ლიბია	53.1	0.8
20	ინდოთი	43.3	0.7

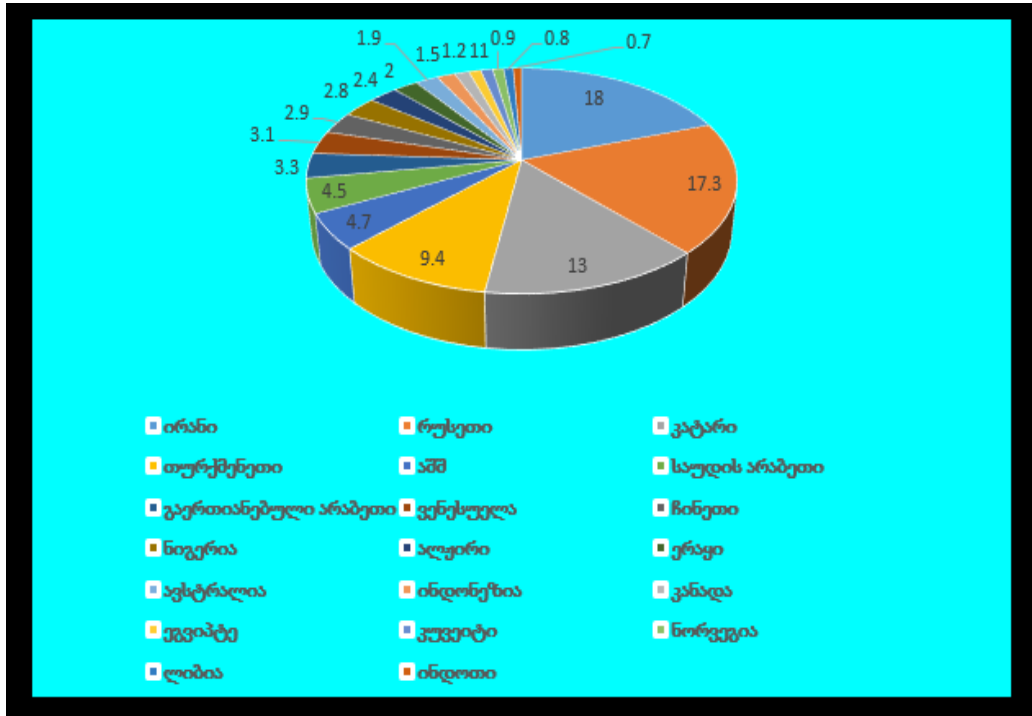


ნახ. 1. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის 20 მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ³)

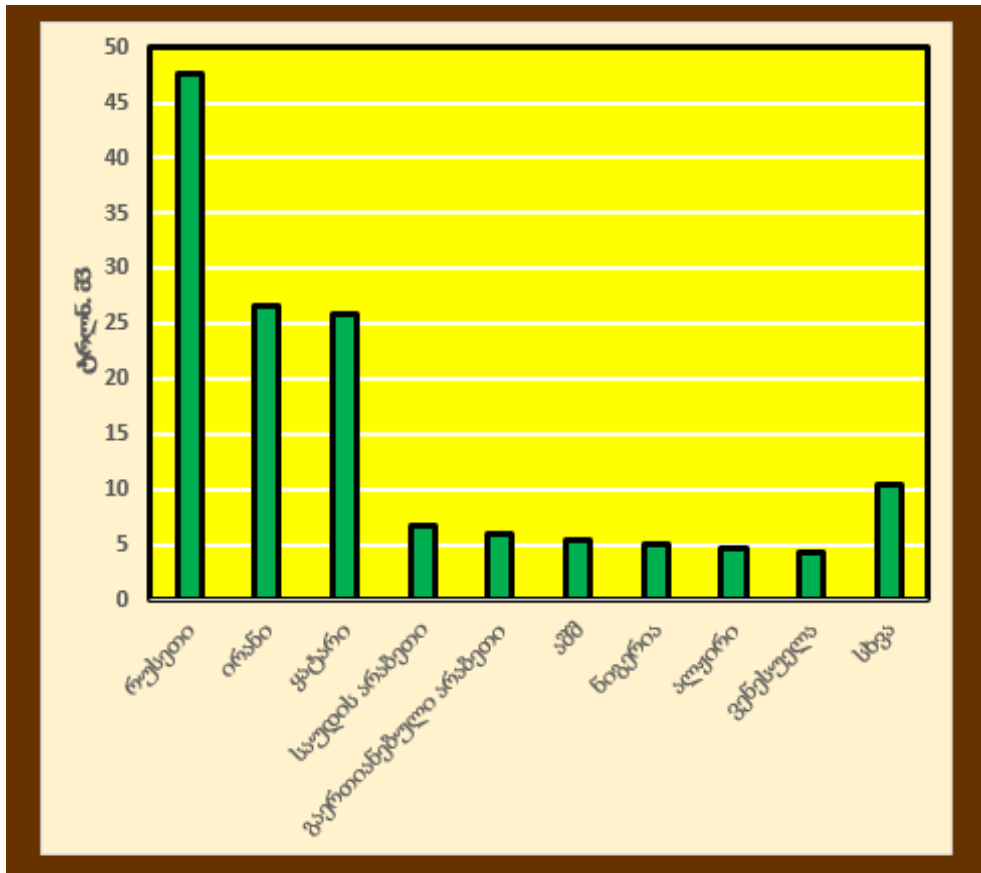
ნახაზ 2-ზე მოყვანილია იგივე ქვეყნები, მსოფლიო მარაგების პროცენტული წილის მიხედვით (%). [4]. სხვა წყაროს მიხედვით [5], აგრეთვე ცხრილ 2-ში და ნახაზ 3 და 4-ზე ნაჩვენებია დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ³, %).

ცხრილი 2. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ³, %).

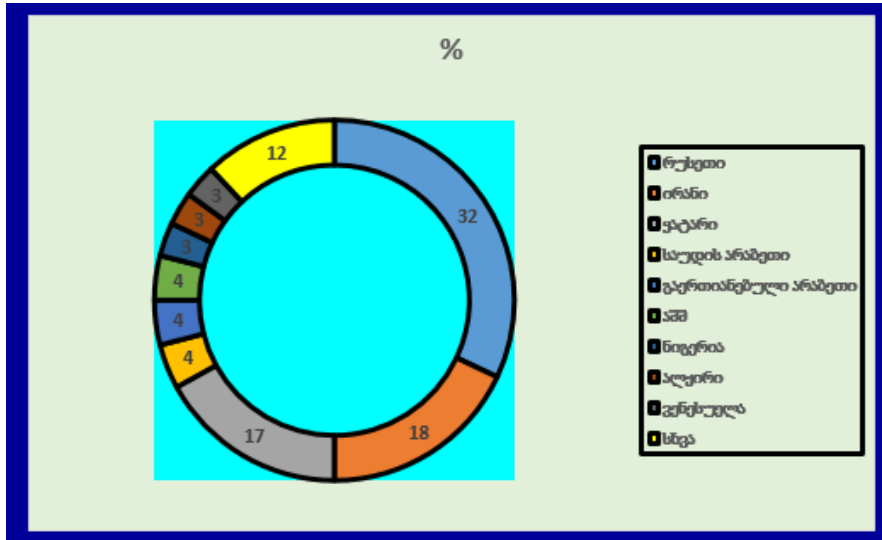
ქვეყანა	ტრლნ. მ³	%
რუსეთი	47.6	32
ირანი	26.6	18
ყატარი	25.8	17
საუდის არაბეთი	6.7	4
გაერთიანებული არაბეთი	6	4
აშშ	5.4	4
ნიგერია	5	3
ალჟირი	4.6	3
ვენესუელა	4.3	3
სხვა	10.4	12



ნახაზი 2. მსოფლიო ქვეყნების მარაგების წილი (%).



ნახაზი 3. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ³)



ნახაზი 4. დამტკიცებული ბუნებრივი გაზის მსხვილი ქვეყნების მარაგები (ტრლნ მ³)

არის მოლოდინი, იმისა რომ 2019 წლის განმავლობაში, გაზის სექტორი გაიზრდება უფრო სწრაფად, ვიდრე ნავთობის და ნახშირის სექტორი (დაახლოებით 1,6%-ით დაწყებულია 2018-დან).

რეგიონების მიხედვით, ყველაზე მეტი მოთხოვნა ხდება ჩინეთისათვის. ასევე მაღალი მოთხოვნაა აშშ-ში და ახლო აღმოსავლეთში. აქ ბუნებრივი გაზის ხელმისაწვდომობა სტიმულირებს ენერგეტიკას.

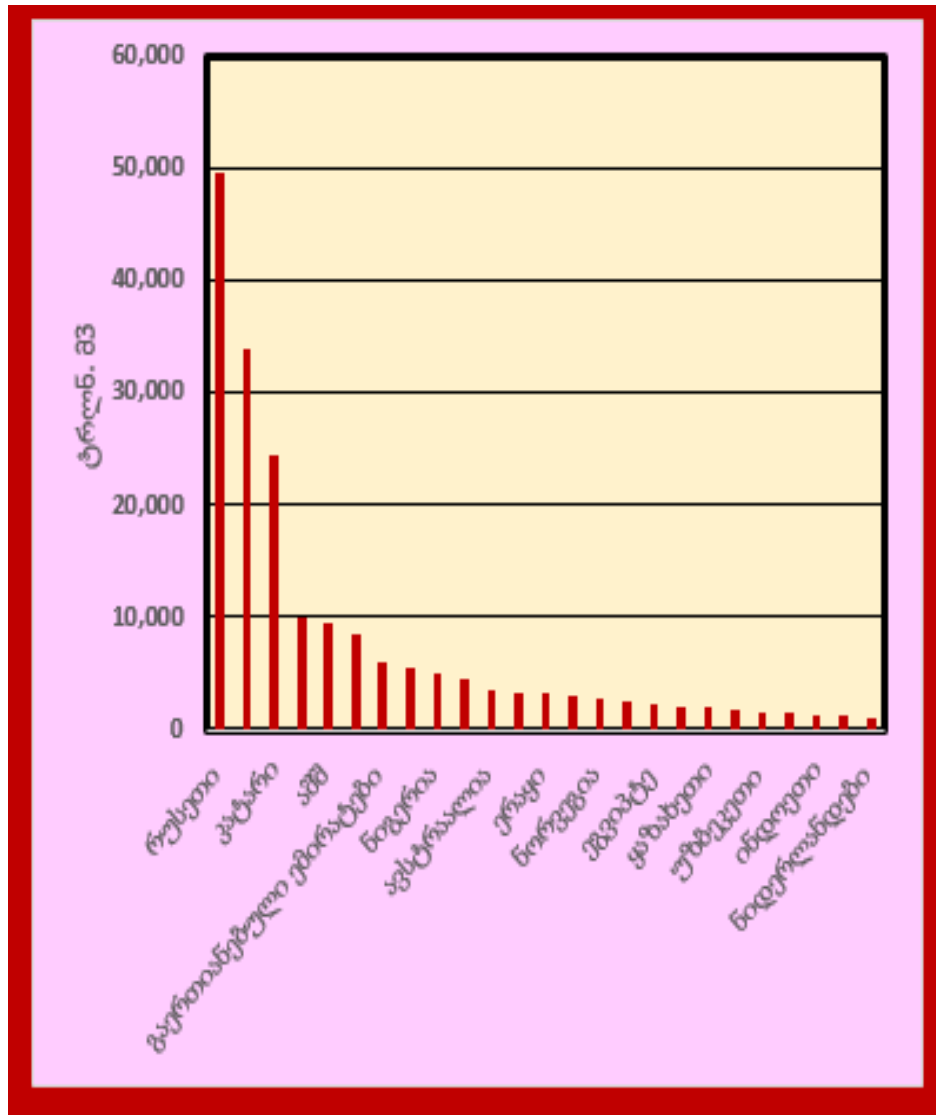
აგრეთვე BP-ს მიხედვით, ცხრილ 3-ში და ნახაზ 5-ზე მოყვანილია ბუნებრივი გაზის დამტკიცებული ქვეყნების ნუსხა და შესაბამისი მოცულობები.

2017 წელს საქართველოსში შემოვიდა 4.3 მილიარდი მ³ ბუნებრივი გაზი, რომლის 48 % მოდის სომხეთში ტრანზიტზე. რომლის მთავარი მომწოდებელი არის რუსეთის ფედერაცია. ხოლო საქართველოსათვის უნნიშვნელოვანეს პარტნიორად გვესახება აზერბაიჯანი. კერძო აზერბაიჯანის სახელმწიფო კომპანია “სოკარ პეტროლეუმ“. ასევე მცირეა, მაგრამ „ფრონტერა რისორსიზ კორპორეიშენი“-ის მიერ ხორციელდება საქართველოში გაზის მოპოვება.

ცხრილი 3. ბუნებრივი გაზის დამტკიცებული ქვეყნების ნუსხა [6]

№	ქვეყანა	მარაგები, ტრლნ. მ <sup>3</sup> (OPEK)	წილი, %, მსოფლიო მარაგებიდან	მარაგები, ტრლნ. მ <sup>3</sup> (BP)	წილი, %, მსოფლიო მარაგებიდან
1	 რუსეთი	49,541	24,6 %	32,6	17,4
2	 ირანი	34,020	16,9 %	34,0	18,2
3	 კატარი	24,531	12,2 %	24,5	13,1
4	 თურქმენეთი	9,934	4,9 %	17,5	9,3
5	 აშშ	9,580	4,8 %	9,8	5,2
6	 საუდის არაბეთი	8,489	4,2 %	8,2	4,4
7	 გაერთიანებული ემირატები	6,091	3,0 %	6,2	3,3
8	 ვენესუალა	5,617	2,8 %	5,6	3,0
9	 ნიგერია	5,111	2,5 %	5,1	2,7
10	 ალჟირი	4,504	2,2 %	4,5	2,4
11	 ავსტრალია	3,621	1,8 %	3,7	2,0
12	 ჩინეთი	3,275	1,6 %	3,5	1,8
13	 ერაყი	3,158	1,6 %	3,6	1,9
14	 ინდონეზია	2,908	1,4 %	2,9	1,5
15	 ნორვეგია	2,654	1,3 %	1,9	1,0
16	 მალაიზია	2,611	1,3 %	1,1	0,6
17	 უზბეკეთი	2,167	1,1 %	1,8	1,0
18	 კანადა	2,028	1,0 %	2,0	1,1
19	 აზერბაიჯანი	1,929	1,0 %	1,5	0,8
20	 კუვეიტი	1,784	0,9 %	1,8	1,0
21	 უზბეკეთი	1,632	0,8 %	1,1	0,6
22	 ლიბია	1,505	0,7 %	1,5	0,8
23	 ინდოეთი	1,355	0,7 %	1,4	0,8
24	 აზერბაიჯანი	1,300	0,6 %	1,2	0,6
25	 ნიდერლანდები	1,044	0,5 %	0,8	0,4

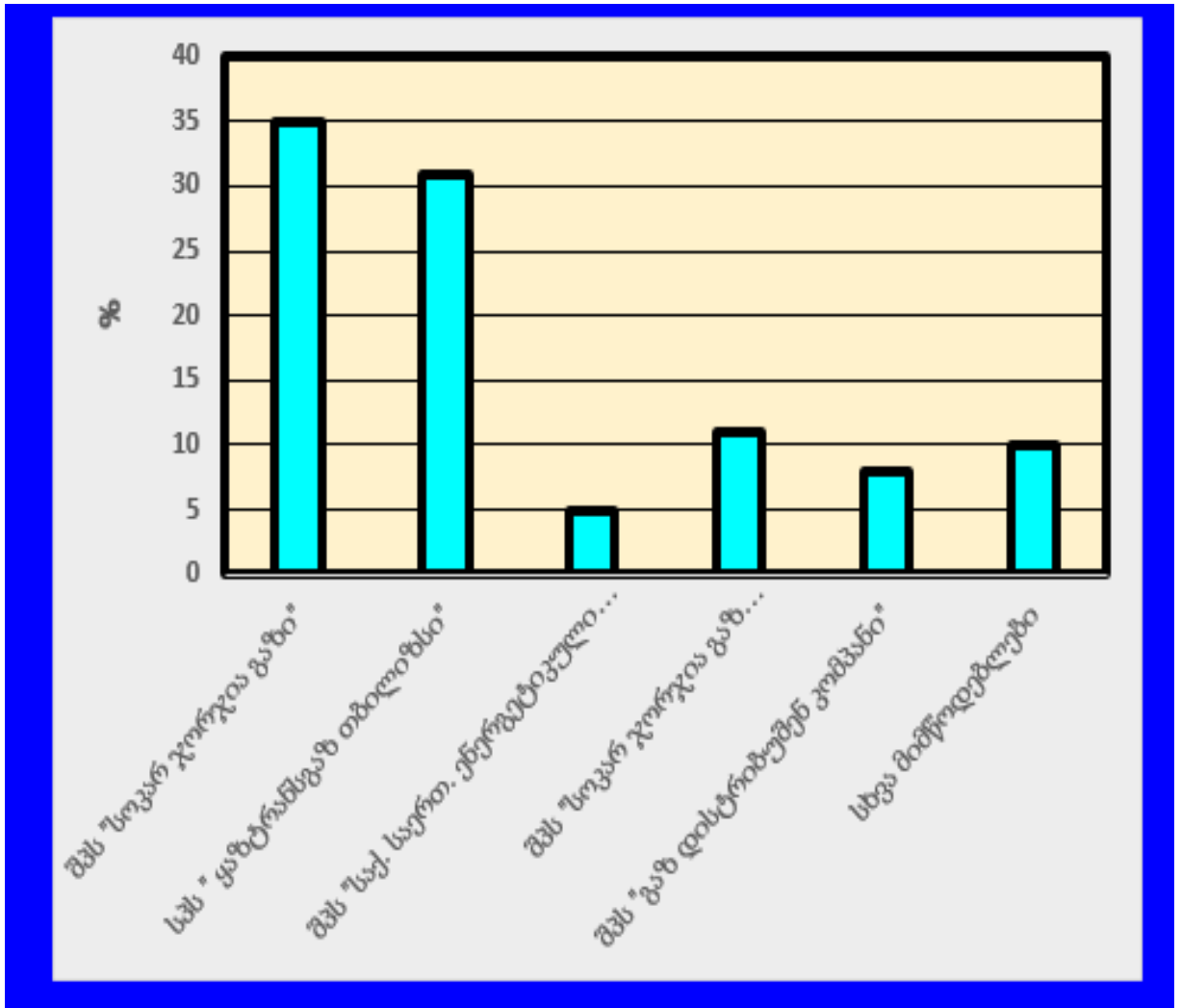
№	ქვეყანა	მარაგები, ტრლნ. მ <sup>3</sup> (OPEX)	წილი, %, მსოფლიო მარაგებიდან	მარაგები, ტრლნ. მ <sup>3</sup> (BP)	წილი, %, მსოფლიო მარაგებიდან
26	 უკრაინა	0,952	0,5 %	0,6	0,3
27	 ომანი	0,950	0,5 %	0,7	0,4
28	 პაკისტანი	0,749	0,4 %	0,6	0,3
29	 მიაიმა	0,485	0,2 %	0,3	0,2
30	 ბრაზილია	0,458	0,2 %	0,5	0,2
31	 დიდი ბრიტანეთი	0,452	0,2 %	0,2	0,1
32	 ბანგლადეში	0,439	0,2 %	0,3	0,1
32	 პერუ	0,425	0,2 %	0,4	0,2
34	 ტრინიდადი და ტიბაგო	0,352	0,2 %	0,3	0,2
35	 მექსიკა	0,347	0,2 %	0,3	0,2
36	 სირია	-	-	0,3	0,2
37	 იემენი	-	-	0,3	0,1
38	 ბოლივია	0,296	0,1 %	0,3	0,2
39	 არგენტინა	0,295	0,1 %	0,3	0,2
40	 ბრუნეი	0,270	0,1 %	0,3	0,1
41	 ტაილანდი	0,242	0,1 %	0,2	0,1
42	 ვიეტნამი	0,216	0,1 %	0,6	0,3
43	 ბაჰრეინი	-	-	0,2	0,1
44	 ისრაელი	-	-	0,2	0,1
45	 პაპუა-ახალი გვინეა	-	-	0,2	0,1
46	 კოლუმბიზ	0,156	0,1 %	0,2	0,1
47	 რუმინეთი	0,113	0,1 %	0,1	0,1
48	 პოლონეთი	0,069	0,0 %	0,1	0,1
49	დარჩენილი ქვეყნები	3,484	1,7 %	1,8	1,0
	<b>სულ</b>	<b>201,139</b>	<b>100,0 %</b>	<b>187,1</b>	<b>100</b>



ნახაზი 5. ბუნებრივი გაზის დამტკიცებული ქვეყნების ნუსხა და შესაბამისი მოცულობები (ტრლნ. მ³)

სომხეთში ბუნებრივი გაზის ტრანზიტის საფასურად მოხმარებას ახორციელებს „გაზის ტრანსპორტირების კომპანია“ სამხრეთ კავკასიური გაზსადენიდან გაზის მიმღები არის სს „საქართველოს ნავთობისა და გაზისა კორპორაცია“. აგრეთვე იმპორტს ახორციელებენ შპს „სოკარ ჯორჯია გაზი“ (აზერბაიჯანიდან) და შპს „საქართველოს საერთაშორისო ენერჯეტიკული კორპორაცია“ .

2018 წელს ბუნებრივი გაზის მიწოდება განახორციელა 9 კომპანიამ. განაწილების კომპანიების გარდა სხვა მიმწოდებლები ბუნებრივი გაზის მიწოდებას აწარმოებს პირდაპირ მომხმარებლებზეც, (ნახ. 6).

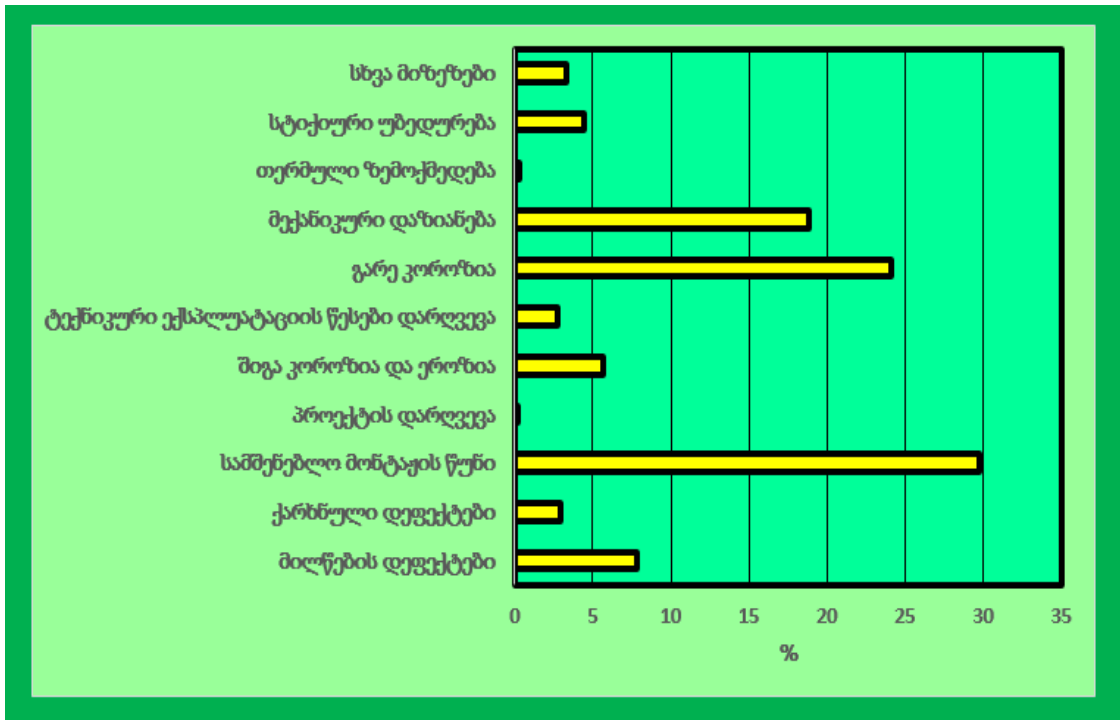


ნახაზი. 6. უმსხვილესი საცალო მიმწოდებლის მიერ მიწოდებული გაზის წილი მთლიან საცალო მიწოდებაში

ამჟამად, მსოფლიოში ჩალაგებულია მრავალი ათასი კილომეტრი სიგრძის მაგისტრალური გაზსადენები. ცხრილში 4 მოყვანილია მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის მტყუნებების საიმედოობის მახასიათებლები.

მაგისტრალური გაზსადენები 1420, 1220, 1020, 820, 530 და ნაკლები დიამეტრებით (ცხრილი 4 და ნახაზი 7).





ნახაზი 7. მაგისტრალური გაზსადენების მტყუნებების წილი (%)

ცხრილი 4. მაგისტრალური გაზსადენების მტყუნებების წილი (%)

წარმოქმნის მიზეზები,	%
მილწების დეფექტები	7.8
ქარხნული დეფექტები	2.9
სამშენებლო მონტაჟის წუნი	29.8
პროექტის დარღვევა	0.2
შიგა კოროზია და ეროზია	5.6
ტექნიკური ექსპლუატაციის წესები დარღვევა	2.7
გარე კოროზია	24.1
მექანიკური დაზიანება	18.9
თერმული ზემოქმედება	0.3
სტიქიური უბედურება	4.5
სხვა მიზეზები	3.3

ცხრილში 5 და ნახაზ 8-ზე მოყვანილია მსოფლიო მაგისტრალური გაზსადენების ავარიის მიზეზები 2014-2018 წწ და მათი მტყუნების საფრთხეს ცვლილების (ავარია/(წელი·1000 კმ))

**ცხრილი 5. მსოფლიო გაზსადენების ავარიის მიზეზები 2014-2018 წწ და მათი მტყუნების საფრთხეს ცვლილება (ავარია/(წელი·1000 კმ))**

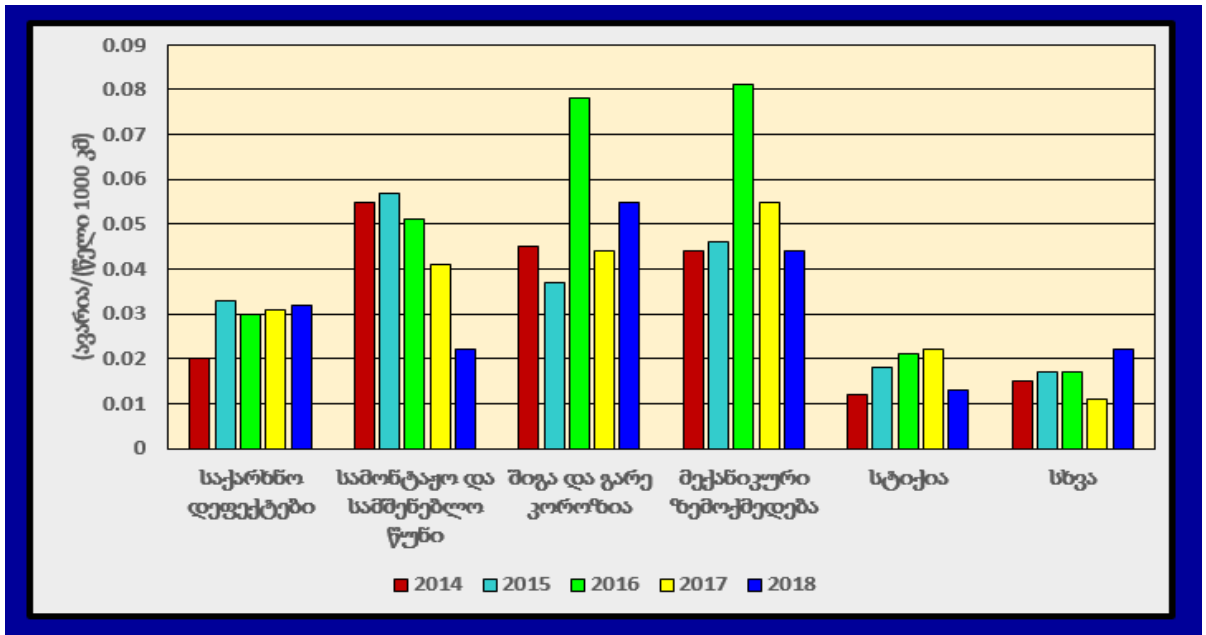
წელი	საქარხნო დეფექტები	სამონტაჟო და სამშენებლო წუნი	შიგა და გარე კოროზია	მექანიკური ზემოქმედება	სტიქია	სხვა
2014	0.02	0.055	0.045	0.044	0.012	0.015
2015	0.033	0.057	0.037	0.046	0.018	0.017
2016	0.03	0.051	0.078	0.081	0.021	0.017
2017	0.031	0.041	0.044	0.055	0.022	0.011
2018	0.032	0.022	0.055	0.044	0.013	0.022

**1.3. გაზგამანაწილებელი ქსელის მტყუნებებისა და აღდგენების ალბათური მახასიათებლების დადგენის მეთოდიკა**

გაზგამანაწილებელი ქსელები წარმოადგენს საშიშ საწარმო ობიექტებს. ავარიები, ავარიული სიტუაციები და დაზიანებები იწვევს ადამიანისათვის საშიშ ტრავმას, ასევე ნაგებობების რღვევას და სხვადასხვა ზარალს.

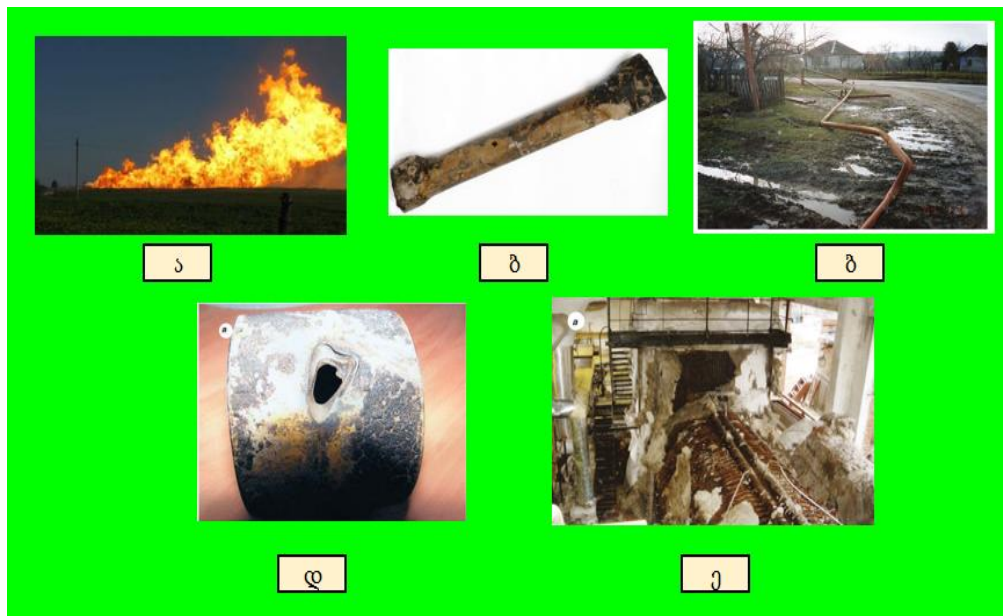
შეიძლება ითქვას, რომ არსებობს ავარიების ზოგადი კლასიფიკაცია:

1. ანტროპოგენური ზემოქმედება: ავტოტრანსპორტის დაჯახება, მიწისა და სამშენებლო სამუშაოების დროს;
2. ბუნების ზემოქმედება: მეხების დაცემა, ქვეშეწვევის ზემოქმედება. ქარის გამო, თოვლი და ა.შ.;
3. კოროზიული ზემოქმედება: მიწისქვეშა, ატმოსფერული კოროზია;
4. დეფექტები: მიწები, შემაერთებელი დეტალები, მოწყობილობა;
5. შედუღების დეფექტები, ტექნოლოგიის დარღვევა და ა.შ.;
6. მოწყობილობის მტყუნებები: სახაზო ნაწილზე, მარეგულირებელ პუნქტებში, საკომპრესოროში და ა.შ.;
7. ექსპლუატაციის რეჟიმების პირობების დარღვევა: პერსონალის არაკვალიფიკაცია, გარე ზემოქმედებები - წნევის რხევა, გაზის გაწმენდის დაბალი ხარისხი, პერსონალის შეცდომებები.



ნახაზი 8 . მსოფლიო გაზსადენების ავარიის მიზეზები 2014-2018 წწ და მათი მტყუნების საფრთხეს ცვლილება (ავარია/(წელი·1000 კმ))

განვიხილოთ გაზის სექტორში ავარიების მაგალითები. ნახაზზე 9 მოყვანილია: ა. ავარია მაგისტრალურ გაზსადენზე; ბ. გასადენის მაღალი წნევის დაზიანებული კოროზირებული უბანი; გ. გაზსადენის გაგლეჯა; დ. გაზ-ჰაერული ნარევის აფეთქების რღვევა ქვაბში.



ნახ. 9. გაზის სექტორში ავარიების მაგალითები: ა. ავარია მაგისტრალურ გაზსადენზე; ბ. გასადენის მაღალი წნევის დაზიანებული კოროზირებული უბანი; გ. გაზსადენის გაგლეჯა; დ. გაზ-ჰაერის ნარევის აფეთქების რღვევა ქვაბში.

#### 1.4. გაზგამანაწილებელი ქსელების საიმედოობის თეორიის კრიტერიუმები და მახასიათებლები

საიმედოობის რიცხვითი მახასიათებლები განისაზღვრება სხვადასხვა ფორმულებით არააღდგენადი და აღდგენადი ნაკეთობებისათვის. არააღდგენადი ელემენტები იცვლება პირველი მტყუნების შემდეგ. ასეთ ელემენტებს შესაძლებელია გააჩნდეს მხოლოდ ერთი (პირველი) მტყუნება. აღდგენად ელემენტებს შესაძლებელია გააჩნდეთ რამოდენიმე მტყუნება.

განვიხილოთ საიმედოობის რამოდენიმე ძირითადი კრიტერიუმი [8]: უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობა  $P(t)$  არის იმის ალბათობა, რომ ელემენტის ექსპლუატაციისას, მოცემულ განსაზღვრულ დროის ინტერვალში არ მოხდება არც ერთი მტყუნება.  $P(t)$  ფუნქცია, ყოველთვის კლებად ფუნქციას წარმოადგენს. როდესაც  $t = 0$ ;  $P(0) = 1$ , ხოლო თუ მუშაობის დრო  $t = \infty$ ;  $P(\infty) = 0$ . ამგვარად  $P(t)$  იცვლება შემდეგ ფარგლებში:  $0 \leq P(t) \leq 1$ .

უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობას განსაზღვრავენ მიახლოებითი ფორმულით:

$$P(t) \approx \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0}, \quad (1)$$

სადაც  $N_0$  არის ნაკეთობების (დეტალების, კვანძების, აგრეგატების და ა.შ.) რაოდენობა ექსპლუატაციის დასაწყისში;  $n_i$  - ნაკეთობების (დეტალების, კვანძების, აგრეგატების და ა.შ.) რაოდენობა, რომლებიც გამოვიდნენ მწყობრიდან  $\Delta t_i$  ინტერვალში;  $t$  - დრო, რომლისათვისაც განისაზღვრება უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობა.

უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობის საპირისპიროს წარმოადგენს მტყუნების ალბათობა  $Q(t)$ ,  $Q(t) = 1 - P(t)$ , ან

$$Q(t) \approx \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0}. \quad (2)$$

უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობის მახასიათებლების ცვლილების მიხედვით განისაზღვრება ნაკეთობების (დეტალების, კვანძების, აგრეგატების და ა.შ.), ტექნიკური რესურსი.

პრაქტიკული გაანგარიშებების დროს, უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$P(t) \approx \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (3)$$

სადაც  $n(t)$  - არის იმ ნაკეთობების (დეტალების, კვანძების, აგრეგატების და ა.შ.) რაოდენობა, რომლებმაც განიცადეს მტყუნება  $t$  დროში.

უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობის ზუსტ ფორმულებს გაჩნიათ შემდეგი სახე:

1. ნორმალური განაწილება:

$$P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (4)$$

სადაც  $\sigma$  - საშუალოკვადრატული გადახრა, ხოლო  $\bar{T}$  - მათემატიკური მოლოდინი.  $P(t)$  განისაზღვრება დანართი 1-ის მიხედვით.

2. ექსპონენციალური განაწილება:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t}. \quad (5)$$

აქ  $\lambda$  - არის მტყუნების საფრთხე (ქართულ ტექნიკურ ლიტერატურაში მიღებული ტერმინოლოგიის შესაბამისად).

3. ვაიბულის განაწილება:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = e^{-\lambda_0 t^k}. \quad (6)$$

აქ  $\lambda_0$  - განსაზღვრავს განაწილების მასშტაბს, ხოლო  $k$  - ასიმეტრიას.

მტყუნების სიხშირე  $f(t)$  - არის დროის ერთეულში მტყუნებული ელემენტების რაოდენობის ფარდობა ექსპლუატაციაში მყოფი ელემენტების

რაოდენობასთან, იმ პირობით, რომ მტყუნებული (დაზიანებული) ელემენტები არ რემონტდებიან და არ იცვლებიან ახლებით. მისი განსაზღვრა შესაძლებელია მიახლოებითი ფორმულით:

$$f(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{N_0 \Delta t}, \quad (7)$$

სადაც  $\Delta n(t)$  - არის იმ მტყუნებული ელემენტების რაოდენობა, რომლებიც დაზიანდნენ დროის  $\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \div \left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$  ინტერვალში;  $N_0$  - ექსპლუატაციაში მყოფი ელემენტების საწყისი რაოდენობა;  $\Delta t$  - დროის ინტერვალი.

მტყუნების საფრთხე  $\lambda(t)$  არის დროის ერთეულში მტყუნებული ელემენტების რაოდენობის ფარდობა შეფარდებული დაუზიანებელი ელემენტების (რომლებიც აგრძელებენ გამართულად მუშაობას) საშუალო რაოდენობასთან. მისი მიახლოებითი ფორმულაა:

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{N(t) \Delta t}. \quad (8)$$

აქ  $\Delta n(t)$  - არის იმ მტყუნებული ნაკეთობების რაოდენობა, რომლებიც დაზიანდნენ დროის  $\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \div \left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$  ინტერვალში;  $\Delta t$  - დროის ინტერვალი;  $N(t) = \frac{N_{i-1} + N_i}{2}$ , სადაც  $N_{i-1}$  და  $N_i$  არის შესაბამისად დაუზიანებელი ნაკეთობების რაოდენობა  $\Delta t_i$  ინტერვალის დასაწყისში და ბოლოში. ყველა დაზიანებული ნაკეთობა რომელიც დაზიანდა არ რემონტდება.

ექსპლუატაციის დასაწყისში (მისახმარისი პერიოდი: 2-3 წელი), მტყუნების საფრთხე თანდათან მცირდება – ქარხნული, ტრანსპორტირების, მონტაჟის და ა.შ. დეფექტების გამოსწორების შედეგად. მეორე პერიოდი (ნორმალური ექსპლუატაციის პერიოდი: 30-40 წელი) ხასიათდება პრაქტიკულად უცვლელი მტყუნების საფრთხით – ადგილი აქვს შემთხვევით მტყუნებებს, ვინაიდან ამ პერიოდში სრულდება გეგმიური

რემონტები და დაზიანებული ელემენტების ახლით შეცვლა. ექსპლუატაციის მესამე, ბოლო პერიოდში - მტყუნების საფრთხე იზრდება. აქ თავს იჩენს ცვეთით და დაღლილობით გამოწვეული მტყუნებები.

საშუალო ნამუშევარი მტყუნებაზე – არის ელემენტების უმტყუნოდ მუშაობის საშუალო არითმეტიკული დრო, მეზობელ მტყუნებებს შორის:

$$T = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (9)$$

სადაც  $t_1$  - არის უმტყუნოდ მუშაობის დრო პირველ მტყუნებამდე;  $t_2$  - მუშაობის დრო პირველ და მეორე მტყუნებას შორის;  $t_n$  - მუშაობის დრო  $n-1$  და  $n$  მტყუნებას შორის;  $t_i$  - უმტყუნოდ მუშაობის დრო  $i$  მტყუნებამდე.

უმტყუნოდ მუშაობის საშუალო დრო არის ერთტიპიური ელემენტების უმტყუნოდ მუშაობის საშუალო მნიშვნელობა:

$$\bar{t} \approx \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (10)$$

სადაც  $t_i$  არის  $i$ -ური ნაკეთობის უმტყუნოდ მუშაობის დრო ექსპლუატაციის დროს.

უმტყუნოდ მუშაობის საშუალო დრო ფაქტიურად წარმოადგენს დროს ერთტიპიური პარტიის ნაკეთობების პირველ მტყუნებამდე. მისი ზუსტი ფორმულაა:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (11)$$

ექსპონენციალური განაწილებისათვის, ფორმულა (11) იღებს შემდეგ სახეს:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}. \quad (12)$$

ვაიბულის განაწილებისათვის

$$\bar{\mathbf{T}} = \int_0^{\infty} \mathbf{e}^{-\lambda_0 t^k} dt = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)}{\lambda_0^{1/k}}. \quad (13)$$

მზადყოფნის კოეფიციენტი არის უმტყუნოდ მუშაობის ჯამური დროის ფარდობა (საშუალო ნამუშევრი), უმტყუნოდ მუშაობის ჯამურ დროსა რემონტის ჯამური დროის ჯამთან.

$$\mathbf{K}_\Gamma = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{T} + \mathbf{T}_{\text{REM}}}. \quad (14)$$

აქ  $\mathbf{T}$  - არის აგრეგატის უმტყუნოდ მუშაობის ჯამური დრო, ხოლო  $\mathbf{T}_{\text{REM}}$  - აგრეგატის რემონტის ჯამური დრო.

ბ) ენერგობიექტისათვის

$$\mathbf{K}_\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} \mathbf{T}}{\sum_{i=1}^{N_0} (\mathbf{T} + \mathbf{T}_{\text{REM}})}, \quad (15)$$

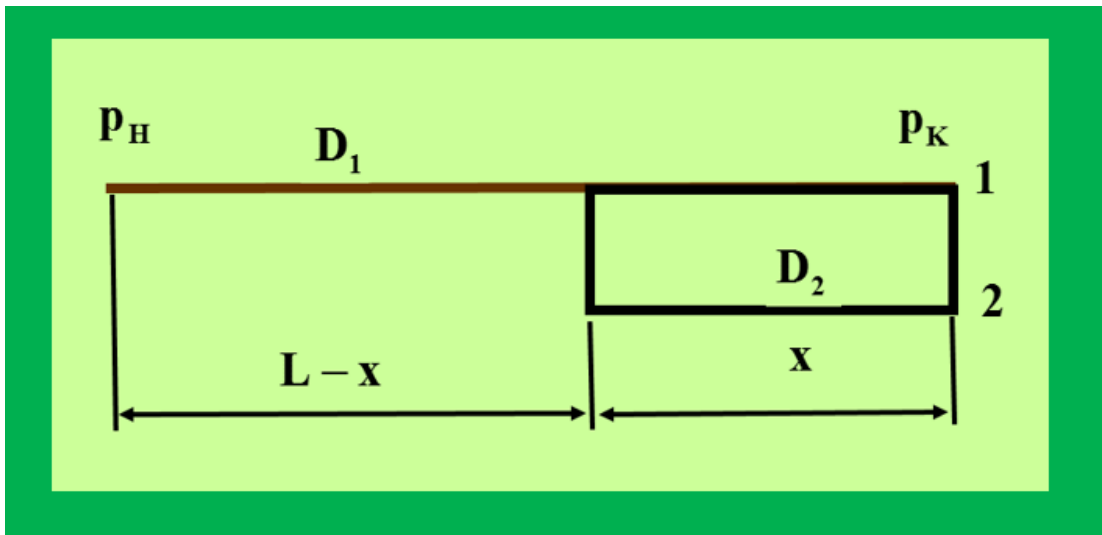
სადაც  $N_0$  - არის აგრეგატების რაოდენობა.



## თავი 2. გაზგამანწილებელი ქსელის გაზსადენის გამტარუნარიანობის გაანგარიშება ლუპინგის საშუალებით

### 2.1. საშუალო წნევის გაზსადენები ლუპინგით. ზღუდარების ეფექტურობა

ლუპინგს ეწოდება დამატებითი მილსადენი, რომელიც გატარებულია ძირითადი მაგისტრალის პარალელურად და მიერთებულია მასთან ორ კვეთში: საწყისი და ბოლო. ლუპინგის დანიშნულებაა: გამტარუნარიანობის გაზრდა, ან წნევის გაზრდა გაზსადენის ბოლო (ან საწყის) წერტილში. ლუპინგებს ატარებენ როგორც სარეზერვო ხაზებს. გაანგარიშების მიზანია დადგინდეს ლუპინგის ისეთი სიგრძე, რომელიც უზრუნველყოფს საჭირო ეფექტს. გაზსადენები ლუპინგით წარმოადგენს რთული გაზსადენების უმარტივეს სახეს. გაზსადენების ლუპინგით გაანგარიშებისას, გამოიყენება ხარჯის კოეფიციენტები (ნახ. 19) [15-18].



ნახ. 10. ლუპინგის საანგარიშო სქემა

უბნები  $L-x$  და  $x$  შეერთებული არის პარალელურად. ამიტომ, შესაბამისად გვექნება:

$$\frac{L}{k_Q^2} = \frac{L-x}{k_{Q1}^2} + \frac{x}{k_{Q2}^2}. \quad (16)$$

სადაც  $k_Q$  არის გაზსადენის სრული გაზსადენის ხარჯის კოეფიციენტი; ხარჯის კოეფიციენტი  $k_{Q1}$  - ცნობილია; ხარჯის კოეფიციენტი  $k_{Q2}$  - დასადგენია.

რადგანაც მილსადენები 1 და 2 შეერთებულია პარალელურად, ამიტომ  $k_{Q12} = k_{Q1} + k_{Q2}$  (რადგანაც კოეფიციენტი  $k_{Q1}$  და კოეფიციენტი  $k_{Q2}$  - ასევე ცნობილია). ამიტომ:

$$\frac{L}{k_Q^2} = \frac{L-x}{k_{Q1}^2} + \frac{x}{(k_{Q1} + k_{Q2})^2}. \quad (17)$$

აქედან:

$$k_Q = \frac{k_{Q1}}{\sqrt{1 - \frac{x}{L} \left[ 1 - \left( \frac{k_{Q1}}{k_{Q1} + k_{Q2}} \right)^2 \right]}}. \quad (18)$$

ახლა შევადაროთ ლუპინგიანი გაზსადენის გამტარუნარიანობა ( $Q$ )-სთან, გაზსადენის გამტარუნარიანობას ლუპინგის გარეშე ( $Q_1$ ). იმ პირობებში, რომ წნევები  $p_H$  და  $p_K$  ლუპინგის გატარების შემდეგ იგივეა, ამიტომ ცხადია, რომ გამტარუნარიანობის კოეფიციენტი იზრდება:  $\chi = \frac{Q}{Q_1} = \frac{k_Q}{k_{Q1}}$ .

ამის გათვალისწინებით, მივიღებთ [44-48]:

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x}{L} \left[ 1 - \left( \frac{k_{Q1}}{k_{Q1} + k_{Q2}} \right)^2 \right]}}. \quad (19)$$

ამგვარად, გამტარუნარიანობის გაზრდისას ლუპინგის სიგრძე იზრდება  $\chi$ -ჯერ.

$$x = L \frac{1 - \frac{1}{\chi^2}}{1 - \left( \frac{k_{Q1}}{k_{Q1} + k_{Q2}} \right)^2}. \quad (20)$$

გაზსადენის გამტარუნარიანობის გაზრდის მეორე ხერხია - საკომპრესორო სადგურების გაორმაგება. ჩავთვალოთ, რომ ეს არის

სადგურების შორის მანძილების ორჯერ შემცირება. ამიტომ: სადგურების რაოდენობის გაორმაგებისას

$$Q_* = AD_0^{2,6} \sqrt{\frac{(p_H^2 - p_K^2)}{L}} k_Q. \quad (21)$$

ხოლო გაორმაგების შემდეგ ტოლია

$$Q_* = AD_0^{2,6} \sqrt{\frac{(p_H^2 - p_K^2)}{\frac{L}{2}}} k_Q \quad (22)$$

და

$$\chi = \frac{Q_*}{Q} = \sqrt{2}. \quad (23)$$

## 2.2. საშუალო წნევის გაზსადენების ზღუდარების ეფექტურობა

ზღუდარს ეწოდება მილსადენს, რომელიც აერთებს ორ პარალელურ გაზსადენს. ზღუდარები გამოიყენება გამტარუნარიანობის რეგულირებისათვის და მრავალხაზიანი გაზსადენების საიმედოობის გაზრდისათვის.

ზღუდარიანი გაზსადენის გამტარუნარიანობის ფარდობა, გამტარიანობასთან ზღუდარის გამორთვისას, ეწოდება ზღუდარის ეფექტურობა. ზღუდარები ეფექტურია არა მხოლოდ ლუპინგების შემაერთებელ წერტილებში, არამედ იმ წერტილებში სადაც იცვლება მილსადენების დიამეტრები. ამ წერტილებში წნევის კვადრატის წირის დახრის კუთხე იცვლება და ასეთი სხვა ხაზების შეერთება, გამოიწვევს ხარჯების გადანაწილებას და შესაბამისად გამტარუნარიანობის გაზრდას [49-51].

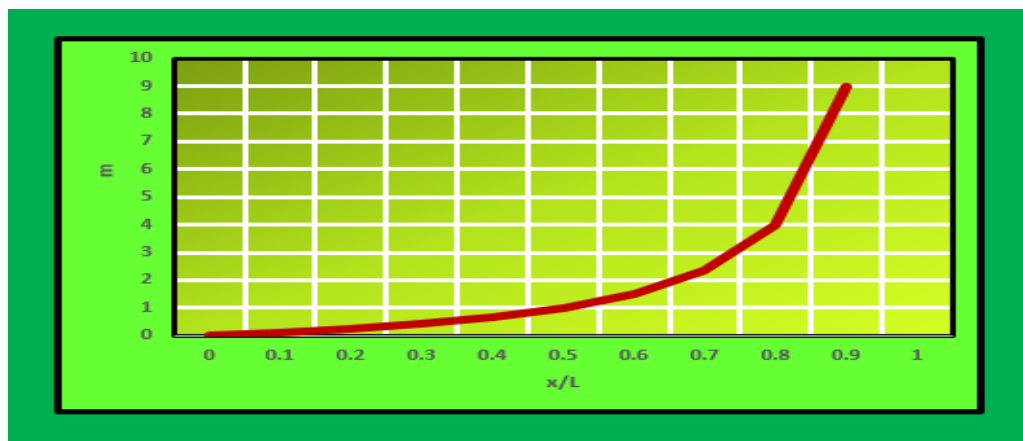
ცხადია, რომ ხაზების რაოდენობის გაზრდისას, ზღუდარის ეფექტურობა მცირდება. ასევე ცხადია, რომ უბნების დიამეტრების განსხვავების შემცირებისათვის, ზღუდარის ეფექტურობა მცირდება. თუ პარალელური ხაზების დიამეტრები სიგრძის მიხედვით არ იცვლება და არ

გვაქვს ლუპინგი, მაშინ ზღუდარის გამტარუნარიანობის გაზრდა - არასასრებლოა (ამ დროს წნევის კვადრატების დაცემის წირი იქნება ერთნაირი, ყველა პარალელური ხაზებისათვის). თუმცა ეს არ ნიშნავს, რომ ასეთი გაზსადენებისათვის, ზღუდარი - საჭირო არ არის. ზღუდარები გვაძლევს ავარიული, ან გეგმიურ-სარემონტო გაზსადენების გამტარუნარიანობის შემცირების საშუალებას. ასეთი სამუშაოები ხდება არა მხოლოდ დაზიანებულ ხაზზე, არამედ მისი შედარებით მცირე ნაწილისათვის. სარემონტო უბნის გამორთვისას, იკეტება ონკანები და ამ დროს გაზსადენის გამტარუნარიანობა მცირდება. ცხადია, რომ რაც უფრო მოკლეა სარემონტო უბნის სიგრძე, და შესაბამისად რაც უფრო მეტია ზღუდარების რაოდენობა, მით ნაკლებია გამტარუნარიანობის შემცირება.

განვსაზღვროთ ზღუდარების რაოდენობა, რომლის დროს გამტარუნარიანობა მცირდება მოცემულ ზღვრამდე. აღვნიშნოთ სარემონტო უბნის სიგრძეს  $L - x$ , მაშინ მივიღებთ ზღუდარების რაოდენობა ტოლია (ნახ. 11):

$$m = \frac{L}{L-x} - 1 = \frac{\frac{x}{L}}{1 - \frac{x}{L}} \quad (24)$$

დღეისათვის, საქართველოში სულ უფრო იზრდება და ვითარდება გაზგამანწილებელი გაზსადენების ქსელები.



ნახ. 11.  $m$  -ის  $x/L$  -ზე დამოკიდებულების გრაფიკი

საშუალო წნევის გაზგამანწილებელი ქსელი წარმოადგენს ისეთი გაზსადენების ერთობლიობას, რომლის დანიშნულებაცაა ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტი, გაზის წყაროდან - მომხმარებლამდე. მისი მახასიათებლებია: სიგრძეები, წნევა, დიამეტრები და სიგრძის გასწვრივ განლაგებული გაზმარეგულირებელი პუნქტები.

იმასთან დაკავშირებით, რომ მოსახლეობისა და წარმოების გაზის მოთხოვნა სულ უფრო იზრდება, შესაბამისად იზრდება გადაქაჩვის მოცულობები. ამიტომ აუცილებელია გაზგამანწილებელი ქსელის გაზსადენების ისეთი მახასიათებლის გაზრდა, როგორცაა გამტარუნარიანობა. რადგანაც გვაქვს არსებული, უკვე აგებული გაზსადენები, ასევე ქსელის აგებისა და ჩალაგების პროცესში მყოფი. ამიტომ ნაშრომის თემა და მიზანი - მეტად აქტუალურია.

განვიხილოთ გამტარუნარიანობის შემცირების გავლენის ფაქტორები, კერძოდ აუცილებელია მაგისტრალური მილსადენების ექსპლუატაციისას აღნიშნული ფაქტორების გათვალისწინება. მათ შორის შედის მექანიკური მინარევები. არსებობს გაზის ნაკადში შექმნილი ძირითადი ოთხი ტიპის წყარო: გაზის ბუდობიდან ქანის ნაწილაკები, რომლებიც გამოდის გაზის ნაკადებით ჭაბურღილიდან; სამშენებლო შლამი, რომელიც რჩება მშენებლობის შემდეგ (ადგილობრივი გაზსადენები და გაზგამანწილებელი ქსელები): მილსადენის შიგა კოროზიისა და ეროზიის პროდუქტები; გაზის კონდენსირების სითხეები, ტემპერატურისა და წნევის ცვლილებისას.

გაზის ნაკადებში არსებული მექანიკური მინარევები არსებითად ავლენს გაზის შემკრები ქსელების, კოლექტორების, გაზგამანწილებელი გაზსადენების, აღრიცხვის გაზომვის და გაზის წნევის რეგულირების კვანძებს, ხელსაწყოების კონტროლის და ტექნოლოგიური მოწყობილობის ექსპლუატაციისას. მექანიკური მინარევების სრული და მჟავე კომპონენტების ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) გაწმენდის შემდეგ, ხდება ტენიანობის წვეთების მილის კოროზია, რაც იწვევს გაზსადენის გამტარუნარიანობის

მნიშვნელოვან შემცირებას. ამ მოვლენის ძირითადი ეფექტია გაზის წნევის დანაკარგების გაზრდა და შესაბამისად წინააღმდეგობის სიგრძეზე ჰიდრავლიკური კოეფიციენტის გაზრდა.

ბუნებრივი გაზი გაჯერებულია წყლის ორთქლით. იგი დამოკიდებულია წნევაზე, ტემპერატურაზე და გაზის შემადგენლობაზე. რაც მეტია გაზის ტემპერატურა, მით მეტია წყლის რაოდენობა გაზში, ხოლო წნევის გაზრდისას - ეს რაოდენობა მცირდება. რაც მეტია გაზის მოლური მასა, მით მეტია წყლის ორთქლის რაოდენობა, მოცულობის ერთეულში. გაზში არსებული აზოტი, იწვევს წყლის ორთქლის რაოდენობის შემცირებას, ხოლო მძიმე ნახშირწყლების, ნახშირმჟავების და გოგირდწყალბადების არსებობა, იწვევს მის ზრდას.

სითხის მინარევები (წვეთოვანი წყალი, წყალი ორთქლის სახით, კონდენსატი, ნაწილაკები და ა.შ.) აძნელებს გაზის ტრანსპორტირებას. წყლის არსებობა ბუნებრივ გაზში იწვევს სხვადასხვა გართულებებს: მოწყობილობის კოროზიის ზრდას, ჰიდრანტების წარმოქმნას ან მისი დაცობა.

გოგირდწყალბადები და ნახშირმჟავები. გოგირდწყალბადი ( $H_2S$ ) წარმოადგენს ბუნებრივი გაზის მინარევს მახასიათებელი სუნით, ნორმალურ პირობებში მისი სიმკვრევეა  $1,521 \text{ კგ/მ}^3$ . იგი იწვევს, კარგად იხსნება წყალში. გოგირდწყალბადები და გოგირდის ნაერთები იწვევს ფოლადის მილების, რეზერვუარების, მილსადენის მოწყობილობას, კომპრესორების და ა.შ. კოროზიას. გაზში გოგირდწყალბადების არსობობა აჩქარებს ჰიდრატების წარმოქმნას. საყოფაცხოვრებო გაზისათვის, მასში გოგირდწყალბადების რაოდენობა არ უნდა აღემატებოდეს  $0,02 \text{ გ/მ}^3$ ,  $0^\circ C$  ტემპერატურაზე და  $760 \text{ მმ. ვერცხ. სვეტის წნევას}$ . გაზსადენებით ტრანსპორტირებისას, ასეთი ნორმა აუცილებელია გაზის გაწმენდისას.

ნახშირმჟავა გაზი წარმოადგენს ბალასტურ მინარევს. ტექნიკურ-ეკონომიკური მოსაზრებიდან, ტრანსპორტირებულ გაზში  $CO_2$ -ის შემცველობა არ უნდა აღემატებოდეს  $2\%$ -ს.

მაგისტრალური გაზსადენების სახაზო ნაწილის არასწორი ექსპლუატაცია, რომლის დროსაც გვაქვს არინება და შეჭირხვნები (შესაძლოა წნევის და ტემპერატურების შემცირებისა და გაზრდისას), ეხმარება საშიში ნაწილაკების აქტიურ დალექვას.

განვიხილოთ გამტარიანობის გაზრდის მეთოდები. გაზსადენების გამტარუნარიანობა დაკავშირებულია, როგორც პროექტირებისას, ასევე ექსპლუატაციისას. გამტარუნარიანობის გაზრდა განპირობებულია გაზსადენების შეყვანის სტადიები. ზოგადად, სისტემის გამტარუნარიანობის გაზრდისას, შესაძლოა შეიცვალოს უბნის საწყისი და ბოლო წნევა. ეს დამოკიდებულია სისტემის მოქმედი ნაწილის დატვირთვაზე, მახასიათებლებზე, ძირითად მოწყობილობაზე და შესაძლოა ახალი საკომპრესორო სადგურების ამუშავებაზე. გაზსადენის გამტარუნარიანობის გაზრდა შესაძლოა შემდეგი ძირითადი ხერხებით: ლუპინგების გატარება, ჩანართების ჩალაგება, საკომპრესორო და გაზმარეგულირებელი პუნქტების რაოდენობების გაორმაგება და ა.შ. ცხადია რომ, თვითოეული კონკრეტული გაზსადენის უბნის შემთხვევა დამოკიდებულია ტექნიკურ-ეკონომიკურ დასაბუთებაზე.

განვიხილოთ გაზმარეგულირებელი პუნქტების რაოდენობების გაორმაგება. სისტემის გამტარუნარიანობის გაზრდა შესაძლოა მოხდეს გაზმარეგულირებელი პუნქტების და მეზობელი გადასასვლელების რეჟიმების კოორდინირება.

გამომდინარე ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშებისას, როგორც წესი, მიზანშეწონილია გაზმარეგულირებელი პუნქტების გაორმაგება. გამორიცხულია მხოლოდ ჩართვის პერიოდის, რომელიც იყოფა რამდენიმე ეტაპად. აგრეთვე, ერთდროულად შესაძლებელია რამდენიმე პარალელური ხაზების აგება.

გამომდინარე გაზმარეგულირებელი პუნქტების არსებული მოწყობილობის ჯერადობიდან, გაზსადენის განვითარების სხვადასხვა ეტაპებზე მიიღება მხოლოდ ჯერადობის (ჯერადობის კოეფიციენტი

$n_{KS} = 2,3,4,5,\dots$ ) ტოლი რიცხვი. გადასასვლელებზე დამატებითი საკომპრესორო სადგურების აგებისას, გადასასვლელის საანგარიშო სიგრძე მცირდება  $n_{KS}$ -ჯერ, რის გამოც იზრდება გადასასვლელის გამტარუნარიანობა.

$$Q = K \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{L} \sum_{i=1}^n \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i}}} \cdot n_{KS} \quad (25)$$

სადაც  $D_i$  და  $\lambda_i$  შესაბამისად არის უბნის დიამეტრი და წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;  $L$  - გაზსადენის სრული სიგრძე;  $P_H$  და  $P_K$  - შესაბამისად სრული უბნის საწყისი და ბოლო წნევები;  $n_{KS}$  - გაზმარეგულირებელი სადგურების ან პუნქტების რაოდენობა.

ამ დროს გვაქვს, სისტემის გამტარუნარიანობის გაზრდა, შესაძლო ხარისხის კოეფიციენტით [15-16]:

$$\chi_{KS} = \sqrt{n_{KS} P} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_{oi}}}} \quad (26)$$

$$\bar{P} = \frac{P_H^2 - P_K^2}{P_{H0}^2 - P_{K0}^2} \quad (27)$$

გაზის მოძრაობის კვადრატული კანონისათვის და ერთნაირი დიამეტრებისათვის, მიღებული ხარისხის კოეფიციენტი ტოლია:

$$\chi_{KS} = \sqrt{n_{KS} P} \quad (28)$$

განვიხილოთ ლუპინგის გატარება. არსებული ნორმების შესაბამისად, განიხილება პროექტირებული გაზგამანაწილებელი გაზსადენი ერთი ხაზით და შემდგომი მეორე ხაზის (ლუპინგის)განვითარების აგება, რაც დასაშვებია მხოლოდ შემდეგ შემთხვევაში:



1. როდესაც მოცემული გამტარუნარიანობა ვერ უზრუნველყოფს დიდი დიამეტრის მილების არარსებობა, მაგრამ წარმოებისათვის საჭიროა გამტარუნარიანობის გაზრდა;

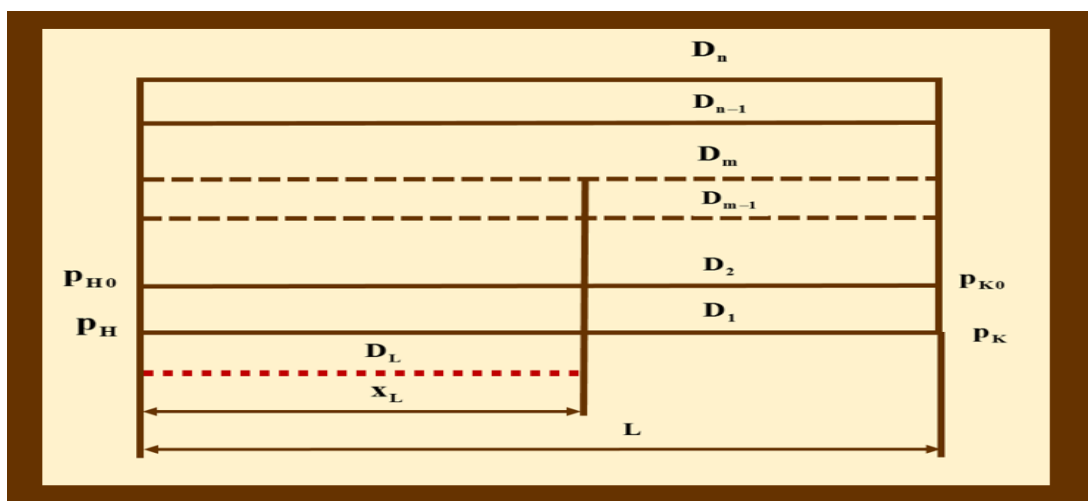
2. როდესაც გაზსადენების გამტარუნარიანობის გაზრდა ხდება ზღვრულ მომენტში და ვადები მეტია მხოლოდ 8 წლის ექსპლუატაციისას.

ამჟამად ექსპლუატაციაში არსებობს დიდი რაოდენობის მქონე მრავალხაზიანი გაზსადენი. თვითეული შემდგომი ხაზი ერთვება მოქმედ სისტემასთან მზადყოფნის გამო. ამგვარად, თვითეული მშენებარი ხაზის ნაწილი - ქმნის ლუპინგს. ლუპინგის საშუალებით გამტარუნარიანობის გაზრდის საანგარიშო სქემა ნაჩვენებია ნახ. 12-ზე.

ვთქვათ სისტემა შეიცავს ერთობლივად მომუშავე  $n$  პარალელურ გაზსადენს. სისტემის საწყისი გამტარუნარიანობა  $Q_0$  - ტოლია [29]:

$$Q_0 = K \sqrt{\frac{P_{H0}^2 - P_{K0}^2}{L} \sum_{i=1}^n \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_{0i}}}} \quad (29)$$

ინდექსი "0" გვიჩვენებს პარამეტრებს გაზრდილ საწყის გამტარუნარიანობაზე. თუ სისტემის "m" ხაზებს ( $m \leq n$ ), მიუერთოთ  $D_L$  დიამეტრის და  $x_L$  სიგრძის ლუპინგს, მაშინ გამტარუნარიანობა გაიზრდება  $Q$ -მდე ( $Q > Q_0$ ):



ნახ. 12. ლუპინგის საშუალებით გამტარუნარიანობის გაზრდის საანგარიშო სქემა

$$Q_0 = K \frac{\sqrt{P_H^2 - P_K^2}}{L} \frac{1}{\sqrt{\frac{x_L}{L} \left[ \frac{1}{\lambda_L} + \sum_{i=1}^m \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i^*}} \right]^2 + \left(1 - \frac{x_L}{L}\right) \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i}}} \right]^2 + \sum_{i=m+1}^m \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i}}}}, \quad (30)$$

სადაც  $\lambda_L$  არის ლუპინგის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;  $\lambda_i^*$  და  $\lambda_i$  - შესაბამისად სისტემის  $i$ -ური ხაზის წინააღმდეგობის კოეფიციენტები ლუპინგურ და არალუპინგურ უბნებზე. აღვნიშნოთ გამტარუნარიანობის გაზრდის ხარისხი  $\chi = Q/Q_0$ , გვექნება;

$$\frac{x_L}{L} \left\{ 1 - \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^m \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i}}}{\frac{D_L^{2,5}}{\sqrt{\lambda_L}} + \sum_{i=1}^m \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i^*}}} \right]^2} \right\} = 1 - \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^m \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i}}}{\frac{\chi}{\sqrt{p}} \sum_{i=1}^m \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_{0i}}} - \sum_{i=m+1}^n \frac{D_i^{2,5}}{\sqrt{\lambda_i}}} \right]^2}. \quad (31)$$

სადაც

$$\frac{1}{p} = \frac{P_H^2 - P_K^2}{P_{H0}^2 - P_{K0}^2}. \quad (32)$$

როგორც წესი, გაზსადენები მუშაობს კვადრატულ ზონაში, ამიტომ ერთნაირი ხორკლიანობის დროს  $\lambda_i = \lambda_i^* = \lambda_L$  და გვექნება:

$$\frac{x_L}{L} \left\{ 1 - \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^m D_i^{2,5}}{D_L^{2,5} + \sum_{i=1}^m D_i^{2,5}} \right]^2} \right\} = 1 - \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^m D_i^{2,5}}{\frac{\chi}{\sqrt{p}} \sum_{i=1}^m D_i^{2,5} - \sum_{i=m+1}^n D_i^{2,5}} \right]^2}. \quad (33)$$

(31) და (33) დამოკიდებულების მიხედვით, მოცემული გამტარუნარიანობის გაზრდის ხარისხის კოეფიციენტისათვის, შეიძლება განვსაზღვროთ ლუპინგის სიგრძე, ან პირიქით -  $x_L$  სიგრძის ლუპინგის ჩართვა გამტარუნარიანობის გაზრდის განსაზღვრისას.

თუ ჩავთვლით, რომ ყველა გაზსადენების დიამეტრი ერთი და იგივეა (ე.ი. გვაქვს ერთი და იგივე წინააღმდეგობის კოეფიციენტები), ამიტომ (31) და (33) ფორმულები მარტივდება:

$$\frac{x_L}{L} \left\{ 1 - \left[ \frac{m}{m+1} \right]^2 \right\} = 1 - \left[ \frac{m}{\frac{\chi}{\sqrt{p}} m - (m-n)} \right]^2. \quad (34)$$

$$\frac{x_L}{L} \frac{2m+1}{(m+1)^2} = 1 - \frac{1}{\left[ \left( \frac{\chi}{\sqrt{p}} - 1 \right) \frac{n}{m} + 1 \right]^2}. \quad (35)$$

$$\frac{x_L}{L} = \frac{(m+1)^2}{2m+1} \left[ 1 - \frac{1}{\left[ \left( \frac{\chi}{\sqrt{p}} - 1 \right) \frac{n}{m} + 1 \right]^2} \right] \dots \quad (36)$$

შესაძლო ზღვრული გამტარიანობის გაზრდა განისაზღვრება, პირობით რომ  $\frac{x_L}{L} = 1$ .

$$\chi_{Lim} = \sqrt{p} \frac{1 + \sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda_i^*}} \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5} + \sum_{i=m+1}^n \sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda_i}} \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda_{0i}}} \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5}}. \quad (37)$$

კვადრატული ზონისათვის გვაქვს;

$$\chi_{Lim} = \sqrt{p} \frac{1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5}}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5}}. \quad (38)$$

ხოლო, თუ ყველა დიამეტრი ერთნაირია, მაშინ:

$$\chi_{Lim} = \frac{n+1}{n} \sqrt{p}. \quad (39)$$

გაზსადენების სისტემის ხაზების რაოდენობის გაზრდისას, ლუბინგის ეფექტურობა იზრდება. მაგალითად, თუ ერთხაზიანი გაზსადენისათვის  $\chi_G = 2\sqrt{p}$ ; თუ  $n = 2$ , მაშინ  $\chi_G = 1,5\sqrt{p}$ ; ხოლო თუ  $n = 5$ , მაშინ  $\chi_G = 1,2\sqrt{p}$ .

ნებისმიერი  $n$  ლუპინგისათვის, რომელიც ჩართულია ყველა ხაზთან, უფრო ეფექტურია შედარებით, თუ გვაქვს ერთი ხაზის ჩართვა (ამ დროს გამტარუნარიანობის გაზრდის მოცემული ხარისხისათვის, გვექნება უმოკლესი ლუპინგი). ლუპინგის სიგრძე, რომელიც ჩართულია სისტემის ყველა ხაზთან, განისაზღვრება (როდესაც  $m = n$ ):

$$\frac{x_L}{L} = \frac{(n+1)^2}{2n+1} \left(1 - \frac{\bar{p}}{x^2}\right). \quad (40)$$

აქედან ცხადია, რომ:

$$\frac{\frac{x_L}{L}}{\left(1 - \frac{\bar{p}}{x^2}\right)} = \frac{(n+1)^2}{2n+1} = f(n). \quad (41)$$

$$\frac{x_L}{L} = \frac{(n+1)^2}{2n+1} \left(1 - \frac{\bar{p}}{x^2}\right) = f(n) \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{x}{\sqrt{\bar{p}}}\right)^2}\right]. \quad (42)$$

$$f\left(\frac{x}{\sqrt{\bar{p}}}\right) = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{x}{\sqrt{\bar{p}}}\right)^2}\right]. \quad (43)$$

ცხრილებში 6-9, მოყვანილია შესაბამისი პარამეტრების გაანგარიშება

ცხრილი 6.  $f(n) = \frac{(n+1)^2}{2n+1}$  ფუნქციის მნიშვნელობები

n	f(n)
1	2
2	2.25
3	2.66667
4	3.125
5	3.6
6	4.08333
7	4.57143
8	5.0625
9	5.55556
10	6.05

ცხრილი 7.  $f\left(\frac{x}{\sqrt{p}}\right) = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{x}{p}\right)^2}\right]$  ფუნქციის მნიშვნელობები

$\frac{x}{\sqrt{p}}$	$\left[1 - \frac{1}{\left(\frac{x}{p}\right)^2}\right]$
1	0
1.1	0.17355
1.2	0.30556
1.3	0.40828
1.4	0.4898
1.5	0.55556
1.6	0.60938
1.7	0.65398
1.8	0.69136
1.9	0.72299
2	0.75

ცხრილი 8.  $\frac{x_L}{L} = f(n) \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{\chi}{p}\right)^2} \right]$  ფუნქციის მნიშვნელობები [83]

	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
1	0	0	0	0	0
1.1	0.34711	0.3905	0.46339	0.54236	0.62479
1.2	0.61111	0.6875	0.81583	0.95486	1.1
1.3	0.81657	0.91864	1.09012	1.27589	1.46982
1.4	0.97959	1.10204	1.30776	1.53061	1.76327
1.5	1.11111	1.25	1.48333	1.73611	2
1.6	1.21875	1.37109	1.62703	1.9043	2.19375
1.7	1.30796	1.47145	1.74612	2.04369	2.35433
1.8	1.38272	1.55556	1.84593	2.16049	2.48889
1.9	1.44598	1.62673	1.93039	2.25935	2.60277
2	1.5	1.6875	2.0025	2.34375	2.7

ცხრილი 9.  $\frac{x_L}{L} = f(n) \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{\chi}{p}\right)^2} \right]$  ფუნქციის ზღვრული მნიშვნელობები

	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
1	0	0	0	0	0
1.1	0.34711	0.3905	0.46339	0.54236	0.62479
1.2	0.61111	0.6875	0.81583	0.95486	1.1
1.3	0.81657	0.91864	1.09012	1.27589	1.46982
1.4	0.97959	1.10204	1.30776	1.53061	1.76327
1.5	1.11111	1.25	1.48333	1.73611	
1.6	1.21875	1.37109	1.62703	1.9043	
1.7	1.30796	1.47145	1.74612		
1.8	1.38272	1.55556	1.84593		
1.9	1.44598	1.62673	1.93039		
2	1.5	1.6875			

ფორმულა (37)-თვის გვექნება:

$$\frac{\chi_{Lim}}{\sqrt{p}} = \frac{1 + \sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda_i^*}} \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5} + \sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda_i}} \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5}}{\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda_{0i}}} \left( \frac{D_i}{D_L} \right)^{2,5}}. \quad (44)$$

ნახვ 13 (ა,ბ)-ზე მოყვანილია  $f(n) = \frac{(n+1)^2}{2n+1}$ ,  $f\left(\frac{\chi}{\sqrt{p}}\right) = \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{\chi}{p}\right)^2} \right]$

დამოკიდებულებების გრაფიკები, ხოლო ნახ. 23 (ა,ბ)-ზე

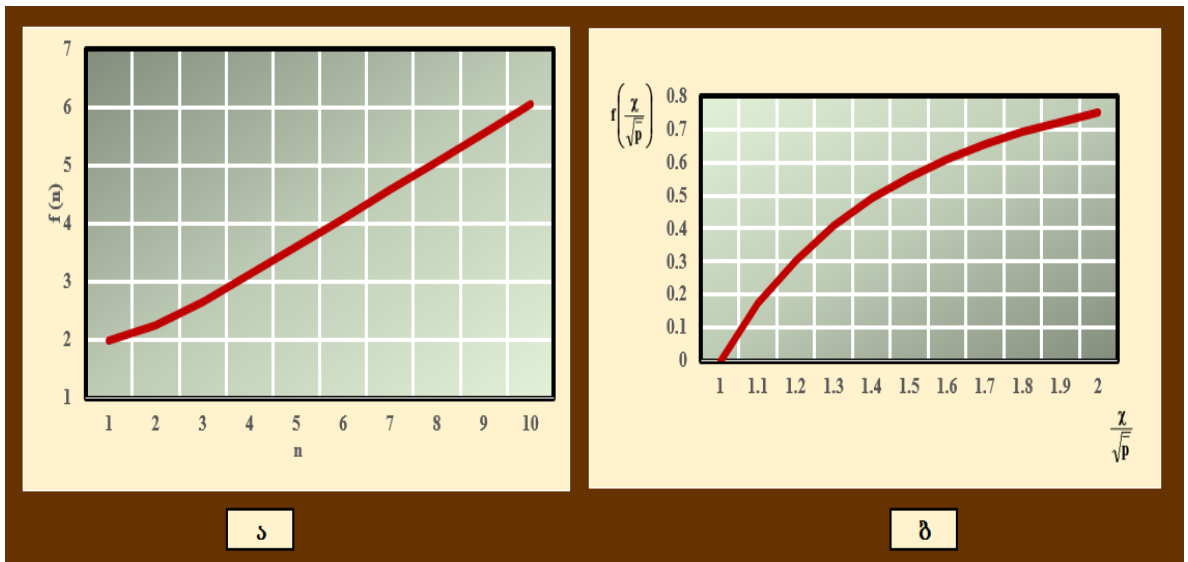
მოყვანილია  $\frac{x_L}{L} = f(n) \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{\chi}{p}\right)^2} \right]$  დამოკიდებულებების გრაფიკები და იგივე

შესაბამისი გრაფიკები ზღვრული მნიშვნელობებისათვის. ნახ. 14-ზე მოყვანილია (43) ფორმულით აგებული გრაფიკი.

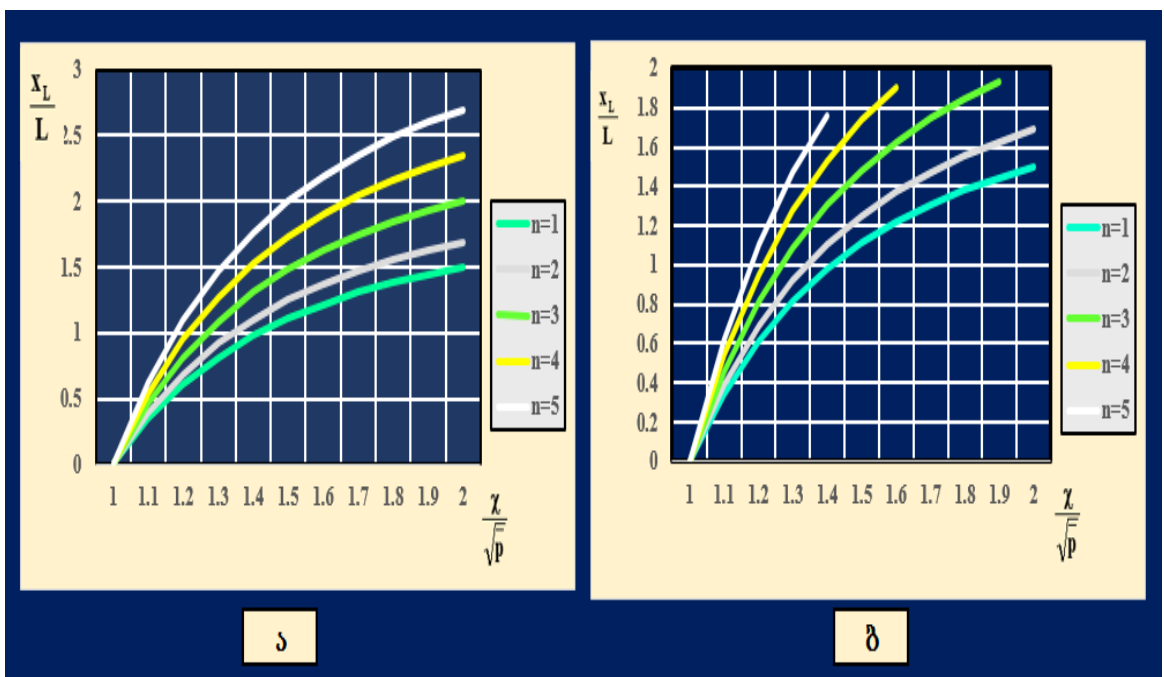
სადაც  $\lambda_L$  არის ლუპინგის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;  $\lambda_i^*$  და  $\lambda_i$  - შესაბამისად სისტემის  $i$ -ური ხაზის წინააღმდეგობის კოეფიციენტები ლუპინგურ და არა ლუპინგურ უბნებზე.[82];

$$\lambda_i = \lambda_{0i} = \lambda_i^* = \lambda$$

$$\frac{\chi_{Lim}}{\sqrt{p}} = \frac{1 + \sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}} \left( \frac{D}{D_L} \right)^{2,5} + \sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}} \left( \frac{D}{D_L} \right)^{2,5}}{\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}} \left( \frac{D}{D_L} \right)^{2,5}} = \frac{1 + 2\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}} \left( \frac{D}{D_L} \right)^{2,5}}{\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}} \left( \frac{D}{D_L} \right)^{2,5}}. \quad (45)$$

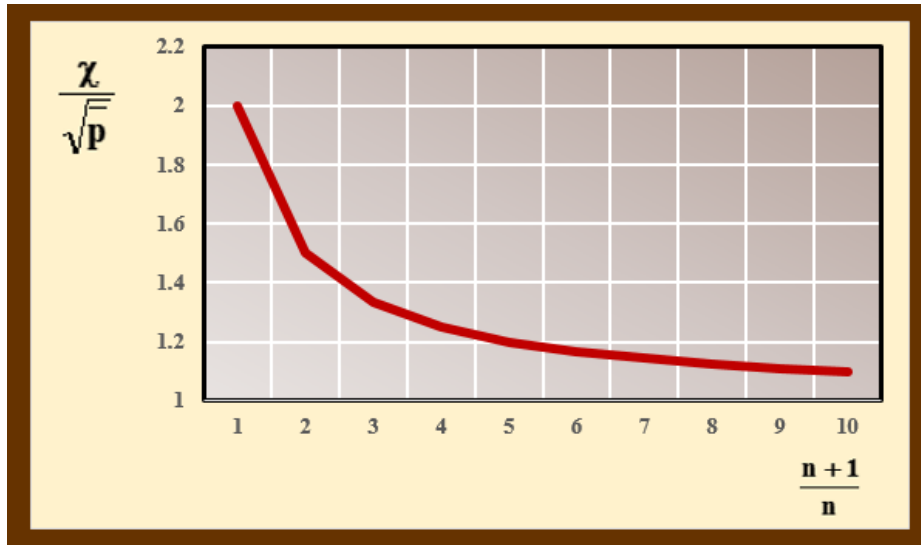


ნახ. 13. ა.  $f(n) = \frac{(n+1)^2}{2n+1}$  ფუნქციის გრაფიკი; ბ.  $f\left(\frac{x}{\sqrt{p}}\right) = \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{x}{p}\right)^2}\right]$  ფუნქციის გრაფიკი



ნახ. 14. ა.  $\frac{x_L}{L} = f(n) \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{x}{p}\right)^2}\right]$  გრაფიკები; ბ. იგივე შესაბამისი გრაფიკები ზღვრული მნიშვნელობებისათვის





ნახ. 15.  $\frac{\chi_{Lim}}{\sqrt{p}} = \frac{n+1}{n}$  დამოკიდებულების გრაფიკი

თუ  $D = D_L$ , მაშინ

$$\frac{\chi_{Lim}}{\sqrt{p}} = \frac{1 + 2\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}}}{\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}}} \quad (46)$$

ილუსტრაციისათვის ჩავატაროთ შემდეგი მაგალითი. გვექნება:

$$\lambda_{Tr} = 0,067 \left( \frac{158}{Re} + \frac{2K}{D} \right)^{0,2} \quad (47)$$

$$\lambda_{Tr} = 0,067 \left( \frac{2K}{D} \right)^{0,2} \quad (48)$$

$$\begin{cases} \lambda = 0,077 \left( \frac{K}{D} \right)^{0,2} ; \\ \lambda_L = 0,077 \left( \frac{K_L}{D_L} \right)^{0,2} . \end{cases} \quad (49)$$

$$\frac{\lambda_L}{\lambda} = \left( \frac{K_L}{K} \right)^{0,2} \quad (50)$$

$$\frac{\chi_{Lim}}{\sqrt{p}} = \frac{1 + 2\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}}}{\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}}} = \frac{1 + 2\sqrt{\left( \frac{K_L}{K} \right)^{0,2}}}{\sqrt{\left( \frac{K_L}{K} \right)^{0,2}}} \quad (51)$$

ვთქვათ

$$\begin{cases} K = 0,03; \\ K_L = 0,01. \end{cases} \quad (52)$$

მაშინ

$$\frac{\lambda_L}{\lambda} = 0,3333^{0,2} = 0,8027. \quad (53)$$

საბოლოოდ გვექნება:

$$\frac{\chi_{Lim}}{\sqrt{p}} = \frac{1 + 2\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}}}{\sqrt{\frac{\lambda_L}{\lambda}}} = \frac{1 + \sqrt{0,8027}}{\sqrt{0,8027}} = 2,044935. \quad (54)$$

### თავი 3. გაზგამანაწილებელი სისტემების საიმედოობა

გაზგამანაწილებელი სისტემების საიმედოობა, არის მათი თვისება უზრუნველყოს გაზის მიწოდება, საჭირო, მოცემული პარამეტრებით, ყველა მოხმარებლისათვის, დროის საანგარიშო პერიოდში, მომსახურებისა და რემონტის აუცილებელი ჩატარებით. გაზგამანაწილებელი სისტემების დამახასიათებელი თვისებაა მოქმედების ხანგრძლივობა, იქამდე სანამ მოხდება ახალი ენერგომატარებლის ჩანაცვლება ბუნებრივი გაზით. ამიტომ ხანგამძლეობა არ ახასიათებს სისტემის საიმედოობის თვისებებს, მხოლოდ ისეთი ელემენტების საიმედოობა, რომლებიც შედიან სისტემაში. გაზგამანაწილებელი სისტემების სხვა გამორჩეული თვისება წარმოადგენს სოციალურ ხასიათს. ისინი ახდენენ არა მხოლოდ საწარმო ობიექტების მოხმარებას, არამედ ადამიანის საარსებო პირობების უზრუნველყოფას. სისტემების სოციალური ხასიათი, კერძოდ მომხმარებლების გაზის მიწოდების მტყუნებისას იქმნება არა მხოლოდ ეკონომიკური, არამედ მორალურ ზარალი. ამ შედეგების გათვალისწინება არ გამოდის, ამიტომ მტყუნების სოციალური მნიშვნელობა უნდა იყოს ჩადებული გაზგამანაწილებელი სისტემების საიმედოობის კრიტერიუმის შეფასებისას.

გაზის მომხმარებლები რომლებიც განაწილებულია გაზგამანაწილებელი სისტემაში, არსებითად შემოსაზღვრულია გაზის ავარიული წყაროების გამოყენება. რეზერვირების ძირითადი საშუალებებია ქსელების დარგოლვა და ცალკეული უბნების დუბლირება. საიმედოობის გაზრდისას იყენებენ ორ გზას. პირველი - იმ ელემენტების საიმედოობის და ხარისხის გაზრდა, რომლებიც შედიან სისტემაში, ხოლო როდესაც ამ ელემენტების ხარისხის ზრდა ამოწურულია, მაშინ მიდის მეორე გზით - რეზერვირების გზა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს აიგოს ისეთი სისტემა, რომლის საიმედოობა მეტია ვიდრე ელემენტების საიმედოობა. დროის ნებისმიერ მომენტში სისტემის მდგომარეობა განისაზღვრება ელემენტების მდგომარეობით. თუ ელემენტები წესრიგშია, მაშინ სისტემა სრულად

წესრიგსა. მტყუნებადი ელემენტების გარკვეული ერთობლიობა განაპირობებს სრული სისტემის მტყუნებას.

რთული ტექნიკური სისტემა ახასიათებს იმას, რომ აღნიშნული ზღვრული მდგომარეობები არ შეიძლება იყოს შუალედურ მდგომარეობებში ნაწილობრივი მუშაუნარიანობით. სისტემის გადასვლა ერთი მდგომარეობიდან მეორეში დაკავშირებულია ელემენტის მტყუნებასთან, ან აღდგენასთან. ასეთი პროცესი აღიწერება სისტემის შემთხვევითი მდგომარეობის ვექტორით. სისტემის თვითეული მდგომარეობა შეფასდება ხარისხის ფუნქციონირების მახასიათებელს, რომელიც განპირობებულია სისტემის ტექნოლოგიური ამოცანებით. გაზომარაგების გაზგამანაწილებელი სისტემების ძირითადი ამოცანაა - უზრუნველყოს მომხმარებლის მოწოდება გაზის საანგარიშო ხარჯით. მას იღებენ ხარისხის ფუნქციონირების მახასიათებელს. სისტემის თვითეულ მდგომარეობას შეესაბამება გაზის საანგარიშო ხარჯის წილი, რომელსაც შეუძლია მიაწოდოს ქსელის გამორთული მომხმარებლებითვის. ეს გაზის ხარჯი გვაძლევს სისტემის ამოცანის შესრულების ხარისხის რიცხვით შეფასებას.

ელემენტების საიმედოობა ახასიათებს მტყუნების ნაკადის პარამეტრს. როდესაც ხდება ელემენტის მტყუნება, მას არემონტებენ (ცვლიან) და კვლავ გრძელდება მუშაობა. დროში ელემენტების მტყუნების მიმდევრობა შეადგენს მტყუნების ნაკადს. გაზგამანაწილებელი გაზსადენების დაზიანების ძირითადი სახეები წარმოადგენენ მექანიკურს, კოროზიულს, და შედუღების ნაკერების რღვევას. გაანგარიშებისას გათვალისწინებულია მხოლოდ ის დაზიანებები რაც იწვევს უბნის დაუყონებლივ გამორთვას, ე.ი. გვაქვს შემთხვევითი მტყუნებები. გაზის ქსელის რეზერვირება დარგოლვით ან ცალკეული უბნების დუბლირებით, ე.ი. სტრუქტურული რეზერვირება ითვალისწინებს საიმედოობის ალბათური მახასიათებელს. ელემენტის მტყუნებისას იქმნება არასაანგარიშო (ავარიული) რეჟიმი, რომლის დროს შესაძლოა, რომ ახლოს

მყოფი კვების წყაროებისას, მომხმარებლები მოხდენ გაზის გზის ბოლოში. გაზის საჭირო რაოდენობის მიწოდებისას - აუცილებელია ტრანსპორტული რეზერვი, რომელიც გამოისახება გაზსადენების მოცემული საანგარიშო დიამეტრების მიხედვით გაზრდა. მას საზღვრავენ გაანგარიშებული ნაკადების განაწილებით გაზის ქსელში, არასარფიანი მტყუნებების სიტუაციებში (მაგალითად რგოლური ქსელის სათავო უბნის მტყუნებისას).

მომხმარებლების გაზის მიწოდების შემცირება ქსელში წნევის ნორმალური რეჟიმის შენარჩუნებისა, აუცილებელია, რომ ქსელი იყოს მართვადი. მაღალი (საშუალო) წნევის ქსელები - მართვადია, მათთან მიერთებულია მსხვილი საკვანძო მომხმარებლები, ხოლო გაზის მიწოდების რეჟიმით მართავს სადისპეჩერო სამსახური. ამიტომ, გაზმომარაგების ლიმიტირებული გაზმომარაგება დგინდება მომხმარებლების ანალიზისათვის, რომელიც გამოდის ავარიული სიტუაციების უმცირესი ზარალისას. ცალკე მომხმარებლებისათვის, რომლებიც გამოირთვება გაზის ქსელიდან ავარიული სიტუაციის შექმნისას, გაზმომარაგების საიმედოობა ფასდება ორი მახასიათებლით. ეს მახასიათებლები აკონკრეტებს სტრუქტურას და მაღალი (საშუალო) წნევის გაზგამანაწილებელი ქსელები სტრუქტურულ რეზერვს.

გაზგამანაწილებელი ქსელებს აპროექტებენ იერარქიული დონეებით: მაღალი (საშუალო) წნევის და დაბალი ქსელები. პირველები ასრულებენ მომხმარებლებისთვის მიწოდებას რგოლური და ჩიხური განშტოებით. აუცილებელი რეზერვი, გაანგარიშდება როგორც სტრუქტურული, ასევე ტრანსპორტირებული. მეორეები საიმედოობას არ ანგარიშობენ, მაგრამ ქსელის და სტრუქტურის სქემის დიამეტრებისათვის ჩადებულია ფუნქციონირების საიმედოობის პრინციპები. დაბალი წნევის ქსელის სქემას აპროექტებენ ძირითადი გაზსადენების დარგოლვით. ქსელის კვება ხორციელდება გაზმარეგულირებელი პუნქტებისა და დანადგარებიდან, რომლებიც წნევის დაბალ დონეზე გაზსადენები ერთიანდებიან და ისინი ასრულებენ სარეზერვო კავშირების ფუნქციას.

### 3.1. საშუალო წნევის გაზსადენების დაზიანების აღდგენის ალბათური მახასიათებლების დადგენა, შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ საშუალო ქსელის გაზსადენების მაგალითზე

საშუალო ქსელის გაზსადენების დაზიანების აღდგენის ალბათური მახასიათებლების დადგენა ხდება შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ საშუალო ქსელის გაზსადენების მაგალითზე, კერძოდ რუსთავისა და მარნეულის გზატკეცილები, ლომინაძის, ჟორდანას, ღოღობერიძის, სურგულაძის ქუჩები, ზემო ფონიჭალა, ლისი ვერანდა. ალბათური მახასიათებლების დადგენის მიზნით, მოხდა შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ ნატურული მონაცემების სტატისტიკური დამუშავება. შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ ნატურული მონაცემები მოყვანილია შესაბამისი ჟურნალები, რომლის ერთ-ერთი ფრაგმენტი მოყვანილია ცხრილ 10-ში.

განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი გმპ-ს აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკა იმ შემთხვევაში, როდესაც ვიხილავთ მექანიკურ დაზიანებებს, გვაქვს  $N = 877$  ცალი შესაბამისი სრული, ყველა მტყუნება (დაზიანებ) და შესაბამისად რემონტის (აღდგენა). სტატისტიკის თანახმად ამონაკრების მიხედვით, ჰისტოგრამის ინტერვალების რაოდენობა შემდეგია:  $k \approx 6$ . მათემატიკური მოლოდინი  $\mu = 1,73$  სთ (ცხრილი 1). ავაგოთ ჰისტოგრამა და ჰისტოგრამის თანახმად, ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია ექსპონენციალური ფუნქციით ( $\lambda = 0,6773$  სთ<sup>-1</sup>). საბოლოოდ, ცხრილ 11-ში და ნახ. 16-ზე მოყვანილია ჰისტოგრამა და შესაბამისი ალბათობის სიმკვრივის განაწილების ექსპონენციალური აპროქსიმაციის ფუნქცია.

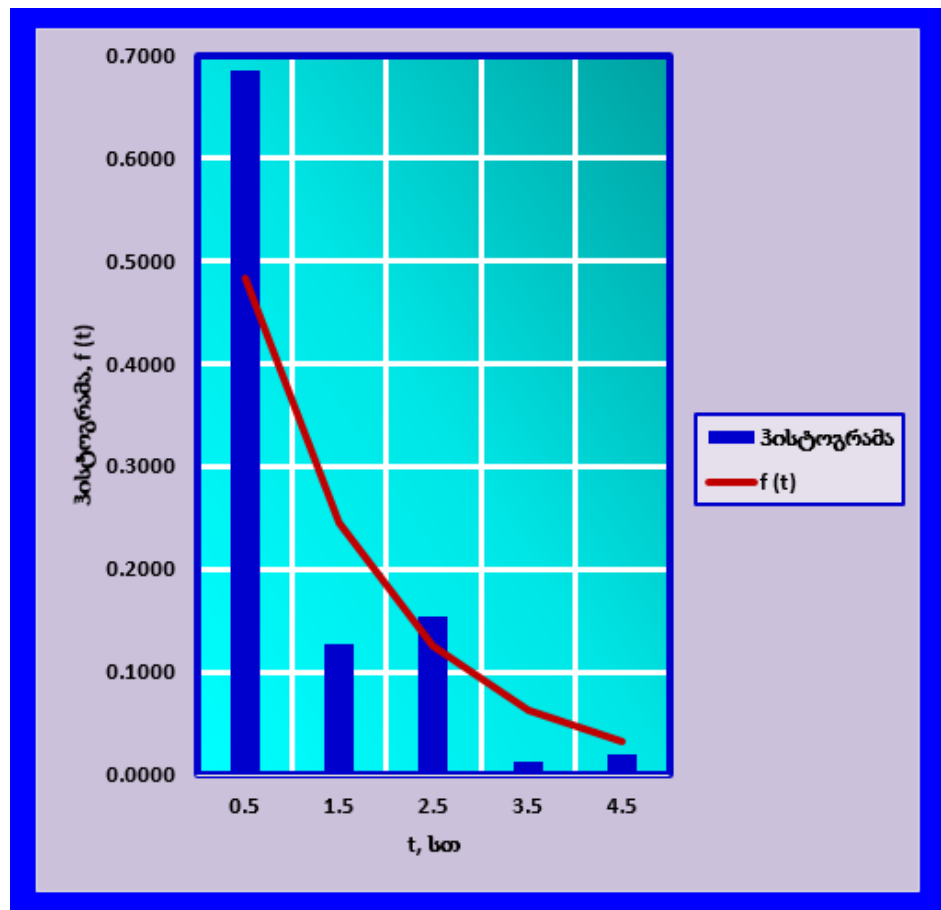
ცხრილი 10. ქ. თბილისის უბნების დაზიანების კრებსითი ცხრილი (რუსთავისა და მარნეულის გზატკეცილები, ლომინაძის, ჟორდანიას, დოლობერიძის, სურგულაძის ქუჩები, ზემო ფონიჭალა, ლისი ვერანდა)

თარიღი	რაიონი	გამოკვლეული ტერიტორია	ნაპოვნი მიწისქვეშა ავარიები	წნევა	დაზიანების ადგილი	გაჟონვის კონცენტრაცია %	რემონტის შესრულების თარიღი	დაზიანების სახე
18.06.2016	ფონიჭალა	სოფელი ფონიჭალა						კოროზირებული მილი
		გიგანტის დასახლება, გიგანტში მიმავალი გზა, აღმაშენებლისა და ეგრისის ქუჩები.	შპს ინტერ ინვესტ ტრანსის	საშულო	განშტოების დგარის ძირში (ძველი)	5	18.06.2016	
			აღმაშენებლის ქ. გიგანტში მიმავალ გზაზე		დ-100 ჩასვლიდან 5-10 მ-ში (ძველი)		18.06.2016	
	გლდანი	ხიზანიშვილის ქ. ჯეოსელის ოფისთან	გადამოწმდა აღდგენილი ავარია ტრანშეის მოპირდაპირედ შენობაში		საკომუნიკაციო ქებში	20	19.06.2016	
19.06.2016	ფონიჭალა	რუსთავისა და მარნეულის გზატკეცილები, ლომინაძის, ჟორდანიას, დოლობერიძის, სურგულაძის ქუჩები, ზემო ფონიჭალა, ლისი ვერანდა (ტელეფონოგრამა)	ჟორდანიას ქ. №14-ის განშტოებაზე	დაბალი	გაჟონვა დაფიქსირდა გაზიფ. თანამშრომელთან	2	20.06.2016	კოროზიული ნახვრეტები
			დოლობერიძისა და ჟორდანიას კვეთაზე	საშულო	დგარის ძირში (ძველი)		21.06.2016	
			ლისი ვერანდაზე შემოწმდა ს/წ გ/ს	საშულო	დ-200 ურდულიდან (ძველი)	2	21.06.2016	

ცხრილი 11. ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკური მონაცემები, შესაბამისი ამონაკრების მიხედვით (სრული მექანიკური დაზიანება):

ინტერვალის ცენტრი, სთ	ჰისტოგრამა	f (t)
0.5	0.6852	0.4827
1.5	0.1279	0.2452
2.5	0.1532	0.1246
3.5	0.0135	0.0633
4.5	0.0202	0.0321

ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია



ნახ.16. ჰისტოგრამა და შესაბამისი ვაიბულის ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია (სრული მექანიკური დაზიანება)

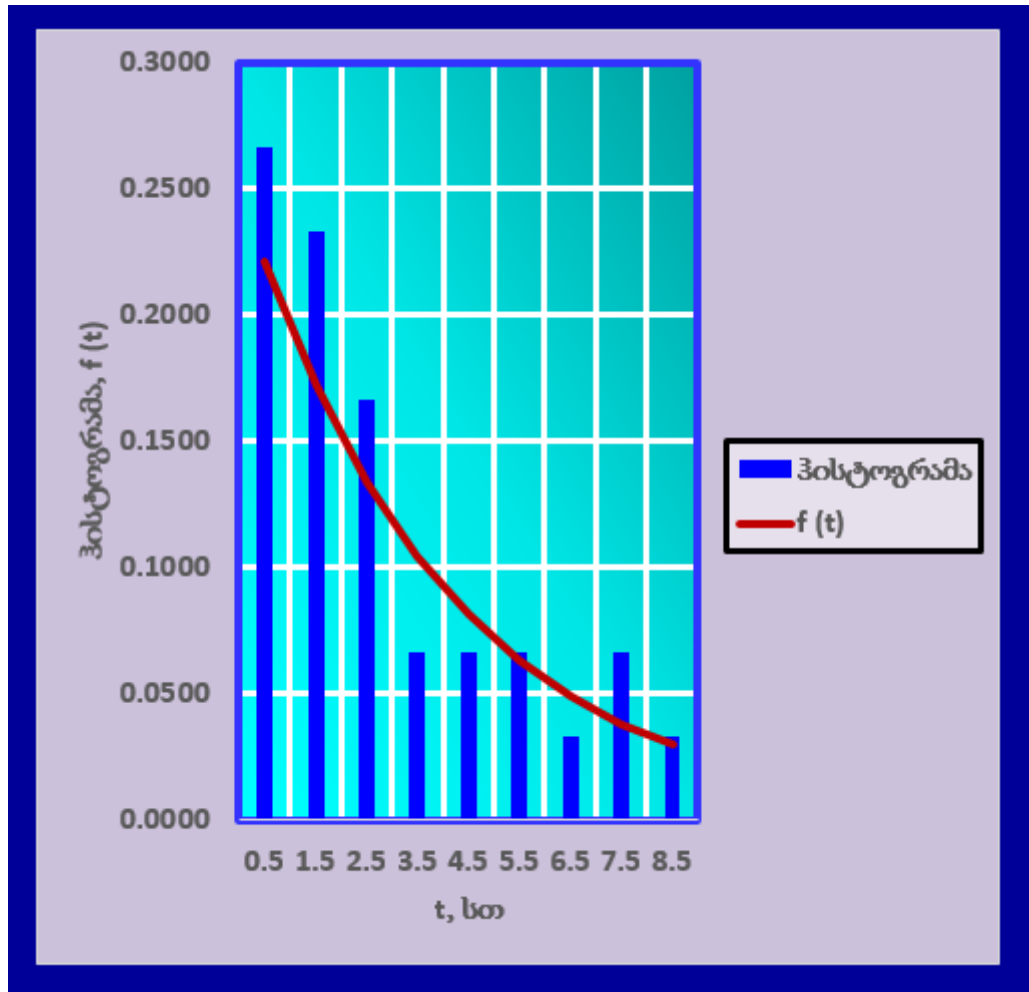
შემდგომში განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკა იმ შემთხვევაში, როდესაც ვიხილავთ



კოროზიით გამოწვეულ დაზიანებებს, გვაქვს  $N = 245$  ცალი შესაბამისი მტყუნება (დაზიანება) და შესაბამისად რემონტის (აღდგენა). სტატისტიკის თანახმად ამონაკრების მათემატიკური მოლოდინი  $\mu = 8,1667$  სთ. ავგოთ ჰისტოგრამა და ჰისტოგრამის თანახმად, ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია ექსპონენციალური ფუნქციით ( $\lambda = 0,1245$  სთ<sup>-1</sup>). საბოლოოდ, ცხრილ 12-ში და ნახ. 17-ზე მოყვანილია ჰისტოგრამა და შესაბამისი ალბათობის სიმკვრივის განაწილების ექსპონენციალური აპროქსიმაციის ფუნქცია.

ცხრილი 12. ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკური მონაცემები, შესაბამისი ამონაკრების მიხედვით (კოროზიული დაზიანება): ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

ინტერვალის ცენტრი, სთ	ჰისტოგრამა	f (t)
0.5	0.2667	0.2215
1.5	0.2333	0.1723
2.5	0.1667	0.1340
3.5	0.0667	0.1043
4.5	0.0667	0.0811
5.5	0.0667	0.0631
6.5	0.0333	0.0491
7.5	0.0667	0.0382
8.5	0.0333	0.0297



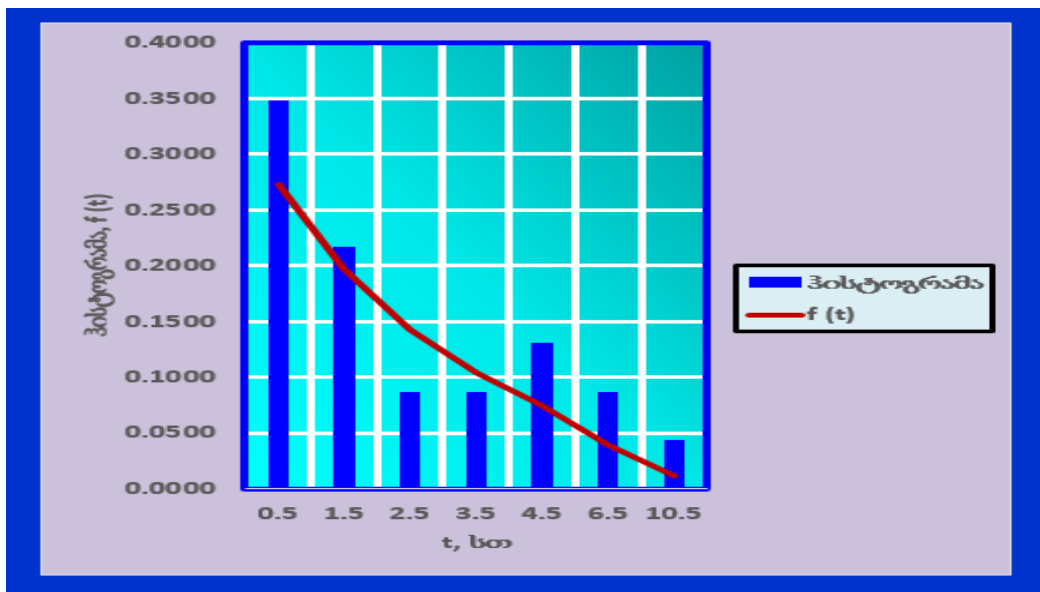
ნახ.17. ჰისტოგრამა და შესაბამისი ვაიბულის ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია (კოროზიული დაზიანება)

შემდგომში განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკა იმ შემთხვევაში, როდესაც ვიხილავთ კოროზიით გამოწვეულ დაზიანებებს, გვაქვს  $N = 87$  ცალი შესაბამისი მტყუნება (შემთხვევითი დაზიანება) და შესაბამისად რემონტის (აღდგენა). სტატისტიკის თანახმად ამონაკრების მათემატიკური მოლოდინი  $\mu = 3,7826$  სთ. ავაგოთ ჰისტოგრამა (ცხრილი 13, ნახ. 18). ავაგოთ ჰისტოგრამა და ჰისტოგრამის თანახმად, ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია ექსპონენციალური ფუნქციით ( $\lambda = 0,1245$  სთ<sup>-1</sup>). საბოლოოდ, ცხრილ 13-ში და ნახ. 18-ზე მოყვანილია ჰისტოგრამა და შესაბამისი ალბათობის სიმკვრივის განაწილების ექსპონენციალური აპროქსიმაციის ფუნქცია.

ცხრილი 13. ქსელის აღდგენის (რემონტების) დროების სტატისტიკური მონაცემები,

ინტერვალის ცენტრი, სთ	ჰისტოგრამა	f (t)
0.5	0.3478	0.2724
1.5	0.2174	0.1974
2.5	0.0870	0.1430
3.5	0.0870	0.1036
4.5	0.1304	0.0751
6.5	0.0870	0.0394
10.5	0.0435	0.0109

შესაბამისი ამონაკრების მიხედვით (შემთხვევითი დაზიანება) - ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია



ნახ.18. ჰისტოგრამა და შესაბამისი ვაიბულის ალბათობის სიმკვრივის განაწილების აპროქსიმაციის ფუნქცია (შემთხვევითი დაზიანება)

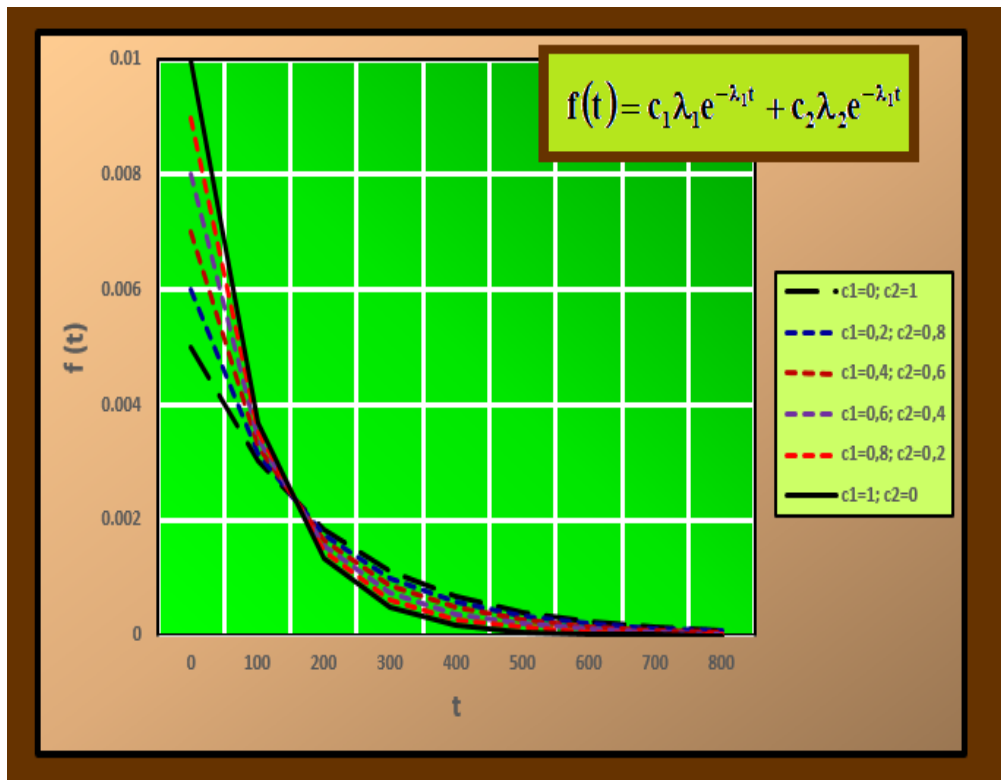
ამგვარად, მიღებულია საშუალო წნევის გაზსადენების დაზიანების აღდგენის ალბათური მახასიათებლების რიცხვითი მნიშვნელობები, რომლებიც შესაძლებელია ჩავთვალოთ საბაზო მნიშვნელობად და შესაძლებელია ამ რიცხვითი მნიშვნელობის გამოყენება ნაშრომის შემდგომ კვლევაში.

### 3.2. ნამუშევარის ნარევის უმტყონო მუშაობის ალბათობის დადგენა

ვთქვათ, მონაცემების მიხედვით ალბათობის განაწილების ნარევის სიმკვრივის ფუნქცია მოცემულია შემდეგი დამოკიდებულებით [29-30]:

$$f(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}.$$

ნახ. 19-ზე ნაჩვენებია ალბათობის განაწილების ნარევის სიმკვრივის ფუნქციების გრაფიკები სხვადასხვა პარამეტრებისათვის.



ნახ. 19. ნარევის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების გრაფიკები სხვადასხვა პარამეტრებისათვის.

დავადგინოთ ალბათობის უმტყონოდ მუშაობის ალბათობა [5-8]:

$$\begin{aligned} P(t) &= 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - \left[ \int_0^t c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^t c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt \right] = \\ &= 1 - \left[ -c_1 e^{-\lambda_1 t} \right]_0^t - \left[ -c_2 e^{-\lambda_2 t} \right]_0^t = 1 - \left[ -c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_1 - c_2 e^{-\lambda_2 t} + c_2 \right] = . \quad (55) \\ &= 1 - (c_1 + c_2) + c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} \end{aligned}$$

დავადგინოთ ჯამი  $c_1 + c_2$ . რადგანაც  $\int_0^t f(t) dt = 1$ , ამიტომ

$$\int_0^t c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^t c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt = c_1 + c_2 = 1. \quad (56)$$

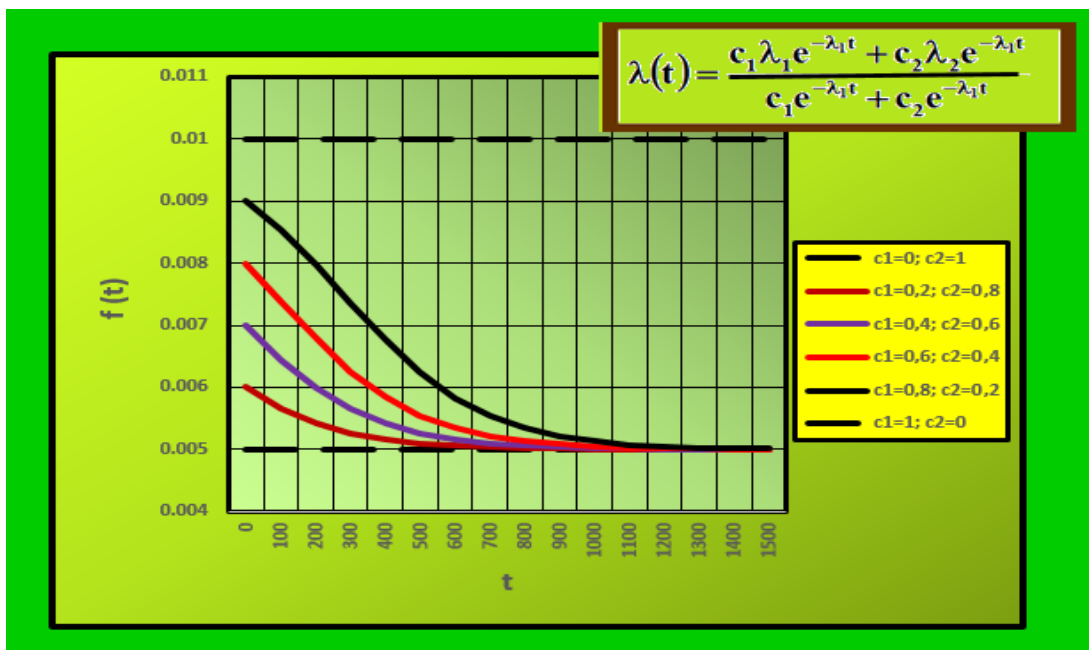
საბოლოოდ

$$P(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}. \quad (57)$$

დავადგინოთ მტყუნების საფრთხის ფუნქცია. გვექნება:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}}. \quad (58)$$

ნახ. 20-ზე ნაჩვენებია მტყუნების საფრთხის ფუნქციების გრაფიკები სხვადასხვა პარამეტრებისათვის.



ნახ. 20. მტყუნების საფრთხის ფუნქციების გრაფიკები სხვადასხვა პარამეტრებისათვის

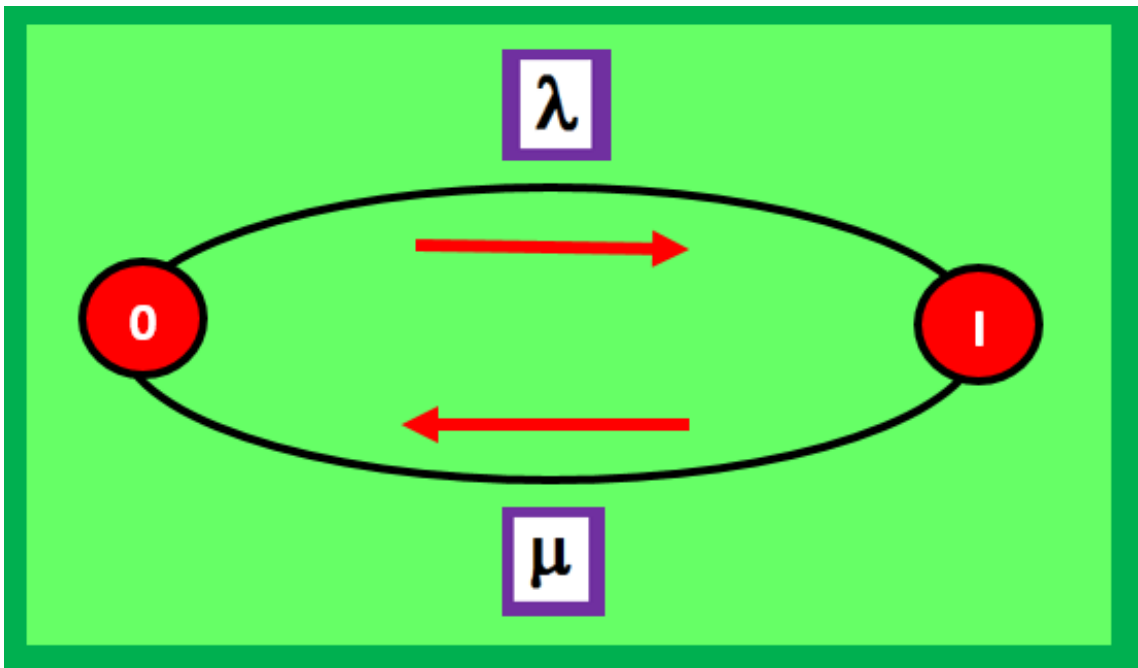
განვსაზღვროთ უმტყუნო მუშაობის საშუალო დრო. საბოლოოდ გვექნება:

$$\mu_t = \int_0^{\infty} P(t) dt = c_1 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + c_2 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} dt = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2}. \quad (59)$$

### 3.3. ალდგენადი სისტემის საიმედოობა

განვიხილოთ სხვადასხვა ალდგენადი სისტემების საიმედოობის მახასიათებლები. ასეთი სისტემების აღწერა, როგორც წესი, ჩატარებულია მასიური მოხმარების თეორიის გამოყენებით [62-70].

ერთი ელემენტისაგან შემდგარი ალდგენადი ელემენტის გადასვლის გრაფიკს გააჩნია შემდეგი სახე (ნახ. 21):



ნახ. 21. ალდგენადი სისტემის გადასვლის გრაფიკი:  $S_0$  - მუშაუნარიანი მდგომარეობა;  $S_1$  - არამუშაუნარიანი მდგომარეობა (მტყუნება)

მდგომარეობათა გრაფიკის მიხედვით ხდება პირველი რიგის, ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებების (კოლმოგოროვ-ეპმენის განტოლებები) შედგება:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{\Theta} \lambda_{ji} P_j(t) - P_i(t) \sum_{j=1}^{\Theta} \lambda_{ij}; \quad j=1, \dots, \Theta; \quad i=1, \dots, \Theta \quad (60)$$

სადაც გვაქვს  $j$ -მდგომარეობიდან  $i$ -მდგომარეობაში გადასვლის  $\lambda_{ij}$  არის მტყუნების საფრთხე ;

$q$  - მდგომარეობების რაოდენობა, რომლის გადასვლა ხდება  $i$  ერთი ბიჯით.

$\Theta$  - მდგომარეობის რაოდენობა, რომლებშიც შეიძლება გადავიდა  $i$ -მდგომარეობიდან, ერთი ბიჯით.

ზოგადად, მტყუნების საფრთხეები  $\lambda_{ij}$ , შესაძლოა დამოკიდებული იყოს  $t$  დროზე.

იმისათვის, რომ ამოვხსნათ დიფერენციალურ განტოლებების სისტემას  $P_1(t), \dots, P_i(t), \dots, P_n(t)$ , საჭიროა განვიხილოთ ალბათობების საწყისი პირობები:  $P_1(0), \dots, P_i(0), \dots, P_n(0)$

ამ დროს აუცილებელია შემდეგი პირობა:

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1 \quad (61)$$

ნახ. 22-ზე ნაჩვენები გრაფზე, დიფერენციალურ განტოლებების სისტემას გააჩნია შემდეგი სახე:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \end{cases} \quad (62)$$

ჩავთვალოთ, რომ საწყის მომენტში სისტემა მუშაუნარია;

$$\begin{cases} P_0(0) = 1; \\ P_1(0) = 0. \end{cases} \quad (63)$$

რადგანაც მდგომარეობები  $S_0$  და  $S_1$  კმნიან ხდომილების სრულ ჯგუფს, ამიტომ

$$P_0(t) + P_1(t) = 1. \quad (64)$$

შევიტანოთ  $P_0(t) = 1 - P_1(t)$ , და შევიტანოთ ფორმულაში. მივიღებთ ერთ დიფერენციალურ განტოლებების  $P_1(t)$ -ს მიმართ:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda[1 - P_1(t)] - \mu P_1(t) \quad (65)$$

აღნიშნული განტოლების ამოსახსნელად, გამოიყენება ლაპლასის გარდაქმნა:

$P_i(t)$ -ს მდგომარეობის ალბათობისათვის გვექნება ლაპლასის გარდაქმნა:

$$P_i(S) = \int_0^{\infty} P_i(t) e^{-st} dt \quad (66)$$

სადაც  $P_i(S) = L\{P_i(t)\}$  არის ალბათობის  $P_i(t)$ -ს ასხავა.

განვიხილოთ  $\frac{dP_i(t)}{dt}$  წარმოებლის ლაპლასის გარდაქმნა:

$$L\left\{\frac{dP_i(t)}{dt}\right\} = \int_0^{\infty} \frac{dP_i(t)}{dt} e^{-st} dt = -P_i(0) + SP_i(S) \quad (67)$$

$$\text{სადაც კონსტანტისათვის გვექნება: } L\{\lambda\} = \lambda L\{1\} = \frac{\lambda}{S}. \quad (68)$$

მოვახდინოთ განტოლების მარცხენა და მარჯვენა ნაწილების ლაპლასისი გარდაქმნა (როდესაც  $P_i(0) = 0$ ):

$$SP_1(S) + P_1(S)(\lambda + \mu) = \frac{\lambda}{S}. \quad (69)$$

$$P_1(S)(S + \lambda + \mu) = \frac{\lambda}{S}. \quad (70)$$

აქედან მივიღებთ არამუშაუნარის მდგომარეობის ალბათობის ასახვა იქნება:

$$P_1(S) = \frac{\lambda}{S(S + \lambda + \mu)} \quad (71)$$

დავშალოთ რაციონალური წილადები ელემენტარულ შემადგენლებზე. გვექნება [18-24]:

$$\frac{\lambda}{S(S + \lambda + \mu)} = \frac{a - \mu}{a} \left[ \frac{1}{S} - \frac{1}{S + a} \right]. \quad (72)$$

სადაც  $a = \lambda + \mu$ .

ჩავატაროთ ლაპლასის უკუგარდაქმნა, შემდეგი კავშირით: თუ

$$L\{f(t)\} = \frac{1}{S}, \text{ მაშინ } f(t) = 1; \text{ თუ } L\{f(t)\} = \frac{1}{S + a}, \text{ მაშინ } f(t) = e^{-at}.$$

ამგვარად მივიღებთ არამუშაუნარი მდგომარეობის ალბათობას:

$$P_i(t) = \frac{a - \mu}{a} (1 - e^{-at}) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}). \quad (73)$$



ანალოგიურად მივიღებთ:

$$P_0(t) = 1 - P_1(t) = 1 - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (74)$$

მიღებული გამოსახულება შედგება მუშაუნარიანი ალბათობის და ობიექტის მტყუნების  $t$  დროში აღდგენის საიმედოობის სხვა მახასიათებლებისგან [49-55]:

მზადყოფნის ფუნქცია  $G(t)$ :

$$G(t) = P_0(t) \quad (75)$$

სისტემის მზადყოფნის კოეფიციენტი  $k_T$ , განისაზღვრება კოეფიციენტი სტაციონარული რეჟიმისათვის  $t \rightarrow \infty$ :

$$k_T = \lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (76)$$

-მოცდენის ფუნქცია  $\Pi(t)$ :

$$\Pi(t) = 1 - G(t) = P_1(t). \quad (77)$$

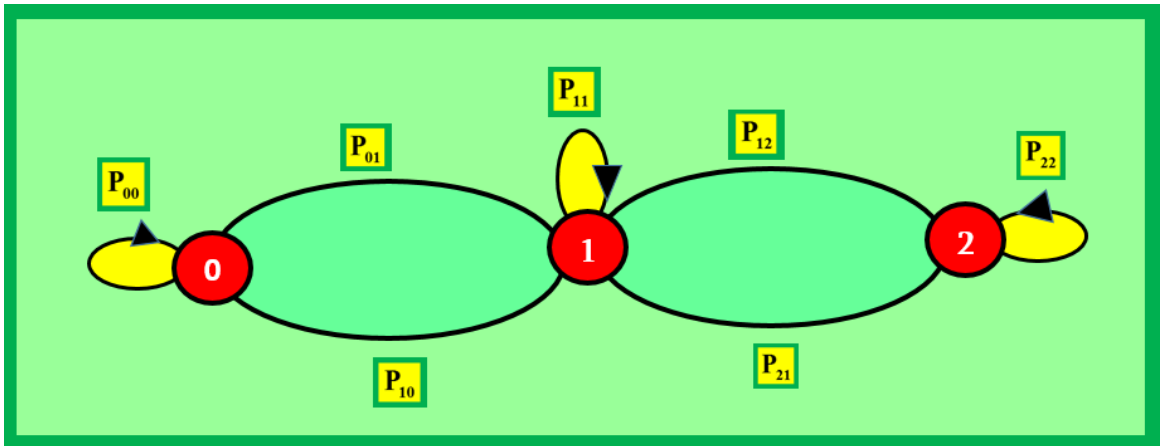
$P_0(t)$  ფუნქციის ცვლილების ანალიზი გვამღებს შემდეგ დასკვნებს [32-40]:

მუშაუნარიანობის მყისი (ავტომატური) აღდგენისას ( $\mu = \infty$ ) გვაქვს:

$$\frac{\lambda}{\mu} = 0 \text{ და } P_0(t) = 1. \text{ თუ არ გვაქვს აღდგენა, მაშინ } \frac{\lambda}{\mu} = \infty \text{ და } P_0(t) = e^{-\lambda t} \text{ და}$$

ობიექტის მდგომარეობის მუშაუნარიანობის ალბათობა ტოლია არააღდგენადი ელემენტის მუშაუნარიანობის ალბათობის.

დუბლირებული აღდგენადი სისტემის გადასვლის გრაფიკს მდგომარეობებს შორის, ნაჩვენებია ნახ. 22-ზე.



ნახ. 22. დუბლირებული ალდგენადი სისტემის გრაფიკი

პირველად გავიანგარიშოთ ასეთი სისტემის საიმედოობის მახასიათებლები, დაშვებით რომ ორივე ელემენტის მტყუნების საფრთხე და ალდგენის ინტენსივობები ერთნაირია, ე.ი.:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ;  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ .

აღნიშნული დუბლირებული სისტემა შეიძლება იყოფოდეს შემდეგ სამ მდგომარეობაში: „0“ - ორივე ელემენტი მუშაუნარიანია; „1“ - ერთი ელემენტი მუშაუნარიანია, მეორე - არამუშაუნარიანია; „2“ - ორივე ელემენტი ალდგენის მდგომარეობაშია. ამოცანების ფუნქციონალური თვალსაზრისით, მდგომარეობა „2“ - წარმოადგენს სრულ მტყუნებას.

ამ სისტემის გაანგარიშება ხდება გადასვლის მატრიცის გამოყენებით.

სისტემას გააჩნია გადასვლის შვიდი სახე, მდგომარეობის დროის  $t$  მომენტიდან,  $t + \Delta t$  მდგომარეობის მომენტამდე:

- 00 - ორივე ჯაჭვი ინარჩუნებს მუშაუნარიანობას;
- 01 - ორი ელემენტებიდან, ერთი მტყუნებაშია;
- 10 - ერთ-ერთი ელემენტი ალდგა (ორივე ელემენტი გახდა მუშაუნარიანია);
- 11 - ელემენტების ერთ-ერთისათვის გრძელდება ალდგება;
- 12 - პირველი ელემენტი მტყუნებაშია, ხოლო მეორე არ ალდგენია (სისტემის მტყუნება);
- 21 - ერთ-ერთი, ორი მტყუნებიდან ალდგა;
- 22 - ორივე ელემენტი გრძელდება ალდგენა (სრული მტყუნება).

გადასვლების გრაფიკს შეესაბამება მატრიცა  $3 \times 3$ -ით. თანამდევით დიაგონალური მატრიცის ბოლო ელემენტების გააჩნია  $O(\Delta t)$  რიგით, რადგანაც მტყუნების ნაკადი მარტივია და აღდგენის დრო განაწილებულია ექსპონენციალურად. მარტივი ნაკადის თანახმად, მატრიცის პირველ სტრიქონში სიტუაცია გამორიცხულია გადასვლისას მდგომარეობი „0“-დან, მდგომარეობაში „2“:  $P_{02}(\Delta t) = 0$ .

ანალოგიურად, მატრიცის მესამე სტრიქონში გვექნება  $P_{22}(\Delta t) = 0$ . მარტივი ნაკადისას,  $\Delta t$  დროში სისტემა შეიძლება მდგომარეობი „0“-ში ალბათობის  $P_{01}(\Delta t)$ -ით გადავიდეს მდგომარეობაში „1“ ან ალბათობის  $P_{00}(\Delta t)$  დარჩეს მდგომარეობაში „0“-ში. ასეთივე სურათი გვაქვს მდგომარეობაში „2“. ალბათობით  $P_{21}(\Delta t)$  სისტემა შეიძლება გადავიდეს მდგომარეობაში „1“ (ერთი ელემენტი აღდგება) ან ალბათობით  $P_{22}(\Delta t)$ -ში რჩება მდგომარეობაში „2“ (ორივე ელემენტი მუშააუნარია - მტყუნების სრული მტყუნება).

გადასვლის ალბათობების მატრიცის პირველი სტრიქონის ელემენტები დამოკიდებული არის სარეზერვო ჯაჭვის გამოყენების რეჟიმზე. ასე მაგალიტად დატვირთულ რეჟიმში ორივე ჯაჭვი მუშაობს, მტყუნების ნაკადის ინტენსივობა ტოლია  $2\lambda$ , ხოლო დაუტვირთავისას -  $\lambda$ . ამიტომ

$$P_{00}(\Delta t) = e^{-(y+1)\lambda\Delta t} \tag{78}$$

სადაც  $y$  არის კოეფიციენტი რომელიც ითვალისწინებს რეზერვის მდგომარეობას (დაუტვირთავი რეჟიმისას  $y = 0$ , ხოლო დატვირთავისას  $y = 1$ ).

იმის გათვალისწინებით, რომ მატრიცის პირველი სტრიქონისათვის გვაქვს

$$P_{00}(\Delta t) + P_{01}(\Delta t) = 1 \tag{79}$$

ამიტომ [81];

$$P_{01}(\Delta t) = 1 - P_{00}(\Delta t) = 1 - e^{-(y+1)\lambda\Delta t} \tag{80}$$

გადასვლის ალბათობები მატრიცის მეორე სტრიქონისათვის, შესაბამისად გვექნება:

$$P_{10}(\Delta t) + P_{11}(\Delta t) + P_{12}(\Delta t) = 1 \quad (81)$$

$$P_{10}(\Delta t) = 1 - e^{-\mu\Delta t} \quad (82)$$

$$P_{12}(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda\Delta t} \quad (83)$$

$$P_{11}(\Delta t) = 1 - [P_{10}(\Delta t) + P_{12}(\Delta t)] = 1 - e^{-\mu\Delta t} - e^{-\lambda\Delta t} \quad (84)$$

მატრიცის მესამე სტრიქონის ელემენტები, სარემონტო ბრიგადების და მტყუნებული ჯაჭვების მრავალჯერადის აღდგენით, განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$P_{21}(\Delta t) + P_{22}(\Delta t) = 1 \quad (85)$$

$$P_{22}(\Delta t) = e^{-r\mu\Delta t} \quad (86)$$

$$P_{21}(\Delta t) = 1 - P_{22}(\Delta t) = 1 - e^{-r\mu\Delta t} \quad (87)$$

სადაც  $r$  არის სარემონტო ბრიგადების რაოდენობა ( $r = 1$  ან  $r = 2$ )

დუბლირებისას აღდგენით შესაძლოა იყოს სისტემის საიმედოობის ანალიზის 4 ვარიანტი:

1. მრავალჯერადი აღდგენითი სისტემა დატვირთული რეზერვით და ერთი სარემონტო ბრიგადით ( $y = 1; r = 1$ )
2. მრავალჯერადი აღდგენითი სისტემა დატვირთული რეზერვით და ორი სარემონტო ბრიგადით ( $y = 1; r = 2$ );
3. მრავალჯერადი აღდგენითი სისტემა დაუტვირთული რეზერვით და ორი სარემონტო ბრიგადით ( $y = 0; r = 2$ );
4. მრავალჯერადი აღდგენითი სისტემა დაუტვირთული რეზერვით და ერთი სარემონტო ბრიგადით ( $y = 0; r = 1$ ).

$P_0(t)$ ,  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$  ფუნქციების განსაზღვრისათვის აუცილებელია შევადგინოთ სამი დიფერენციალური განტოლების სისტემის შედგენა და მისი ამოხსნა:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = f_0(\lambda, \mu, r, y, t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = f_1(\lambda, \mu, r, y, t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = f_2(\lambda, \mu, r, y, t) \end{cases} \quad (88)$$

სადაც  $\lambda, \mu, r, y$  - მუდმივი კოეფიციენტებია, ხოლო  $t$  - დრო.

მატრიცის სვეტების თვისების მიხედვით, აუცილებელია ჩავწეროთ სრული ალბათობების  $P_0(t + \Delta t)$ ,  $P_1(t + \Delta t)$ ,  $P_2(t + \Delta t)$  ფორმულები, შემდეგ ჩავწეროთ სისტემის '0', '1' და '2' მდგომარეობებში სისტემების ალბათობების წარმოებულები და შევიტანოთ განტოლების სისტემაში:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t}; \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t + \Delta t) - P_1(t)}{\Delta t} \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_2(t + \Delta t) - P_2(t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (89)$$

სრული ალბათობების ფორმულები ჩაიწერება შედგენილი მატრიცის შესაბამისი პირველი სვეტის შესაბამისად:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot P_{00}(\Delta t) + P_1(t) \cdot P_{10}(\Delta t) \quad (90)$$

მეორე სვეტისათვის:

$$P_1(t + \Delta t) = P_1(t) \cdot P_{11}(\Delta t) + P_0(t) \cdot P_{01}(\Delta t) + P_2(t) \cdot P_{21}(\Delta t) \quad (91)$$

მესამე სვეტისათვის:

$$P_2(t + \Delta t) = P_2(t) \cdot P_{22}(\Delta t) + P_1(t) \cdot P_{12}(\Delta t). \quad (92)$$

თუ შევიტანოთ ამ გამოსახულებებში შესაბამის გადასვლის ალბათობებს, მივიღებთ სამი დიფერენციალური განტოლების სისტემას, ოთხი მუდმივი კოეფიციენტებით  $\lambda, \mu, r, y$ .

სისტემა მდგომარეობაში '0', '1' და '2'-ში ალბათობების ფუნქციების დროის  $t$ -თვის, საწყისი პირობებისათვის გვაქვს:  $P_0(0) = 1; P_1(0) = P_2(0) = 0$ , სისტემა საწყისი მუშაობაში იწყებს ორი მუშაუნარიანი ჯაჭვით.

მიღებული  $P_0(t), P_1(t), P_2(t)$  ცნობილი ფუნქციებისათვის და ცნობილი პირობის ტანახმად  $P_0(t)+P_1(t)+P_2(t)=1$ , ამიტომ უფრო ხელსაყრებელია განისაზღვროს ფუნქცია  $G(t)=1-P_2(t)$ .

რეზერვირებულ არდგენად სისტემაში როდესაც  $\frac{\lambda}{\mu} \leq 0,01$ ,  $G(t \geq 0,5$  წელი)  $\geq 0,999$  და ეს ფუნქცია სწრაფად მიისწრაფვის მზადმყოფის სტაციონარულ მნიშვნელობას.

მზადმყოფი კოეფიციენტისათვის, დუბლირებული სისტემისათვის მრავალჯერადი ერთი აღდგენით ( $r=1$ ) და ორი ( $r=2$ ) სარემონტო ბრიგადებით, გვექნება:

$$K_{r(r=1)} = \frac{(y+1)\lambda\mu + \mu^2}{(y+1)\lambda^2 + (y+1)\lambda\mu + \mu^2} \quad (93)$$

$$K_{r(r=2)} = \frac{2(y+1)\lambda\mu + 2\mu^2}{(y+1)\lambda^2 + 2(y+1)\lambda\mu + 2\mu^2} \quad (94)$$

ამგვარად მივიღეთ ცალკეული აღდგენადი ელემენტის და დუბლირებული სისტემა, რომელშიც შედის ორი აღდგენადი ელემენტი.

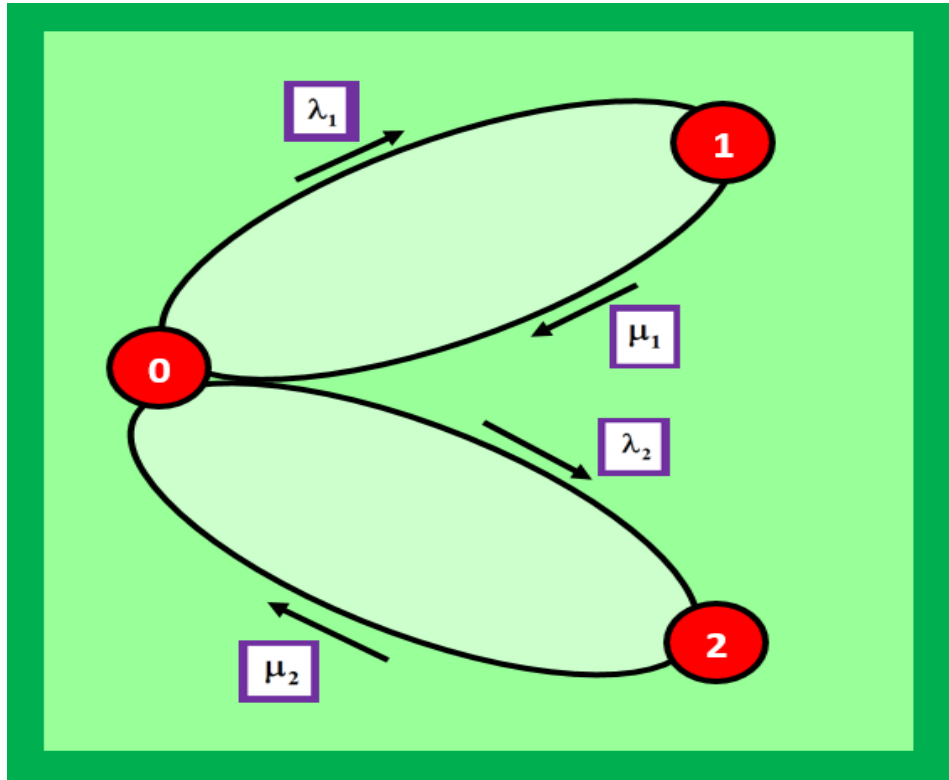
განვიხილოთ სისტემის საიმედოობის მახასიათებლები, რომელიც შეიცავს მიმდევრობით ჩართული ელემენტები, რომელთაგანაც თვითეული ქმნის ცალკე აღდგენად ელემენტს, ან დუბლირებულ სისტემას.

ასეთი სისტემის მდგომარეობებს შორის გადასვლების გრაფიკი დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორ რეჟიმში არის სისტემის მუშაუნარიანი სისტემა, ელემენტის მტყუნების და აღდგენისას.

პირველ რეჟიმში, ელემენტის ნებისმიერი მტყუნებისას სხვა ელემენტები გამორთული არის, ე.ი. მუშა ელემენტების მტყუნების საფრთხე ამ დროის განმავლობაში - ნულია. ამ შემთხვევაში სისტემის აღდგენისას საკმარისია ერთი სარემონტო ბრიგადა.

მეორე რეჟიმში, ნებისმიერი ელემენტების მტყუნებისას, დანარჩენი ელემენტები რჩებიან მუშა რეჟიმში, ე.ი. თვითეული საიმედოობის მახასიათებლები არ არის დამოკიდებული სხვა ელემენტების მდგომარეობაზე.

სისტემის გადასვლების გრაფიკი შეიცავს ორ ელემენტს, რომლებიც მუშაობს პირველ რეჟიმში და ნაჩვენებია ნახ. 23-ზე.



ნახ. 23. სისტემის გადასვლების გრაფიკი ორი ელემენტით, რომლებიც მუშაობს პირველ რეჟიმში:  $S_0$  - მუშა მდგომარეობა;  $S_1$  - პირველი ელემენტის მტყუნება (მუშაუუნარო მდგომარეობა);  $S_2$  - მეორე ელემენტის მტყუნება (მუშაუუნარო მდგომარეობა)

ასეთი სისტემის გაანგარიშება გვაძლევს მზადმყოფის კოეფიციენტის შემდეგი მნიშვნელობა;

$$K_T(t) = K_T + (1 - K_T)e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \frac{1}{\tau})t} \quad (95)$$

სადაც  $K_T$  არის მზადმყოფის სტაციონარული კოეფიციენტი და განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$K_T = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^2 \left( \frac{1}{K_{T_i}} - 1 \right)} \quad (96)$$

აქ  $\tau$  განისაზღვრება შემდეგი თანაფარდობით:  $\tau = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ .

ზოგადად, მზადყოფნის სტაციონარული კოეფიციენტი, რომელიც შედის  $n$  ელემენტები სისტემაში და ჩართულია მიმდევრობით, მაშინ ამ შემთხვევაში სისტემის მტყუნებისას არ ამოირთვება და მოყვანილია შემდეგი გამოსახულებით:

$$K_r = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^2 \left( \frac{1}{K_{r_i}} - 1 \right)} \quad (97)$$

სადაც  $K_{r_i}$  არის  $i$ -ური ელემენტის მზადყოფნის კოეფიციენტი.

სისტემის გადასვლების გრაფიკი შეიცავს ორ ელემენტს, რომლებიც მუშაობს მეორე რეჟიმში, როდესაც მტყუნებისას სისტემა არ გამოირთვება, ნაჩვენებია ნახ. 24-ზე.

ასეთი სისტემის გაანგარიშება გვაძლევს მზადყოფნის სტაციონარული კოეფიციენტის შემდეგ მნიშვნელ ობას:

$$K_r = \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1}\right) \left(1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2}\right)} = \frac{1}{\prod_{i=1}^2 \left(1 + \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)}. \quad (98)$$

ზოგადად, მზადყოფნის სტაციონარული კოეფიციენტი, რომელიც შედის  $n$  ელემენტები სისტემაში და ჩართულია მიმდევრობით, ამ შემთხვევაში მტყუნებისას სისტემა არ გამოირთვება და განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით [56]:

$$K_r = \frac{1}{\prod_{i=1}^2 \left(1 + \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)} = \frac{1}{\prod_{i=1}^2 \frac{1}{K_{r_i}}} = \prod_{i=1}^2 K_{r_i}. \quad (99)$$

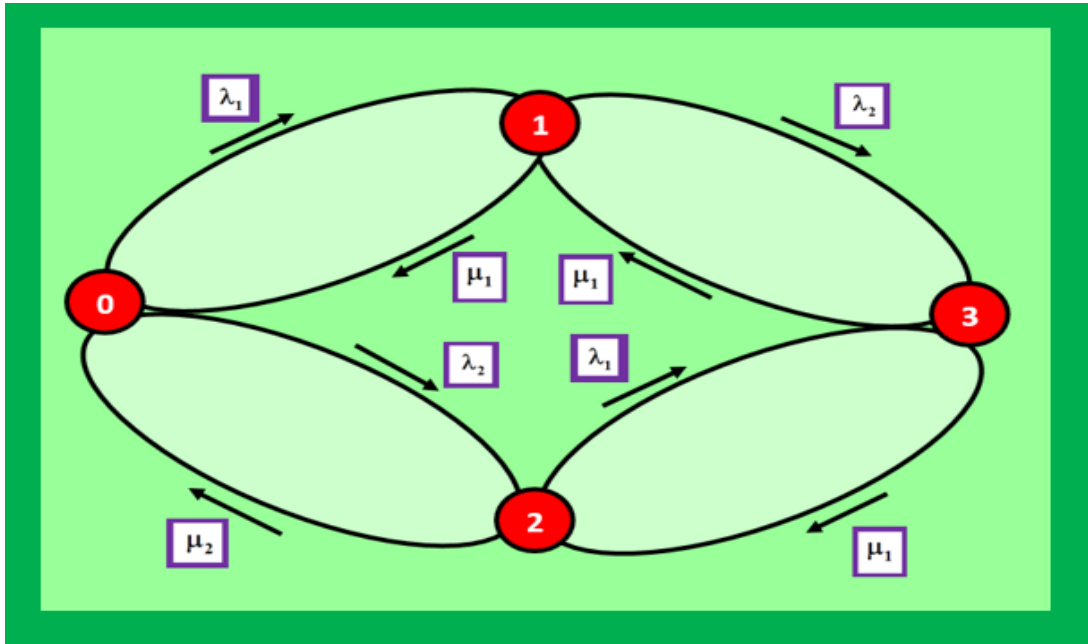
სადაც  $K_{r_i}$  არის  $i$ -ური ელემენტის მზადყოფნის კოეფიციენტი.

განვიხილოთ მაგალითი 1. ვთქვათ გვაქვს შემდეგი მონაცემები:

$$\lambda_1 = 0,001 \div 0,005 \text{ დღე}^{-1}; \lambda_2 = 0,0015 \text{ დღე}^{-1}; \mu_1 = 0,1 \text{ დღე}^{-1}; \mu_2 = 0,09 \text{ დღე}^{-1}.$$

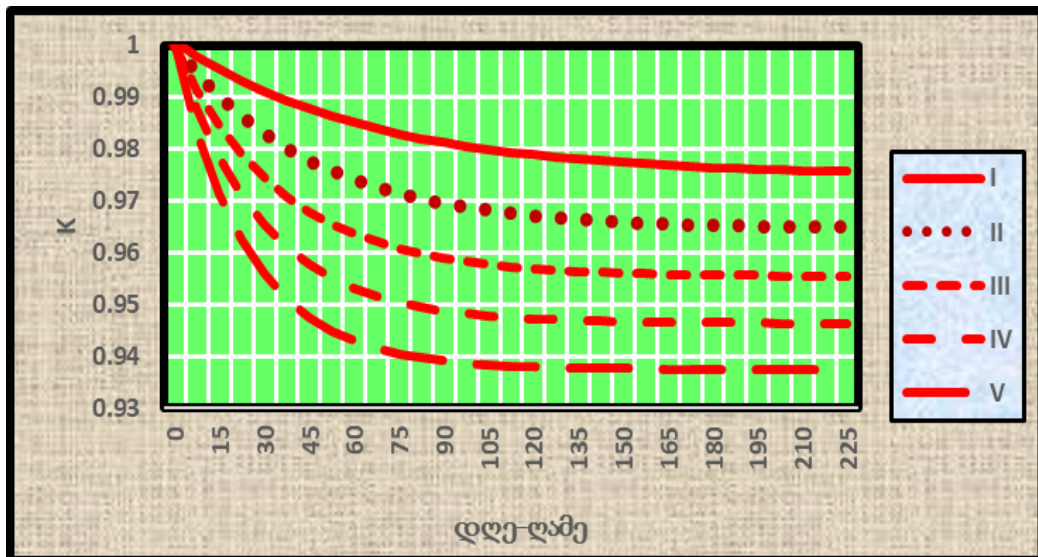
$$\text{მაგალითი 2: } \lambda_1 = 0,001 \text{ დღე}^{-1}; \lambda_2 = 0,0015 \text{ დღე}^{-1}; \mu_1 = 0,1 \div 0,4 \text{ დღე}^{-1}; \mu_2 = 0,09 \text{ დღე}^{-1}.$$



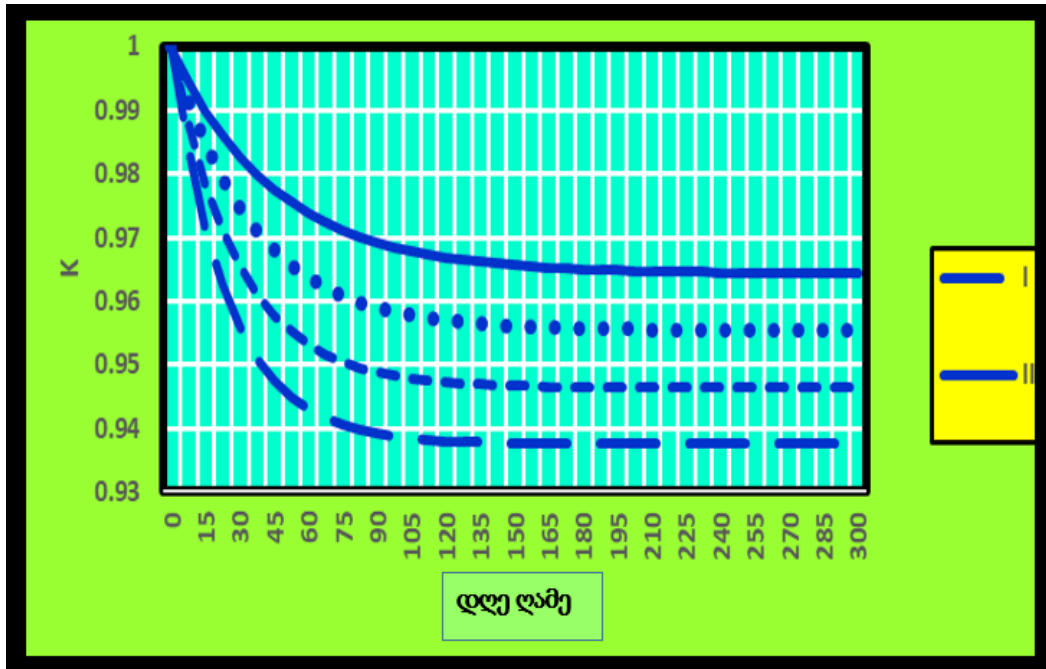


ნახ. 24. სისტემის გადასვლების გრაფი შეიცავს ორ ელემენტს, რომლებიც მუშაობს მეორე რეჟიმში.  $S_0$  - მუშა მდგომარეობა;  $S_1$  - პირველი ელემენტის მტყუნება (მუშაუუნარო მდგომარეობა);  $S_2$  - მეორე ელემენტის მტყუნება (მუშაუუნარო მდგომარეობა);  $S_3$  - ორი ელემენტის მტყუნება (მუშაუუნარო მდგომარეობა)

ნახ. 25 და 26-ზე ნაჩვენებია  $K_T$ -ს გრაფიკები, სხვადასხვა პარამეტრებისათვის.



ნახ. 25.  $K_T$ -ს გრაფიკები:  $\lambda_1 = 0,001 \div 0,005$  დღე<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 0,0015$  დღე<sup>-1</sup>;  $\mu_1 = 0,1$  დღე<sup>-1</sup>;  $\mu_2 = 0,09$  დღე<sup>-1</sup>

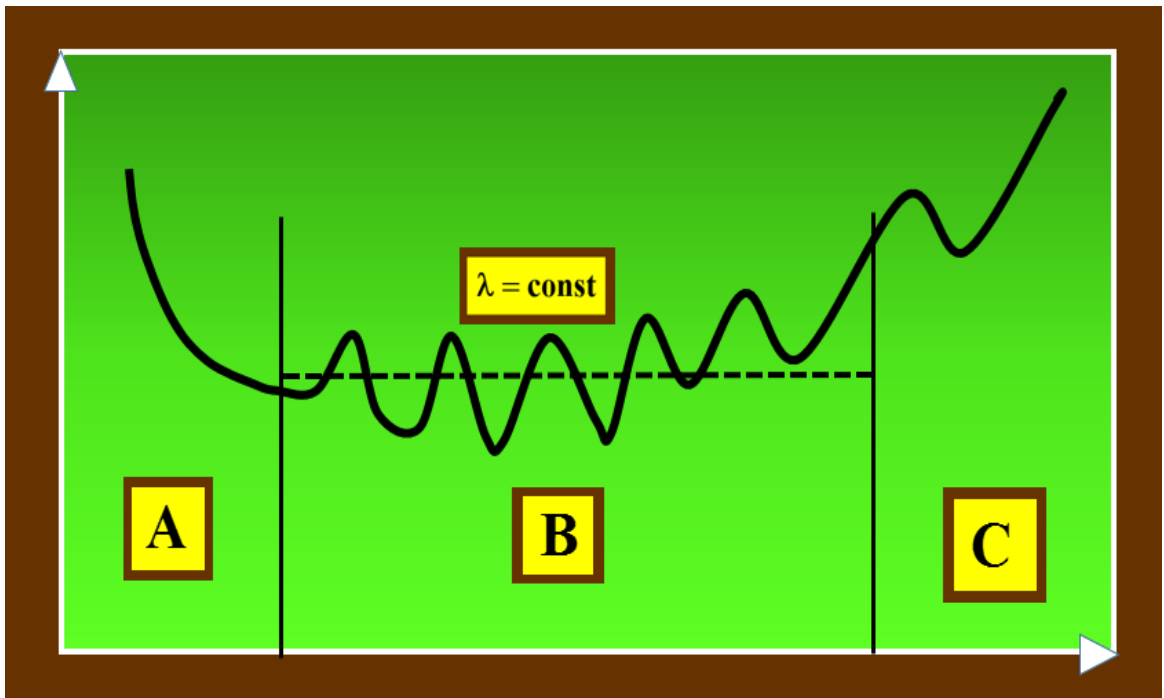


ნახ. 26.  $K_T$ -ს გრაფიკები:  $\lambda_1 = 0,001$  დღე<sup>-1</sup>;  $\lambda_2 = 0,0015$  დღე<sup>-1</sup>;  $\mu_1 = 0,1 \div 0,4$  დღე<sup>-1</sup>;  $\mu_2 = 0,09$  დღე<sup>-1</sup>.

### 3.4. მტყუნების საფრთხეს წირი

როგორც წესი, ექსპონენციალური განაწილება აღიწერება ისეთი ტექნიკური სისტემების ელემენტები, რომლების მტყუნებები არ არის დამოკიდებული მუშაობის წინაისტორიის პერიოდში (პერიოდი **B**), ე.ი. მტყუნებები ხდება შემთხვევითი, არასამტატო სიტუაციებში (მაგალითად სტიქიური მოვლენები, დივერსიები და ა.შ.). მაგრამ, აღნიშნული განაწილება შესაძლოა გამოვიყენოთ სისტემები რეგლამენტირებული მოხმარებით (ნახ. 27).

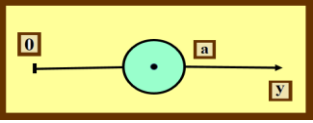

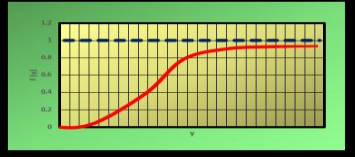
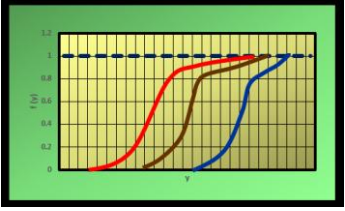
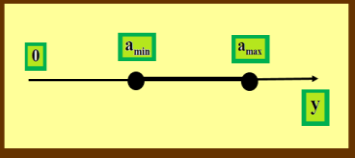
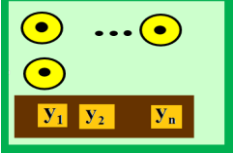
ითვლება, რომ ელემენტის (სისტემის) რესურსი აღდგება სრულად (ან ნაწილობრივად). მტყუნებების საფრთხის ცვლილება რემონტსმორისი პერიოდი, როგორც წესი, იგნორირდება და ითვლება, რომ მტყუნებების საფრთხე - მუდმივია.



ნახ. 27. მტყუნებების საფრთხე რეგლამინტერებული რემონტით

გამოკვლევები გვიჩვენებს, რომ დროის აღდგენა  $\tau$  ნორმალური განაწილებისათვის უფრო უპრიანია ვიდრე ექსპონენციალური. მაგრამ რადგანაც  $\tau < t$ , ამიტომ შემთხვევითი  $\tau$  შემთხვევითი დროის განაწილება, მცირე ხდება ხანგრძლივი პერიოდის დროის აღდგენის პროცესებისათვის. ამიტომ, სტრუქტურირებისას, შესაძლოა მარკოვის პროცესების გამოყენება, და დაშვება, რომ ექსპონენციალურია არა მხოლოდ  $t$ , არამედ  $\tau$ -ც.

რთული ტექნიკური სისტემების სტრუქტურულ საიმედოობაში განიხილება ელემენტები რომლებიც შეიძლება იყოს მხოლოდ ორ მდგომარეობაში: 1 - მუშაობის მდგომარეობა; 0 - მტყუნება. რეალური ტექნიკური სისტემის მდგომარეობები წარმოადგენს ბინარული ცვლადების სივრცეში რთულ ლოგოკურ ფუნქციებს [59-64]. ლოგიკის ალგებრაში განიხილება და წარმოადგენს გამონათქვამების აღრიცხვას. ამის მიხედვით შეიძლება გვქონდეს ნებისმიერი წინადადება, რომლის მიხედვით გვაქვს ჭეშმარიტული, ან სიცრუის გამონათქვამი.

ინფორმაციის სახე	მათემატიკური აღწერის ფორმა																									
	უწყვატი სიდიდეები	დისკრეტული სიდიდეები																								
ა) დეტერმინირებული (ცალსახე)	წერტილი 	წერტილი 																								
ბ) ალბათურ-განსაზრვრული	განაწილების ფუნქცია 	განაწილების რიგი <table border="1" data-bbox="970 683 1348 795"> <tr> <td><math>y_1</math></td> <td><math>y_2</math></td> <td>...</td> <td><math>y_n</math></td> </tr> <tr> <td><math>p_1</math></td> <td><math>p_2</math></td> <td>...</td> <td><math>p_n</math></td> </tr> </table>	$y_1$	$y_2$	...	$y_n$	$p_1$	$p_2$	...	$p_n$																
$y_1$	$y_2$	...	$y_n$																							
$p_1$	$p_2$	...	$p_n$																							
გ) ალბათურ-განუსაზრვრული	განაწილების ფუნქციების სერია 	<table border="1" data-bbox="970 1019 1348 1131"> <tr> <td><math>y_1</math></td> <td><math>y_2</math></td> <td>...</td> <td><math>y_n</math></td> </tr> <tr> <td><math>p_{11}</math></td> <td><math>p_{21}</math></td> <td>...</td> <td><math>p_{n1}</math></td> </tr> </table> <table border="1" data-bbox="970 1176 1348 1288"> <tr> <td><math>y_1</math></td> <td><math>y_2</math></td> <td>...</td> <td><math>y_n</math></td> </tr> <tr> <td><math>p_{11}</math></td> <td><math>p_{21}</math></td> <td>...</td> <td><math>p_{n1}</math></td> </tr> </table> <table border="1" data-bbox="970 1332 1348 1444"> <tr> <td><math>y_1</math></td> <td><math>y_2</math></td> <td>...</td> <td><math>y_n</math></td> </tr> <tr> <td><math>p_{11}</math></td> <td><math>p_{21}</math></td> <td>...</td> <td><math>p_{n1}</math></td> </tr> </table>	$y_1$	$y_2$	...	$y_n$	$p_{11}$	$p_{21}$	...	$p_{n1}$	$y_1$	$y_2$	...	$y_n$	$p_{11}$	$p_{21}$	...	$p_{n1}$	$y_1$	$y_2$	...	$y_n$	$p_{11}$	$p_{21}$	...	$p_{n1}$
$y_1$	$y_2$	...	$y_n$																							
$p_{11}$	$p_{21}$	...	$p_{n1}$																							
$y_1$	$y_2$	...	$y_n$																							
$p_{11}$	$p_{21}$	...	$p_{n1}$																							
$y_1$	$y_2$	...	$y_n$																							
$p_{11}$	$p_{21}$	...	$p_{n1}$																							
დ) განუსაზღვრული	სიდიდეების მონაკვეთი (დიაპაზონი) 	სიდიდეების ამონაკრები (წერტილები) 																								

ნახ. 28. საწყისი ინფორმაციის წარმოდგენის რაოდენობრივი ფორმები

#### თავი 4. ქსელის ზღუდარიანი ელემენტის ალბათობა

ცალკეული (ელემენტარული) გამონათქვამები განიხილება გარკვეული ცვლადებით ( $\mathbf{x}$ ). ამ დროს თუ გამონათქვამი გვაქვს ორი მნიშვნელობა „ჭეშმარიტება“ ან „სიცრუა“, მაშინ თუ  $\mathbf{x}$  ჭეშმარიტია, მაშინ  $\mathbf{x}=\mathbf{1}$ , ხოლო თუ  $\mathbf{x}$  სიცრუეა, მაშინ  $\mathbf{x}=\mathbf{0}$ . თვითეულ კონკრეტულ გამონათქვამს გააჩნია ჭეშმარიტობის გარკვეული მნიშვნელობა (ლოგიკური კონსტანტა). მაგრამ ამ გამონათქვამში შეიძლება იყოს ცვლადი. მაგალითად, გამონათქვამი  $\mathbf{x}$  „ელემენტი მუშაუნარიანია“ ალბათობის გარკვეული ალბათობით, შეიძლება იყოს ჭეშმარიტი ( $\mathbf{x}=\mathbf{1}$ ), ან ცრუ ( $\mathbf{x}=\mathbf{0}$ ). ცვლადი სიდიდე, რომელსაც გააჩნია მხოლოდ ორი მდგომარეობა (1 ან 0), წარმოადგენს ბინარულს. შესაძლოა სხვა რთული გამონათქვამების აგება - ფუნქციებს, რომლებიც წარმოადგენენ სხვა მარტივ გამონათქვამების არგუმენტებს. ფუნქციები ასევე იღებენ მხოლოდ ორ მნიშვნელობას (1 ან 0) და წარმოადგენენ ბინარულ ფუნქციებს, ან ლოგიკის ალგებრის ფუნქციებს. ლოგიკის ალგებრაში განიხილება სამი ძირითადი ლოგიკური ოპერაცია: უარყოფა, კონიუქცია (გამრავლება) და დიზიუნქცია (შეკრება). ცვლადების ლოგიკურ ცვლადებში ოპერაციების შედეგები „ჭეშმარიტება“ ( $\mathbf{T}$ ),  $\mathbf{T}=\mathbf{1}$ , „სიცრუე“ ( $\mathbf{F}$ ),  $\mathbf{F}=\mathbf{0}$  მოყვანილია ცხრილ 14-ში.

უარყოფა (სიმრავლის დამატების ანალოგი):  $\mathbf{x}$  გამონათქვამის უარყოფა განისაზღვრება როგორც  $\bar{\mathbf{x}}$  (იკითხება როგორც „არა  $\mathbf{x}$ “). ჭეშმარიტების მნიშვნელობა განისაზღვრება თანაფარდობებით: თუ  $\mathbf{x}=\mathbf{1}$ , მაშინ  $\bar{\mathbf{x}}=\mathbf{0}$ ; თუ  $\mathbf{x}=\mathbf{0}$ , მაშინ  $\bar{\mathbf{x}}=\mathbf{1}$ .

დიზიუნქცია (სიმრავლეების გაერთიანების ანალოგი):  $\mathbf{x}_1$  ან და გამონათქვამების ლოგიკური შეკრება აღინიშნება როგორც  $\mathbf{x}_1 \vee \mathbf{x}_2$ , ან  $\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2$  (იკითხება როგორც „ $\mathbf{x}_1$  ან  $\mathbf{x}_2$ “). ოპერაციის შედეგი გვაქვს „სიცრუე“ მხოლოდ და მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც ორივე შემადგენელი გვაძლევს „სიცრუეს“ მნიშვნელობას. იმ შემთხვევაში, თუ

მხოლოდ ერთი შემადგენელი არის „ჭეშმარიტობა“, მაშინ ოპერაციის შედეგია „ჭეშმარიტება“:  $0 \vee 0 = 0$ ;  $0 \vee 1 = 1$ ;  $1 \vee 0 = 1$ ;  $1 \vee 1 = 1$ .

კონიუქცია (სიმრავლების დაფარვის ანალოგი).  $x_1$  და  $x_2$  გამონათქვების ლოგიკური გამრავლება აღინიშნება როგორც  $x_1 \wedge x_2$ , ან  $x_1 \cdot x_2$  (იკითხება როგორც „ $x_1$  და  $x_2$ “). ოპერაციის შედეგი გვაქვს „ჭეშმარიტება“ მხოლოდ და მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც ორივე შემადგენელი გვაძლევს „ჭეშმარიტების“ მნიშვნელობას.

ცხრილი 14. ლოგიკური ოპერაციები

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A -ს უარყოფა <math>\bar{A}</math></b>	<b>A ან B <math>A \vee B</math></b>	<b>A და B <math>A \wedge B</math></b>
<b>T</b>	<b>T</b>	<b>F</b>	<b>T: <math>(1 \vee 1 = 1)</math></b>	<b>T: <math>(1 \wedge 1 = 1)</math></b>
<b>T</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>T: <math>(1 \vee 0 = 1)</math></b>	<b>F: <math>(1 \wedge 0 = 0)</math></b>
<b>F</b>	<b>T</b>	<b>T</b>	<b>T: <math>(0 \vee 1 = 1)</math></b>	<b>F: <math>(0 \wedge 1 = 0)</math></b>
<b>F</b>	<b>F</b>	<b>T</b>	<b>F: <math>(0 \vee 0 = 0)</math></b>	<b>F: <math>(0 \wedge 0 = 0)</math></b>

თუ მხოლოდ ერთი შემადგენელი არის „სიცრუე“, მაშინ ოპერაციის შედეგია „სიცრუე“.

$$0 \wedge 0 = 0; 0 \wedge 1 = 0; 1 \wedge 0 = 0; 1 \wedge 1 = 1. \quad (100)$$

ლოგიკური გამონათქვების გარდაქმნების ძირითადი წესები შემდეგშია;

$$\begin{cases} x \cdot 1 = x; x + 1 = 1; x \cdot 0 = 0; x + 0 = x. \\ x \cdot x = x; x + x = x; x \cdot \bar{x} = 0; x + \bar{x} = 1. \end{cases} \quad (101)$$

ასოციატური კანონი:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1(\mathbf{x}_2 \cdot \mathbf{x}_3) = (\mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_2)\mathbf{x}_3 = \mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_2 \cdot \mathbf{x}_3; \\ \mathbf{x}_1(\mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_3) = (\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2) + \mathbf{x}_3 = \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_3. \end{cases} \quad (102)$$

კომუტატორი კანონი:

$$\mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_2 \cdot \mathbf{x}_1; \quad \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_1. \quad (103)$$

განაწილების (დისტრიბუტიული) კანონი:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1(\mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_3) = (\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2) + (\mathbf{x}_1\mathbf{x}_3); \\ \mathbf{x}_1 + (\mathbf{x}_2\mathbf{x}_3) = (\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2)(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_3). \end{cases} \quad (104)$$

ინვერსიის კანონი:

$$\overline{\overline{\mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{x}_2}} = \overline{\overline{\mathbf{x}_1}} + \overline{\overline{\mathbf{x}_2}}; \quad \overline{\overline{\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2}} = \overline{\overline{\mathbf{x}_1}} \cdot \overline{\overline{\mathbf{x}_2}}. \quad (105)$$

შთანთქმის ოპერაცია:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 + (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) = \mathbf{x}_1 + (\mathbf{0}, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n); \\ \mathbf{x}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) = \mathbf{x}_1(\mathbf{1}, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n). \end{cases} \quad (106)$$

კერძოდ

$$\mathbf{x}_1 + (\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2) = \mathbf{x}_1; \quad \mathbf{x}_1(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2) = \mathbf{x}_1. \quad (107)$$

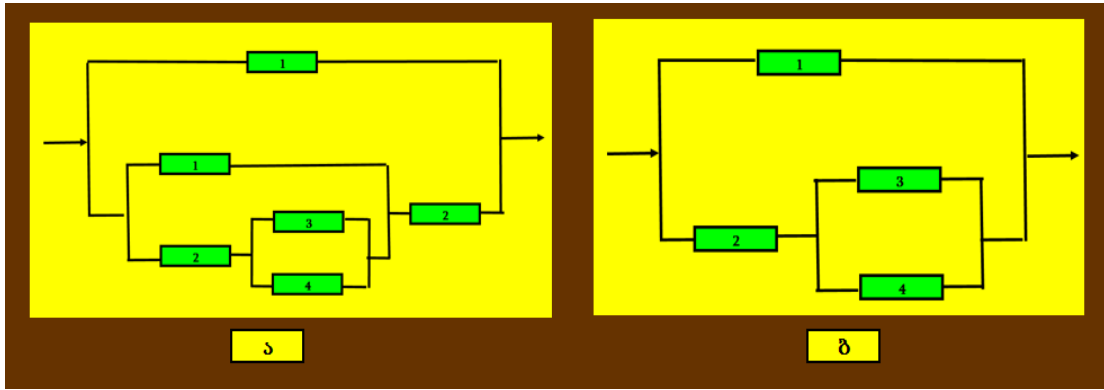
შეწებების ოპერაცია:

$$\begin{cases} (\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2) + (\overline{\overline{\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2}}) = \mathbf{x}_1\mathbf{x}_2 + \overline{\overline{\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2}} = \mathbf{x}_1(\overline{\overline{\mathbf{x}_2}} + \overline{\overline{\mathbf{x}_2}}) = \mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{1} = \mathbf{x}_1; \\ (\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2) + (\overline{\overline{\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2}}) = \mathbf{x}_1\mathbf{x}_2 + \overline{\overline{\mathbf{x}_1\mathbf{x}_2}} = \mathbf{x}_2(\overline{\overline{\mathbf{x}_1}} + \overline{\overline{\mathbf{x}_1}}) = \mathbf{x}_2 \cdot \mathbf{1} = \mathbf{x}_2. \end{cases} \quad (108)$$

ლოგიკური გამონათქვების გარდაქმნისას მეტად მნიშვნელოვანი გვაქვს შთანთქმის ოპერაცია. მაგალითისათვის განვიხილოთ ნახ. 29 ა-ზე ნაჩვენები სრუქტურა, რომელიც წარმოადგენს გამოსახულებას  $s = \mathbf{x}_1 + (\mathbf{x}_2(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2(\mathbf{x}_3 + \mathbf{x}_4)))$ , რომელიც მარტივად გარდაიქმნება შემდეგ სახეზე  $s = \mathbf{x}_1 + (\mathbf{x}_2(\mathbf{0} + \mathbf{1}(\mathbf{x}_3 + \mathbf{x}_4))) = \mathbf{x}_1 + (\mathbf{x}_2(\mathbf{x}_3 + \mathbf{x}_4))$ , რასაც შეესაბამება მარტივ სქემას (ნახ.1ბ).

ინვერსიისას, არამუშაუნარიობის ფუნქცია შეესაბამება შემდეგ გამოსახულებას:

$$\overline{s} = \overline{\overline{\mathbf{x}_1}}(\overline{\overline{\mathbf{x}_2}} + (\overline{\overline{\mathbf{x}_1}}(\overline{\overline{\mathbf{x}_2}} + (\overline{\overline{\mathbf{x}_3\mathbf{x}_4}})))) = \overline{\overline{\mathbf{x}_1}}(\overline{\overline{\mathbf{x}_2}} + (\mathbf{1}(\mathbf{0} + (\overline{\overline{\mathbf{x}_3\mathbf{x}_4}})))) = \overline{\overline{\mathbf{x}_1}}(\overline{\overline{\mathbf{x}_2}} + (\overline{\overline{\mathbf{x}_3\mathbf{x}_4}})) \quad (109)$$



ნახ. 29. ლოგიკური სტრუქტურის გარდაქმნა

ამგვარად, რთული სტრუქტურების საიმედოობის მახასიათებლების გაანგარიშებისას, გამოიყენება ლოგიკის ალგებრა, რაც დადის სისტემის მდგომარეობების  $Z(x)$  ლოგიკური ფუნქციების აგებაზე და გარდაქმნაზე, რომლის ბინარული ცვლადები ახასიათებენ  $x_i$  ელემენტების მდგომარეობას.

განვიხილოთ მონოტონური სისტემები შესაბამისი თვისებებით:

1. სისტემის თვითეული ელემენტი შეიძლება მდგომარეობდეს მხოლოდ შესაძლო მდგომარეობებში - მუშაუნარიანობა ან მტყუნება;
2. თვით სისტემა აგრეთვე შეიძლება მდგომარეობდეს მხოლოდ შესაძლო მდგომარეობებში - მუშაუნარიანობა ან მტყუნება;
3. თუ ყველა ელემენტი მუშაუნარიანობაშია, მაშინ სისტემაც მუშაუნარიანია;
4. თუ ყველა ელემენტი მტყუნებაშია, მაშინ სისტემაც მტყუნებაშია;
5. მტყუნებულ სისტემაში ხდება ელემენტის მტყუნება და შეუძლებელია მისი აღდგენა, მაშინ მუშაუნარიან სისტემაში ელემენტების მტყუნებამ არ შეიძლება გამოიწვიოს სისტემის მტყუნებას [65-69].

თუ სისტემა აკმაყოფილებს პირობებს 1 და 2, მათ სტრუქტურები ეწოდება. და ასევე დაკმაყოფილებულია პირობები 3, 4 და 5, მაშინ სტრუქტურებს მონოტონური ეწოდება.

ლოგიკური ფუნქცია  $Z(x)$  წარმოადგენს გარკვეული ხდომილების ამონაკრებს, რომლებიც შედიან რამდენიმე წევრების დიზუნქცია და



კონიუქცია. ასეთი ამონაკრები შედის ელემენტების, ყველა ელემენტების მიმდევრობით მდგომარეობში, ერთ-ერთი გზით წყაროდან - ჩამონადენში. ამ დროს შემოდის მინიმალური გზის ცნებას. გზას  $v$  ეწოდება ელემენტების სიმრავლეს, რომელთა მუშაუნარიანობა უზრუნველყოფს სისტემის მუშაუნარიან მდგომარეობას. მინიმალური გზა წარმოადგენს ისეთ გზას, რომლიდანაც ნებისმიერი თუნდაც ერთი ელემენტის გამორთვა იწვევს, რომ დარჩენილი ელემენტების ამონაკრეფი არარსებულ გზას. მაგალითად ნახ. 39-ზე ელემენტების სიმრავლე  $\{1,2\}$  წარმოადგენს გზას, მაგრამ არა მინიმალურს, რადგანაც ელემენტი 2-ის გამორთვა, არ იწვევს წყვეტას წყაროსა და ჩამონადენს შორის. ამავე დროს გზა  $\{2,3\}$  - მინიმალურია, რადგანაც ნებისმიერი ელემენტის გამორთვა იწვევს წყვეტას წყაროსა და ჩამონადენს შორის [70-75].

ანალოგიურად, თუ გვაქვს ელემენტების მტყუნების სიმრავლე, მაშინ შესაბამისად გვაქვს მტყუნება და მინიმალური კვეთა  $(\bar{u}_i)$ .

აღვნიშნოთ ხდომილებები  $v_i$ , რაც ნიშნავს, რომ ყველა ელემენტის გზები  $v_i$  მუშაობს, ხოლო ხდომილები  $\bar{u}_i$  -ს კვეთები - არ მუშაობს. სისტემა მდგომარეობს მუშაუნარიან მდგომარეობაში, თუ არსებობს ერთი გზა მაინც, ხოლო მტყუნების მდგომარეობაში გვაქვს ყველა ელემენტების მტყუნება ერთი კვეთისათვის მაინც. ამ შემთხვევაში,  $s$  მუშაუნარიანია, ხოლო მტყუნებაა -  $\bar{s}$ .

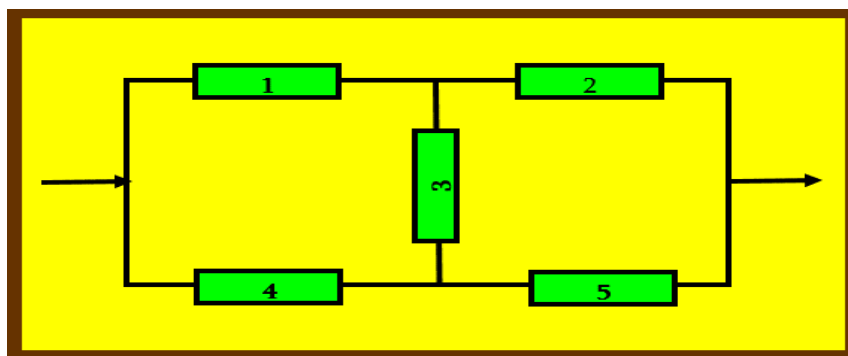
$$\begin{cases} s = v_1 \vee v_2 \vee \dots \vee v_n; \\ \bar{s} = u_1 \vee u_2 \vee \dots \vee u_n. \end{cases} \quad (110)$$

შეიძლება დამტკიცდეს, რომ  $s$  გამოსახება მხოლოდ მინიმალური გზებით  $\{t_i\}$ -ს საშუალებით, ხოლო  $\bar{s}$  - მხოლოდ მინიმალური კვეთები  $T\{c_i\}$ . მართლაც, თუ  $v_i$ -ში შედის გზები  $t_i$ ,  $v_i = \{t_i \wedge (z_1 \wedge \dots \wedge z_m)\}$ . ამ შემთხვევაში  $s$ -ის გამოსახულებასი შედის კონიუქცია:

$$t_i \vee v_i = t_i \vee \{t_i \vee (z_1 \wedge \dots \wedge z_m)\} = t_i \vee \{0 \vee (z_1 \wedge \dots \wedge z_m)\} = t_i, \quad (111)$$

და შეიძლება განხილული სიმრავლეების გზებიდან ამოღება. ანალოგიური შედეგი მიიღება მინიმალური კვეთების მიმართ.

მაგალითისათვის განვიხილოთ ქსელის (სისტემის) ორმაგი რგოლური ქვექსელი (ქვესისტემა) (ნახ. 30).



ნახ. 30. ორმაგი რგოლური ქვექსელი

შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ გვაქვს მინიმალური გზების ერთობლიობა:  $t_1 = (e_1, e_4)$ ;  $t_2 = (e_2, e_5)$ ;  $t_3 = (e_1, e_3, e_5)$ ;  $t_4 = (e_2, e_3, e_4)$  (ნახ. 31ა) ფუნქციონირებით შესაბამისი ალბათობებით:  $P_1 = p_1 p_4$ ;  $P_2 = p_2 p_5$ ;  $P_3 = p_1 p_3 p_5$ ;  $P_4 = p_2 p_3 p_4$ . სისტემის მუშაუნარიანობის ფუნქცია გაზის გადაცემის შერჩეული გზის მიმართ არის:  $Z = t_1 \vee t_2 \vee t_3 \vee t_4$ .

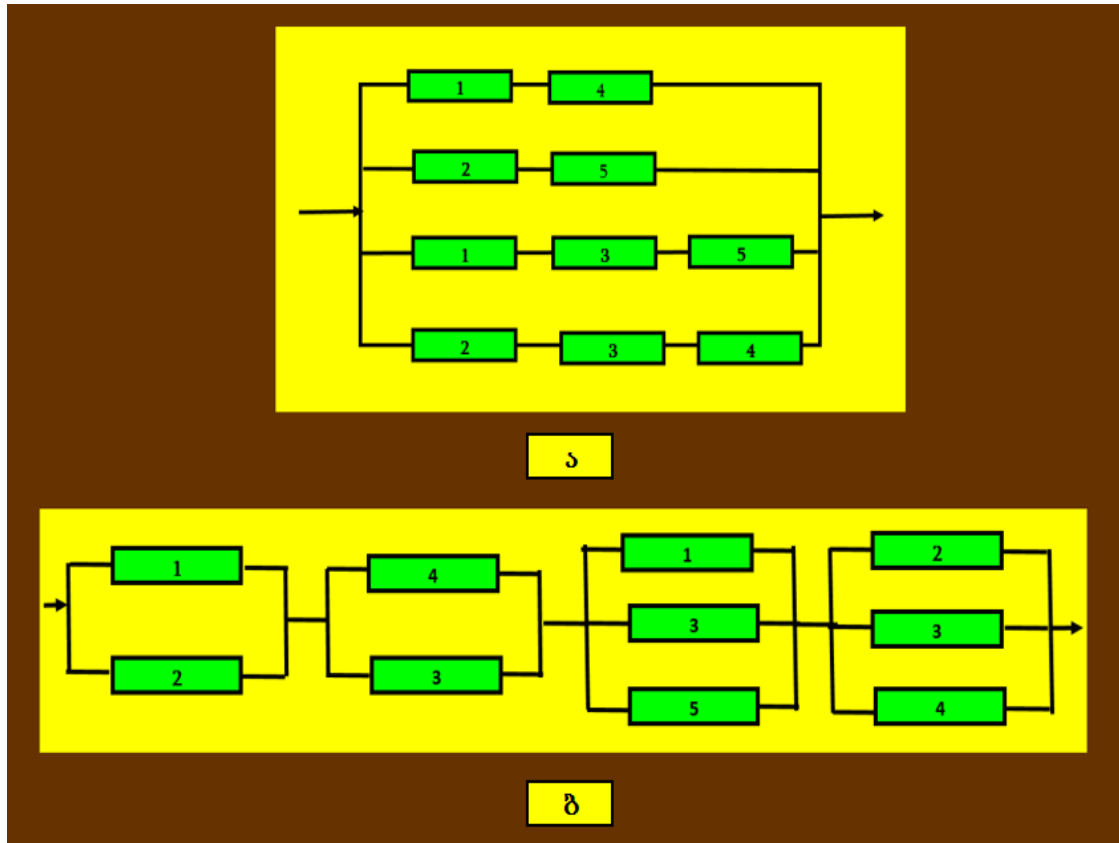
დიზიუნქციის ალბათობა ტოლია:

$$\begin{aligned}
 P(Z) &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P(t_1, t_2) - P(t_1, t_3) - P(t_1, t_4) - P(t_2, t_3) - P(t_2, t_4) - \\
 &- P(t_3, t_4) - P(t_1, t_2, t_3) + P(t_1, t_2, t_4) + P(t_1, t_3, t_4) + P(t_2, t_3, t_4) - P(t_1, t_2, t_3, t_4) = \\
 &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - P(e_1, e_2, e_4, e_5) - P(e_1, e_4, e_3, e_5) - P(e_1, e_2, e_3, e_4) - \\
 &- P(e_1, e_2, e_3, e_5) - P(e_2, e_3, e_4, e_5) + 2P(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + \\
 &+ p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_4 p_3 p_5 - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2p_1 p_2 p_3 p_4 p_5
 \end{aligned} \tag{112}$$

თუ გვაქვს მხოლოდ ერთ ტიპიანი ელემენტები ალბათობით  $p$ , მაშინ  $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = p$  და ალბათობის უმტყუნო მუშაობის ალბათობა ტოლი იქნება  $P(p) = 2p^2 + 2p^3 - 5p^4 + 2p^5$  (ნახ.32).

მინიმალური კვეთებით ამოცანის ამოხსნა შესაძლოა შემდეგი მინიმალური კვეთების ერთობლიობით:  $c_1 = \{e_1, e_2\}$ ;  $c_2 = \{e_4, e_5\}$ ;  $c_3 = \{e_1, e_3, e_5\}$ ;  $c_4 = \{e_2, e_3, e_4\}$  (ნახ. 31ბ) შესაბამისი ალბათობებით  $Q_1 = q_1 q_2$ ;

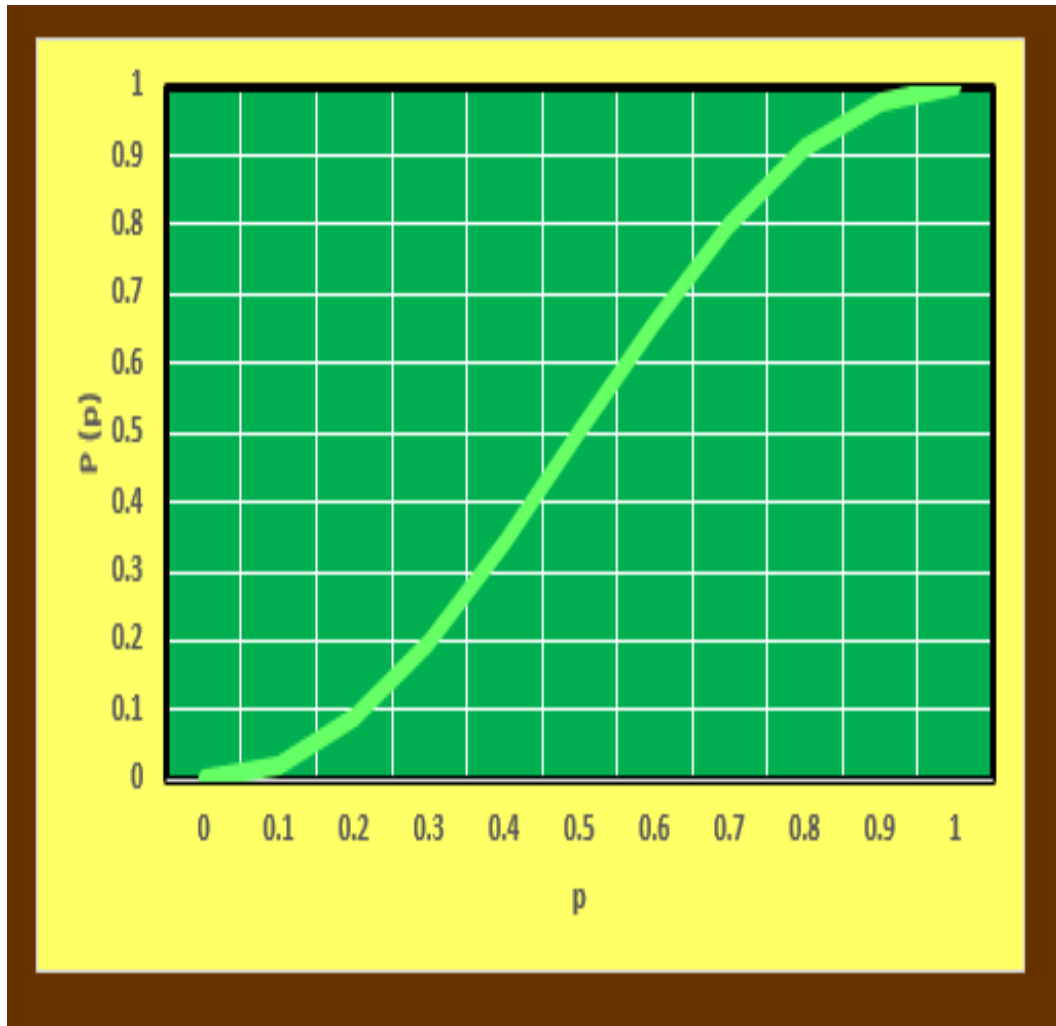
$Q_2 = q_4q_5$ ;  $Q_3 = q_1q_3q_5$ ;  $Q_4 = q_2q_3q_4$ . მტყუნების ფუნქციას გააჩნია შემდეგი გამოსახულება:  $Z = c_1 \vee c_2 \vee c_3 \vee c_4$ .



ნახ. 31. ექვივალენტური სქემები: ა. მინიმალური გზები; ბ. მინიმალური კვეთები

$$\begin{aligned}
 P(\bar{Z}) &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q(c_1, c_2) - Q(c_1, c_3) - Q(c_1, c_4) - Q(c_2, c_3) - Q(c_2, c_4) - \\
 &- Q(c_3, c_4) - Q(c_1, c_2, c_3) + Q(c_1, c_2, c_4) + Q(c_1, c_3, c_4) + Q(c_2, c_3, c_4) - Q(c_1, c_2, c_3, c_4) = \\
 &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q(e_1, e_2, e_4, e_5) - Q(e_1, e_4, e_3, e_5) - Q(e_1, e_2, e_3, e_4) - \\
 &- Q(e_1, e_2, e_3, e_5) - Q(e_2, e_3, e_4, e_5) + 2Q(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) = q_1q_4 + q_2q_5 + q_1q_3q_5 + \\
 &+ q_2q_3q_4 - q_1q_2q_4q_5 - q_1q_4q_3q_5 - q_1q_2q_3q_4 - q_1q_2q_3q_5 - q_2q_3q_4q_5 + 2q_1q_2q_3q_4q_5
 \end{aligned} \tag{113}$$

თუ ანალოგიურად გვაქვს მხოლოდ ერთ ტიპიანი ელემენტები ალბათობით  $q$ , მაშინ  $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = q$  და ალბათობის უმტყუნო მუშაობის ალბათობა ტოლი იქნება  $Q(q) = 2q^2 + 2q^3 - 5q^4 + 2q^5$  (ნახ.41). ცხადია, რომ მიღებული შედეგი თანხვდება მინიმალური გზებით და საშუალებით ანალოგიურ გამოსახულებას.



ნახ. 32. უმტყუნო მუშაობის გრაფიკი მინიმალური გზებით, ან კვეთებების საშუალებით

#### 4.1. გაზსადენის ორი პარალელური ხაზი და ზღუდარი

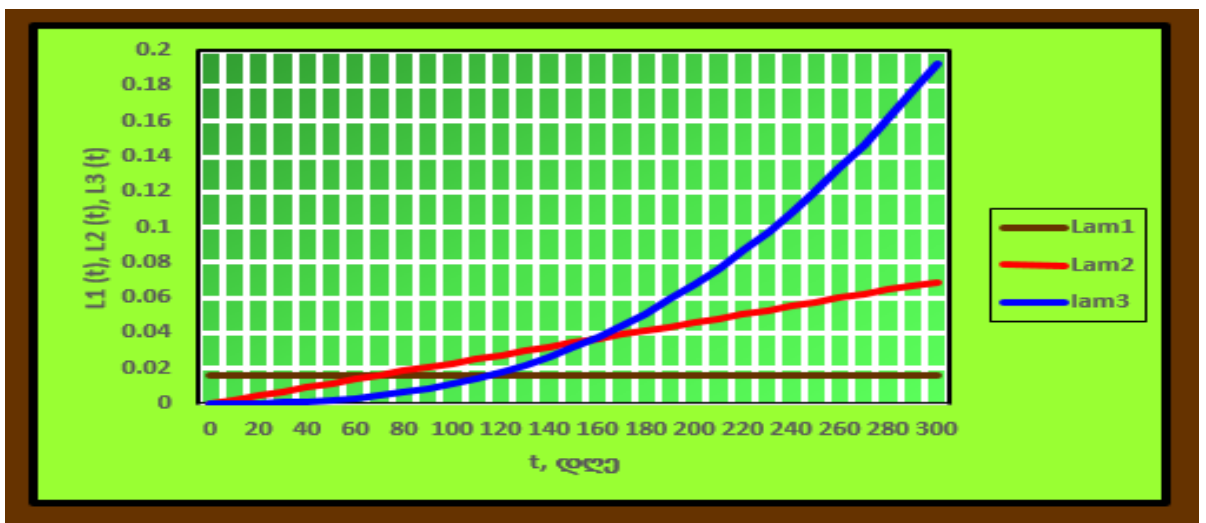
განვიხილოთ მილსადენის ორი პარალელური ხაზი და ზღუდარი. ზღუდარის მტყუნების საფრთხე მუდმივია და ტოლია  $\lambda_1(t) = 0,0016$  დღე<sup>-1</sup>. ორი მოწყობილობა წარმოადგენს ზღუდარის ჩამკეტ მოწყობილობას (ურდულს), რომლიც პირველი ავტომატურია, ჰიდრავლიკით (მტყუნების საფრთხე წრფივი  $\lambda_2(t) = 0,00023 \cdot t$  დღე<sup>-1</sup>). მეორე ჩამკეტი მოწყობილობა მექანიკურია (მტყუნების საფრთხე არაწრფივია  $\lambda_3(t) = 0,00000007 \cdot t^{2,6}$  დღე<sup>-1</sup>). (ნახ. 42).[81]

დავადგინოთ სისტემის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობა, გვექნება [59]:

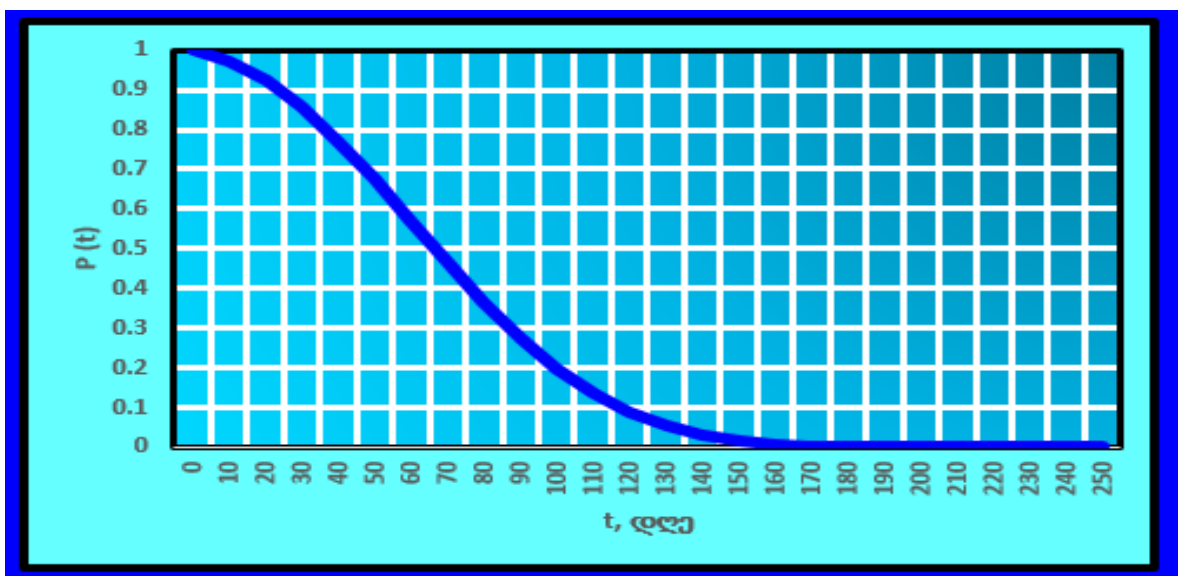
$$P_s(t) = \exp\left[-\sum_{i=1}^3 \lambda_i(t)\right] dt = \exp\left\{-\left[\int_0^t \lambda_1(t)dt + \int_0^t \lambda_2(t)dt + \int_0^t \lambda_3(t)dt\right]\right\} =$$

$$= \exp\left[-\left(0,0016 \cdot t + 0,00023 \frac{t^2}{2} + 0,00000007 \frac{t^{3,6}}{3,6}\right)\right] \quad (114)$$

ნახ. 34-ზე ნაჩვენებია სისტემის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობის გრაფიკი.



ნახ. 33. სისტემის მტყუნების საფრთხეები  $\lambda_1(t)$ ,  $\lambda_2(t)$  და  $\lambda_3(t)$



ნახ. 34. სისტემის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობის გრაფიკი

მაგალითისათვის განვსაზღვროთ სისტემის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობა, როდესაც  $t = 60$  დღე, ე.ი. ორი თვე. გვექნება [111-112]:

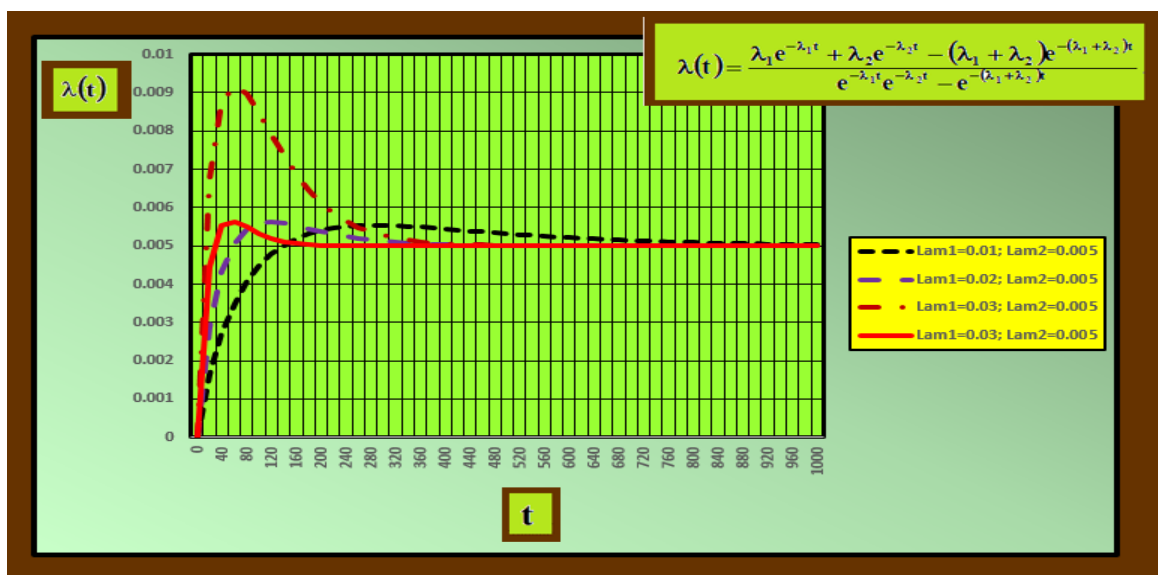
$$P_s(t) = \exp \left[ - \left( 0,0016 \cdot 60 + 0,00023 \frac{60^2}{2} + 0,00000007 \frac{60^{3,6}}{3,6} \right) \right] = 0,5034 \quad (115)$$

#### 4.2. არააღდგენადი სისტემის დუბლირების ნამუშევრის უმტყუნების მუშაობის ალბათობის განაწილების დადგენა, მსუბუქი რეზერვის სქემისას

განვიხილოთ უწყვეტი განაწილებები, კერძოდ მტყუნების მონოტონური საფრთხე. შემდგომ განვიხილოთ მტყუნების არამონოტონურ საფრთხის შესაბამისი განაწილების მაგალითი. ვთქვათ გვაქვს არააღდგენადი სისტემის დუბლირების ნამუშევრის უმტყუნობის მუშაობის ალბათობის განაწილება მსუბუქი რეზერვის სქემით, რომლის უმტყუნო მუშაობა განაწილებულია ექსპონენციალურად მტყუნების საფრთხეებით  $\lambda_1$  და  $\lambda_2$  [74]:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t}}{e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t}} \quad (116)$$

მტყუნების საფრთხეს ფუნქციების გრაფიკები ნაჩვენებია ნახ. 35-ზე.



ნახ. 35. მტყუნების საფრთხეს ფუნქციების გრაფიკები  $\lambda_1$  და  $\lambda_2$  -თვის

რადგანაც ცნობილია აღნიშნული მტყუნების საფრთხე, ამიტომ შესაძლოა დავადგინოთ ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

$$f(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (117)$$

ე.ო.

$$f(t) = \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}} e^{-\int_0^t \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}} dt} \quad (118)$$

განვსაზღვროთ განუსაზღვრელი ინტეგრალი, გვექნება:

$$I = \int_0^t \frac{ae^{-at} + be^{-bt} - (a+b)e^{-(a+b)t}}{ae^{-at} + be^{-bt} - e^{-(a+b)t}} dt \quad (119)$$

ვიგულისხმით, რომ ინტეგრალქვეშა ფუნქციაში, მნიშვნელი ნულს არ უდრის, ანუ

$$ae^{-at} + be^{-bt} - e^{-(a+b)t} \neq 0 \quad (120)$$

ე.ო.

$$ae^{-at} + be^{-bt} \neq 0 \quad (121)$$

თუ ეს პირობა დაირღვევა, მაშინ ინტეგრალი უნდა განვიხილოთ არასაკუთრივი აზრით, თუმცა აქაც საჭიროა კომის მთავარი მნიშვნელობით არასაკუთრივი ინტეგრალის განხილვა.

$$I = \int_0^t \frac{ae^{-at} + be^{-bt} - (a+b)e^{-(a+b)t}}{e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}} dt = \int_0^t -\frac{d(ae^{-at} + be^{-bt} - e^{-(a+b)t})}{e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}} \quad (122)$$

რადგანაც

$$\int \frac{du}{u} = \ln|u| + C \quad (123)$$

ამიტომ

$$I = -\left[ \ln|e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}| \right]_0^t = -\ln|e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}| + \ln|e^0 + e^0 - e^0| \quad (124)$$

ცხადია, რომ

$$e^0 = 1; \ln 1 = 0 \quad (125)$$

გვექნება:

$$I = -\ln|e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}| \quad (126)$$

განუსაზღვრული ინტეგრალი შესაძლოა სხვა სახით ჩავწეროთ:

$$I = -\ln|e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}| = \ln \frac{1}{|e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}|} = \ln \left| \frac{e^{(a+b)t}}{e^{at} + e^{bt} - 1} \right| \quad (127)$$

საბოლოოდ:

$$I = \int_0^t \frac{ae^{-at} + be^{-bt} - (a+b)e^{-(a+b)t}}{ae^{-at} + be^{-bt} - e^{-(a+b)t}} dt = -\ln|e^{-at} + e^{-bt} - e^{-(a+b)t}| \quad (128)$$

ამგვარად, საბოლოოდ ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია ტოლია [74]:

$$f(t) = -\frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}} \ln|e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}| \quad (129)$$

დავამტკიცოთ, რომ ინტეგრალი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციის ინტეგრალი 0-დან  $\infty$  -მდე ტოლია ერთის. ამიტომ გვექნება:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = -\int_0^{\infty} \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}} \ln|e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}| dt \quad (130)$$

აღვნიშნოთ:

$$e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = u \quad (131)$$

მაშინ

$$\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = -du \quad (132)$$

ახალი საზღვრები იქნება:

$$\begin{cases} t = 0; & u = 1. \\ t = \infty; & u = 0. \end{cases} \quad (133)$$

ამგვარად

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = \int_1^0 \frac{udu}{u} \quad (134)$$



ცნობილია, რომ

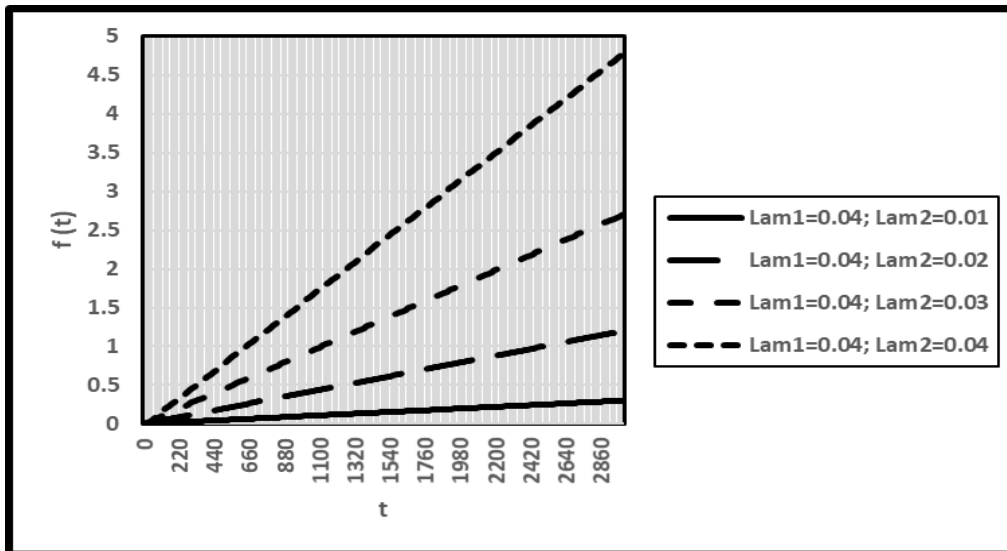
$$\int \frac{(\ln x)^n}{x} dx = \frac{(\ln x)^{n+1}}{n+1} \quad (135)$$

რადგანაც  $n = 1$ , ამიტომ

$$\int \frac{\ln x}{x} dx = \frac{(\ln x)^2}{2} \quad (136)$$

აქედან:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = \int_1^0 \frac{udu}{u} = \left[ \frac{(\ln u)^2}{2} \right]_1^0 = 1 \quad (137)$$



### 4.3. საიმედოობის პროცესები ალდგენის დროით გაზომვარაგებაში

განვიხილოთ ალდგენის პროცესის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის  $f(t)$  ფუნქცია:

$$f(t) = \mu^2 t e^{-\mu t}. \quad (138)$$

სადაც  $\mu$  - განაწილების პარამეტრია.

ცნობილია, რომ პროცესის ალდგენის ინტენსივობის ფუნქცია  $\mu(t)$  შემდეგია:

$$\mu(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (139)$$

სადაც  $P(t)$  არის განაწილების ალბათობის ფუნქცია. რადგანაც

$$P(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (140)$$

ამიტომ გვაქვს:

$$\begin{aligned} P(t) &= \int_0^t f(t) dt = \mu^2 \int_0^t t e^{-\mu t} dt = \left. \begin{array}{l} -\mu t = z; \quad dz = -\mu dt. \quad dt = -\frac{dz}{\mu}. \\ t_1 = 0; \quad z_1 = 0. \quad t_2 = t; \quad z_2 = -\mu t. \end{array} \right| = \\ &= \mu^2 \int_0^{-\mu t} \left( -\frac{z}{\mu} \right) e^z \left( -\frac{dz}{\mu} \right) = \int_0^{-\mu t} z e^z dz = [e^z(z-1)]_0^{-\mu t} = e^{-\mu t}(-\mu t - 1) - (-1) = \\ &= 1 - e^{-\mu t}(1 + \mu t) \end{aligned} \quad (141)$$

$\mu(t)$  ფუნქციისათვის გვექნება:

$$\mu(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\mu^2 t e^{-\mu t}}{1 - e^{-\mu t}(1 + \mu t)}. \quad (142)$$

განვიხილოთ მაგალითი. ვთქვათ  $\mu(t) = 0,01$  სთ<sup>-1</sup>. მაშინ ნახ. 36 ა-ზე ნაჩვენებია ალბათობის განაწილების სიმკვრივის  $f(t)$  ფუნქცია; ნახ.36 ბ-ზე -  $P(t)$  განაწილების ალბათობის ფუნქცია; ნახ. 36 გ-ზე - ინტენსივობის ფუნქცია  $\mu(t)$ .

აღვნიშნოთ  $\Omega(t)dt$  ისეთი ალბათობა, როდესაც დროის ინტერვალზე  $(t, t + dt)$  მოხდება აღდგენა. ჩავთვალოთ, რომ აღდგენის ნაკადები ორდინარულია, ე.ი. ორი ხდომილების თანხვედრა უგულვებელყოფილია. სიდიდეს  $\Omega(t)$ -ს ეწოდება აღდგენის ნაკადის პარამეტრი. იგი წარმოადგენს აღდგენადი მოწყობილობის დიფერენციალურ ალბათობას.

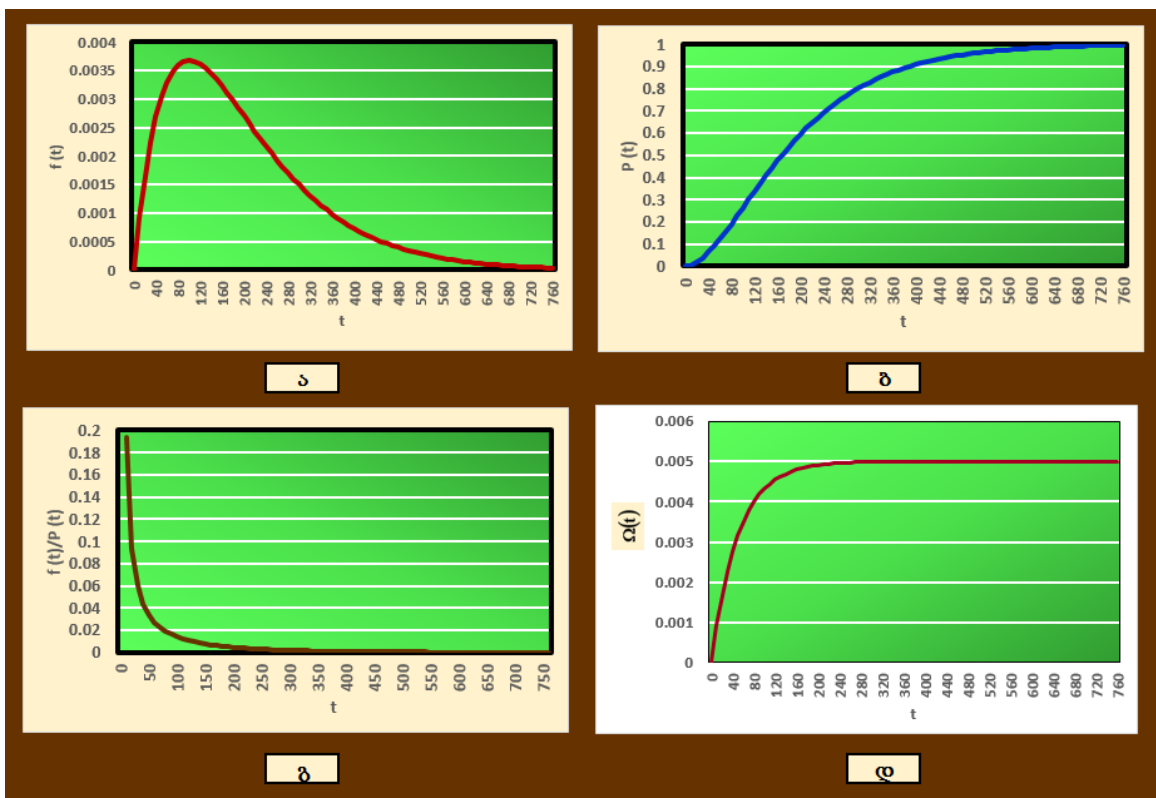
შემოსაზღვრული შედეგით აღდგენის ორდინარული ნაკადებისათვის  $\Omega(t)$  და  $\mu(t)$  დაკავშირებულია ვოლტერას მეორე რიგის ინტეგრალური განტოლებით

$$\Omega(t) = \mu(t) + \int_0^t \Omega(t)\mu(t-\tau) d\tau, \quad (143)$$

რომელიც, როგორც წესი, იხსნება რიცხვითი მიმდევრობითი მიახლოებითი მეთოდებით.

აღდგენის ნაკადის პარამეტრის  $\Omega(t)$ -ს ძირითადი თვისებების განსაზღვრისათვისას გამოვიყენოთ ლაპლასის გარდაქმნა. (143)  
გამოსახულების მეორე წევრი წარმოადგენს ხვეულს და ამიტომ

$$\Omega(p) = \Omega(p)\mu(p) + \mu(p). \quad (144)$$



ნახ. 36. ა. ალბათობის განაწილების სიმკვრივის  $f(t)$  ფუნქცია; ბ.  $P(t)$  განაწილების ალბათობის ფუნქცია; გ. ინტენსივობის ფუნქცია  $\mu(t)$ ; დ. აღდგენის ნაკადის  $\Omega(t)$  ფუნქცია

აქედან განტოლება (141) ოპერატორულ ფორმაში იღებს შემდეგ სახეს:

$$\Omega(p) = \frac{\mu(p)}{1 - \mu(p)}, \quad (145)$$

ანდა

$$\mu(p) = \frac{\Omega(p)}{1 + \Omega(p)}. \quad (146)$$

თანაფარდობები (143) და (144) საშუალებას გვაძლევს ერთი მახასიათებლის მოძებნას, თუ მეორე ცნობილია და შესაბამისად თუ ფუნქციებისათვის  $\mu(p)$  და  $\Omega(p)$  არსებობს ლაპლასის გარდაქმნა, მაშინ შესაძლოა (72) და (73) -ს უკუგარდაქმნა.

გამოვიყენოთ ფორმულა (143), რისთვისაც ჩავატაროთ აღდგენების ინტენსივობების ლაპლასის გარდაქმნა  $\mu(t)$ :

$$\mu(p) = \int_0^{\infty} \mu(t)e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} \mu^2 te^{-(\mu+p)t} dt = \frac{\mu^2}{(\mu+p)^2}. \quad (147)$$

შევიტანოთ მიღებული მნიშვნელობა (143)-ში, მივიღებთ:

$$\Omega(p) = \frac{\mu(p)}{1-\mu(p)} = \frac{\mu^2}{p(p+2\mu)}. \quad (148)$$

$\Omega(t)$ -ს მოსაძებნად ჩავატაროთ  $\Omega(p)$  ფუნქციის ლაპლასის უკუგარდაქმნა. მნიშვნელის ფესვები ტოლია:

$$p_1 = 0; \quad p_2 = -2\mu. \quad (149)$$

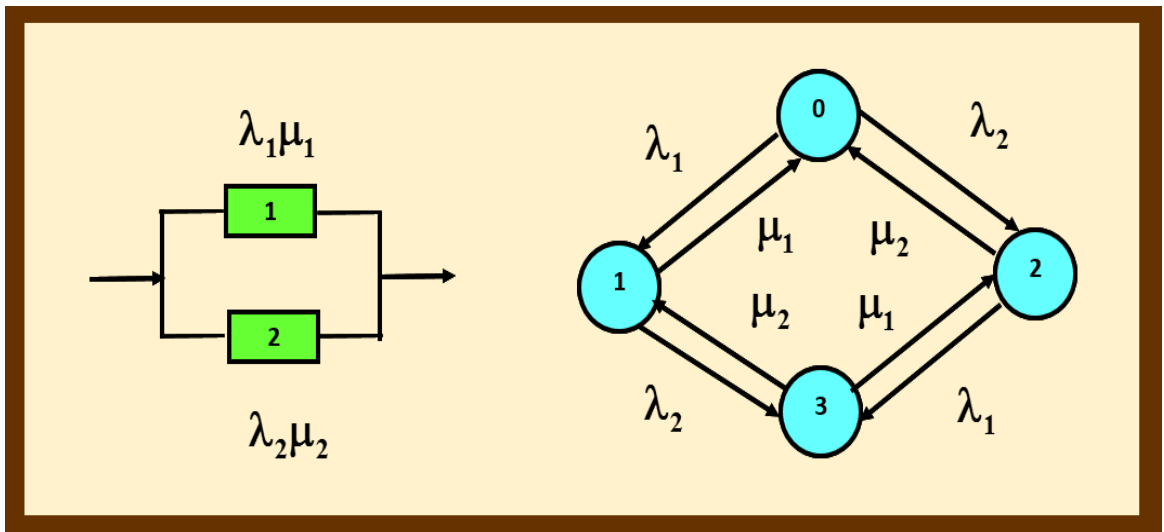
ამიტომ გარდაქმნის შემდეგ გვაქვს:

$$\Omega(t) = \mu^2 \left( \frac{1}{2\mu} - \frac{e^{-2\mu t}}{2\mu} \right) = \frac{\mu}{2} (1 - e^{-2\mu t}). \quad (150)$$

#### 4.4. რეზერვების საკითხები გაზომომარაგებაში

მარკოვის მოდელების განზომილების პრობლემა, მაინც ბოლომდე არ სრულდება. იგი დაკავშირებულია მოდელის შესასვლელის აღწერის სიმძნელებთან. მარკოვის გრაფიკი, მრავალი კვანძით შეადგენს მეტად რთულ ამოცანას და დაკავშირებულია ადამიანის ფაქტორთან. ამიტომ განვიხილოთ არის თუ შეუძლებელი გარკვეული ყველა მდგომარეობების უგულვებელყოფა, შესაძლებელია თუ არა გარკვეული მდგომარეობების გამორიცხვა და ფორმალური წესებით გარკვეული გამსხვილება.

მარკოვის პროცესის მდგომარეობების გამსხვილება შესაძლებელია იყოს ზუსტი, ან მიახლოებითი. ამიტომ, ამ მაგალითზე განვიხილოთ რეალიზაციის ზუსტი გამსხვილება. ვთქვათ ვიხილავთ სხვადასხვა საიმედოობის მქონე ელემენტების სისტემას, კერძოდ დუბლირებულ სისტემას, მტყუნების საფრთხეებით  $\lambda_1, \lambda_2$  და აღდგენის ინტენსივობებით  $\mu_1, \mu_2$  (ნახ. 37). აქ 0 - არის მუშაუნარიანობის მდგომარეობა, 1 და 2 - ცალკეული მტყუნების მუშაუნარიანობის მდგომარეობები, 3 - სისტემის მტყუნება. იგივე ნახაზზე ნაჩვენებია ორიენტირებული გრაფიკი, შესაბამისი ინტენსივობებით.



ნახ. 37. სხვადასხვა საიმედოობის ელემენტების დუბლირებული სისტემა

მარკოვის პროცესის მდგომარეობები იანგარიშება კოლმოგოროვის დიფერენციალური განტოლებების სისტემით [59-62]:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - (\lambda_2 + \mu_1)P_1(t) + \mu_2 P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - (\lambda_1 + \mu_2)P_2(t) + \mu_1 P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) - (\mu_1 + \mu_2)P_3(t). \end{cases} \quad (151)$$

საწყისი პირობაა:  $P_0(0) = 1; P_1(0) = P_2(0) + P_3(0) = 1.$

ჩავატაროთ (149) დიფერენციალური განტოლებების სისტემის ლაპლასის პირდაპირი გარდაქმნას:

$$\begin{cases} sP_0(s) - 1 = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(s) + \mu_1 P_1(s) + \mu_2 P_2(s); \\ sP_1(s) = \lambda_1 P_0(s) - (\lambda_2 + \mu_1)P_1(s) + \mu_2 P_3(s); \\ sP_2(s) = \lambda_2 P_0(s) - (\lambda_1 + \mu_2)P_2(s) + \mu_1 P_3(s); \\ sP_3(s) = \lambda_2 P_1(s) + \lambda_1 P_2(s) - (\mu_1 + \mu_2)P_3(s). \end{cases} \quad (152)$$

მახასიათებელი განტოლების  $|\mathbf{Q} - s\mathbf{E}| = 0$  არის შემდეგი ფესვები, სადაც  $\mathbf{Q}$  არის ინფინიტეზიმალური მატრიცა, ხოლო  $\mathbf{E}$  - ერთეულოვანი მატრიცა. ფესვები შემდეგია:

$$\begin{cases} S_1 = 0; \\ S_2 = -(\lambda_1 + \mu_1); \\ S_3 = -(\lambda_2 + \mu_2); \\ S_4 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2). \end{cases} \quad (153)$$

აღვნიშნოთ

$$\begin{cases} S_1 = 0; \\ S_2 = -\beta; \\ S_3 = -\gamma; \\ S_4 = -(\beta + \gamma). \end{cases} \quad (154)$$

$$\begin{cases} \beta = \lambda_1 + \mu_1; \\ \gamma = \lambda_2 + \mu_2 \\ \beta + \gamma = \lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2. \end{cases} \quad (155)$$

შემდეგ, დავშალოთ  $P_i(s)$  მარტივ წილადებად და ავსახოთ ლაპლასის უკუგარდაქმნა სტანდარტული ფორმულით. მივიღებთ:

$$\begin{cases} P_0(t) = \frac{1}{\beta\gamma} (\mu_1\mu_2 + \lambda_1\mu_2 e^{-\beta t} + \lambda_2\mu_1 e^{-\gamma t} + \lambda_1\lambda_2 e^{-(\beta+\gamma)t}); \\ P_1(t) = \frac{1}{\beta\gamma} (\lambda_1\mu_2 - \lambda_1\mu_2 e^{-\beta t} + \lambda_1\lambda_2 e^{-\gamma t} - \lambda_1\lambda_2 e^{-(\beta+\gamma)t}); \\ P_2(t) = \frac{1}{\beta\gamma} (\lambda_2\mu_1 + \lambda_1\lambda_2 e^{-\beta t} - \mu_1\lambda_2 e^{-\gamma t} - \lambda_1\lambda_2 e^{-(\beta+\gamma)t}); \\ P_3(t) = 1 - \sum_{i=0}^3 P_i(t) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\beta\gamma} (1 - e^{-\beta t} - e^{-\gamma t} + e^{-(\beta+\gamma)t}) \end{cases} \quad (156)$$

თუ  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ;  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ , მაშინ:

$$\begin{cases} \beta = \lambda + \mu; \\ \gamma = \beta = \lambda + \mu; \\ \beta + \gamma = 2\beta = 2(\lambda + \mu); \\ \beta\gamma = \beta^2 = (\lambda + \mu)^2. \end{cases} \quad (157)$$

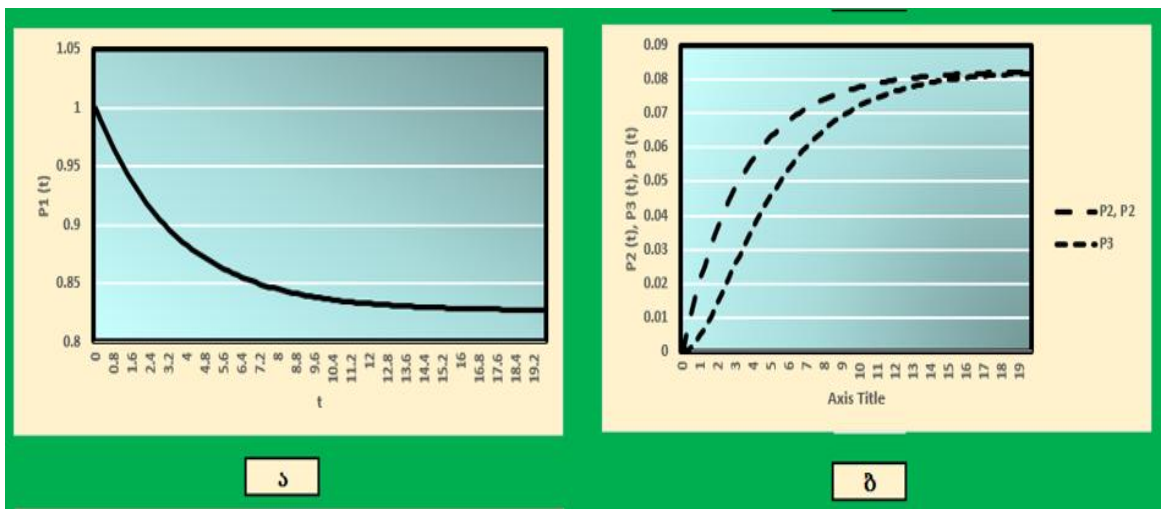
საბოლოოდ, მდგომარეობების ფუნქციები იქნება:

$$\begin{cases} P_0(t) = \frac{1}{(\lambda + \mu)^2} [\mu^2 + 2\lambda\mu e^{-(\lambda+\mu)t} + \lambda^2 e^{-2(\lambda+\mu)t}]; \\ P_1(t) = P_2(t) = \frac{1}{(\lambda + \mu)^2} [\lambda\mu + \lambda(\lambda - \mu)e^{-(\lambda+\mu)t} - \lambda^2 e^{-2(\lambda+\mu)t}]; \\ P_3(t) = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2} [1 - 2e^{-(\lambda+\mu)t} + e^{-2(\lambda+\mu)t}]. \end{cases} \quad (158)$$

თუ ჩავთვლით, რომ  $\lambda = 0,01$ , ხოლო  $\mu = 0,1$ , მაშინ, მდგომარეობების ფუნქციები ნაჩვენებია ნახ. 38.-ზე.

აქედან მივიღებთ სხვადასხვა ორი ელემენტის მქონე დუბლირებული სისტემის სტაციონარული მზადყოფნის კოეფიციენტს:

$$K_r(t) = \sum_{i=0}^3 P_i(t). \quad (159)$$



ნახ. 38. მდგომარეობების ფუნქციები: ა.  $P_0(t)$ ;  $P_1(t) = P_2(t)$ ;  $P_3(t)$

ზოგადად, მდგომარეობების სტაციონარული ალბათობები, ტოლია:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = \frac{\mu_1 \mu_2}{\beta \gamma}; \\ P_1 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{\beta \gamma} \\ P_2 = \frac{\lambda_2 \mu_1}{\beta \gamma} \\ P_3 = 1 - \sum_{i=0}^3 P_i = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\beta \gamma} \end{array} \right. \quad (160)$$

სისტემის სტაციონარული მზადყოფნის კოეფიციენტი ტოლია:

$$K_T = \frac{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}. \quad (161)$$

ერთნაირი ელემენტების სისტემისათვის გვექნება:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = \frac{\mu^2}{\beta \gamma}; \\ P_1 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{\beta \gamma} \\ P_2 = \frac{\lambda_2 \mu_1}{\beta \gamma} \\ P_3 = 1 - \sum_{i=0}^3 P_i = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\beta \gamma} \end{array} \right. \quad (162)$$

$$K_T = P_0 + P_1 + P_2 = \frac{\mu^2 + 2\lambda\mu}{(\lambda + \mu)^2}. \quad (163)$$

ვცადოთ შევკვიცოთ მდგომარეობის მოდელის სივრცე, ორი მდგომარეობის 1 და 2 - ერთში. ეს შეესაბამება სიტუაციას როდესაც ერთი ელემენტი მუშაობს, ხოლო მეორე მტყუნებაშია და ხდება მისი აღდგენა. ე.ი. ჩვენ არ უნდა განვასხვავოთ, თუ რომელიმე ელემენტი მუშაობაშია, ხოლო მეორე - მტყუნებაში (ნახ. 39). თუ ელემენტების მტყუნების საფრთხეები და აღდგენები სხვადასხვაა, მაშინ მარკოვის თვისება ამ დროს ირღვევა. თუ განზოგადოებულ (გამსხვილებულ) მდგომარეობაში გადასვლა ხდება 1 ელემენტის მტყუნება, მაშინ ელემენტის 2-ის დაკავშირებულია მტყუნებასთან 2 და ელემენტი 1-ის აღდგენა. თუ გვაქვს ელემენტი 2-ის

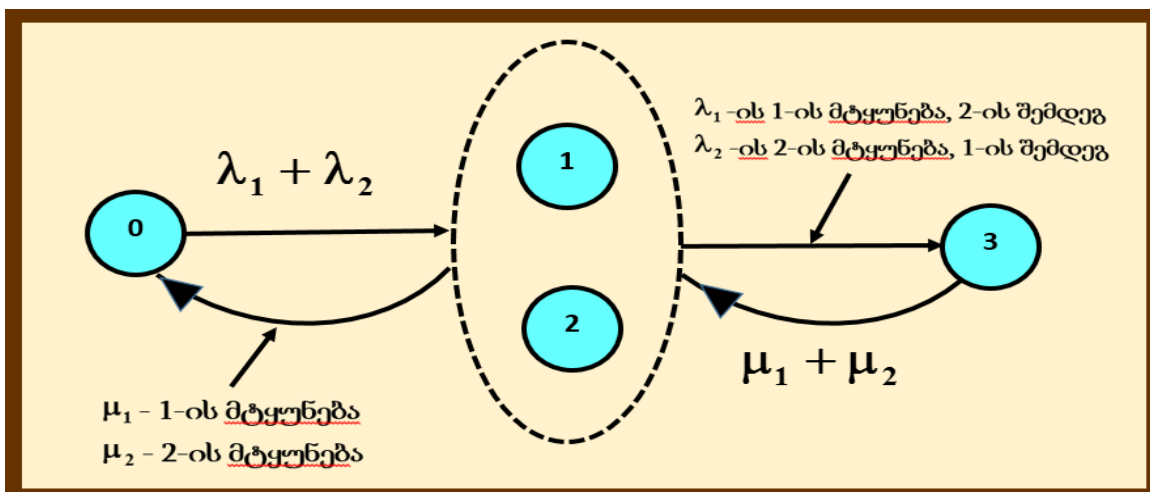


მტყუნება - მაშინ პირიქით. მარკოვის პროცესისათვის აქ საინტერესოა, თუ როგორ ხვდება მდგომარეობაში, როდესაც გვაქვს სტარტი. ადგილზეა შედეგის არარსებობის თვისება - წარსულს აქვს მნიშვნელობა და ინტენსივობის შესვლის დაწერა გამსხვავებულში - არ შეიძლება. ამ შემთხვევაში უნდა ავაგოთ მიახლოებითი გამსხვავებული მოდელი, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 40-ზე.  $\lambda_3$  და  $\mu_3$  გადასვლის ექვივალენტური ინტენსივობები მიახლოებითი მოდელით გაანგარიშება შემდეგი ფორმულებით:

$$\begin{cases} \lambda_3 = \lambda_2 \frac{P_1}{P_1 + P_2} + \lambda_1 \frac{P_2}{P_1 + P_2}; \\ \mu_3 = \mu_1 \frac{P_1}{P_1 + P_2} + \mu_2 \frac{P_2}{P_1 + P_2}. \end{cases} \quad (164)$$

აქ  $P_1$  და  $P_2$  გაანგარიშდება ფორმულებით  $\frac{P_1}{P_1 + P_2}$  წარმოადგენს, რომ სტაციონარობის პირობითი ალბათობა იმისა, რომ პირობაა თუ მტყუნება გვაქვს ერთი ელემენტისათვის, ან - მეორე. ანალოგიურად  $\frac{P_2}{P_1 + P_2}$  თუ პირველი იცვლება მეორით და პირიქით. ასეთი საწყისი (არაგამსხვილებულ) პროცესის გამსხვავება დამოკიდებულია მტყუნებისა და აღდგენის თანაფარდობაზე. რაც მეტია განსხვავება  $\lambda_3$ -სა და  $\mu_3$ -ს შორის, მით ზუსტია მიახლოება.

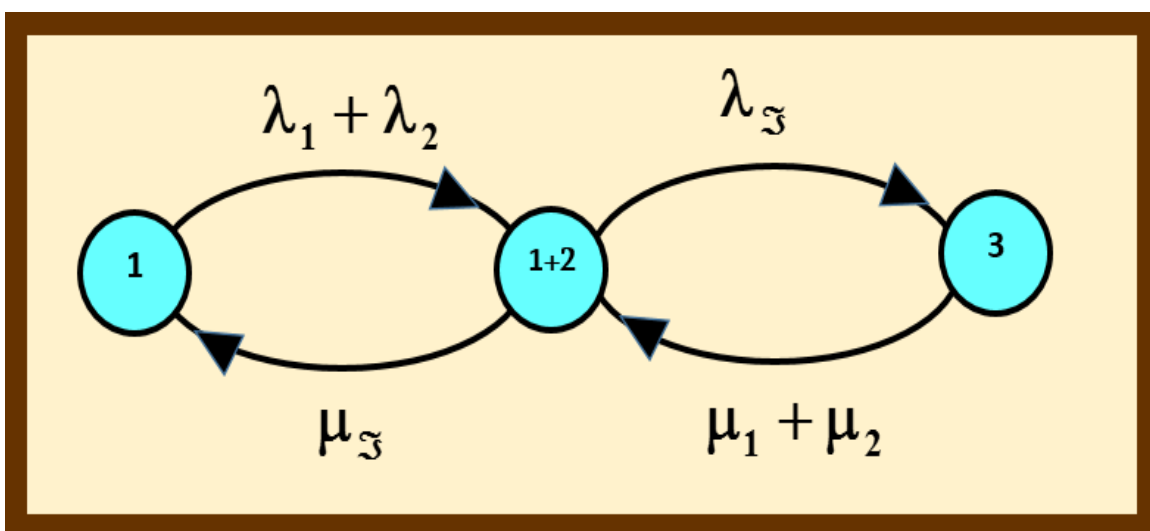
უმრავლეს შემთხვევებში, რეზერვირებული სისტემები ფორმირდება ერთნაირი ელემენტებისაგან. განვიხილოთ თანაბარი საიმედოობის მქონე დუბლირებული სისტემა ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ;  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ ). ამ სისტემის მოდელისათვის (ნახ. 41) გამსხვილებული მდგომარეობის ინტენსივობების შესვლა - ერთნაირია და არ არის დამოკიდებული, თუ როგორ მოხდა მასში შესვლა. ამ შემთხვევაში, გამსხვილება კორექტურია და არ არღვევს მარკოვის თვისებას.



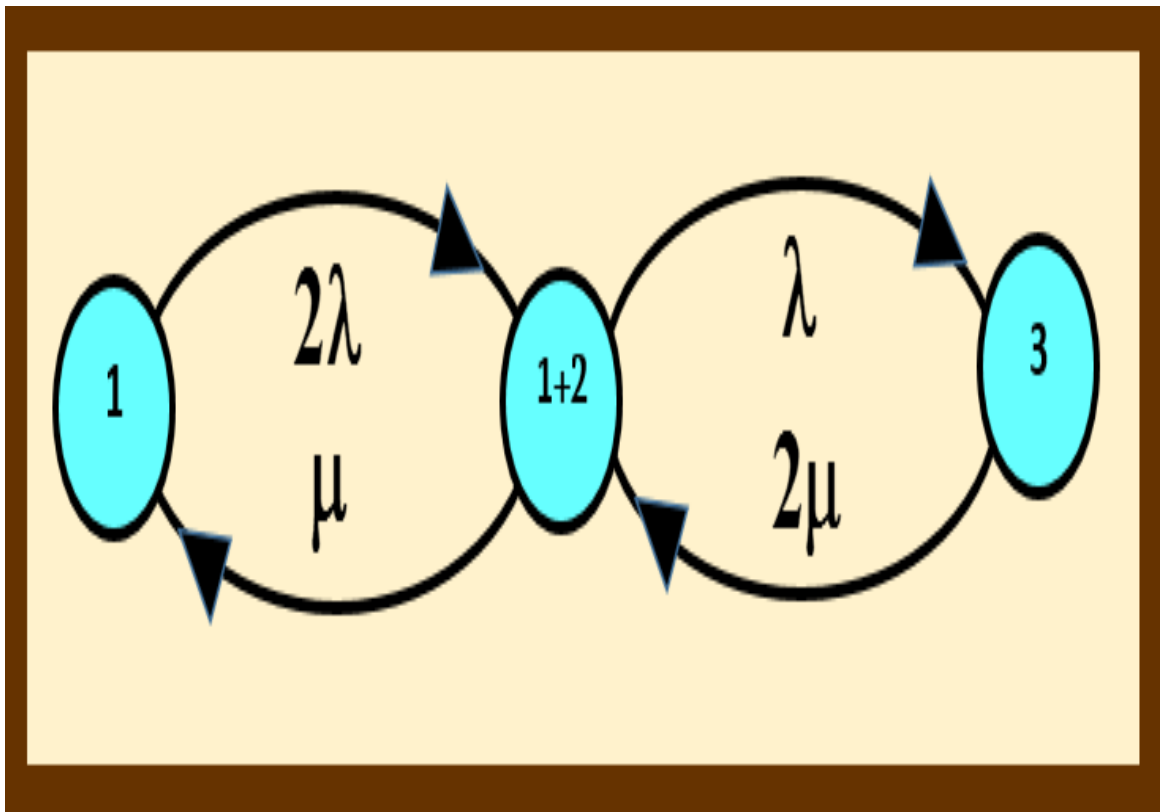
ნახ. 39. სხვადასხვა ელემენტების მქონე დუბლირებული სისტემის ერთჯერადი მტყუნების მარკოვის მოდელი გამსხვილებული მდგომარეობის მცდელობა

ამგვარად, მარკოვის მოდელის მდგომარეობების გასხვილება შესაძლებელია შემდეგი პირობებისათვის:

1. გადასვლა თვითეული მდგომარეობისათვის შესაძლოა მხოლოდ იგივე მდგომარეობებში, ე.ი. თუ გადასვლა ერთი მდგომარეობიდან, რომელიც გამსხვილებულია ერთში, მაშინ გადასვლა გარკვეულ ქვესიმრავლის სხვა მდგომარეობაში, მაშინ ამ სხვა მდგომარეობიდან მსხვილდება ერთად და გადასვლა იგივე ქვესიმრავლის მდგომარეობაში.



ნახ. 40. სხვადასხვა ელემენტების მქონე დუბლირებული სისტემის ერთჯერადი მტყუნების მარკოვის მოდელი მიახლოებითი გამსხვილებული მდგომარეობა



ნახ. 41. ერთნაირი ელემენტების მქონე დუბლირებული სისტემის ერთჯერადი მტყუნების მარკოვის მოდელი ზუსტი გამსხვილებული მდგომარეობისათვის

2. ერთიან გამსხვილებულში, მდგომარეობიდან ინტენსივობების გამოსვლა - უნდა იყოს ერთნაირი. ამ 1 და 2 პირობებისათვის, უნდა ვიხელმძღვანელოთ შემდეგი წესებით:

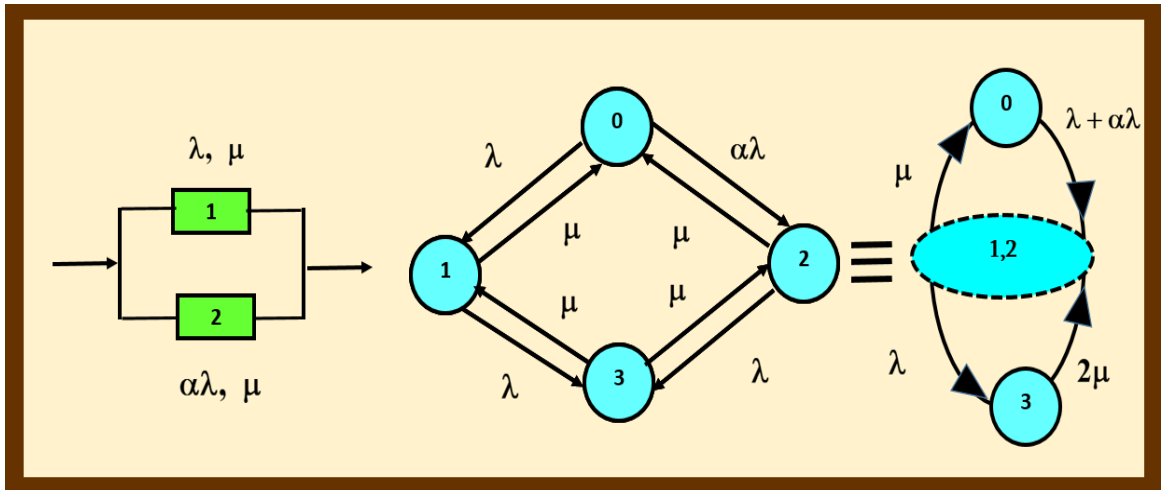
- ინტენსივობის გადასვლა გამსხვილებულ მდგომარეობაში უდრის ინტენსივობების გადასვლის ჯამს, თვითეულ გამსხვილებულ მდგომარეობაში.

- ინტენსივობების გადასვლა გამსხვილებულ მდგომარეობიდან ტოლია ინტენსივობების გამოსვლა ერთი გამსხვილებული მდგომარეობიდან.

ამასთან დაკავშირებით განვიხილოთ მარკოვის მოდელი გამსხვილებული მდგომარეობების აღდგენადი დუბლირებული სისტემა შემსუბუქებულ რეზერვის ელემენტისათვის (ნახ. 42). შემსუბუქებულ რეზერვის მტყუნების ინტენსივობა =  $\alpha\lambda$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ).

დიფერენციალური განტოლებების სისტემა შემდეგია:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \alpha\lambda)P_0(t) + \mu P_1(t) + \mu P_2(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_1(t) + \mu P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \alpha\lambda P_0(t) - (\lambda + \mu)P_2(t) + \mu P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda P_1(t) + \lambda P_2(t) - 2\mu P_3(t). \end{cases} \quad (165)$$



ნახ. 42. შემსუბუქებული რეზერვიანი დუბლირებული სისტემის მარკოვის მოდელი

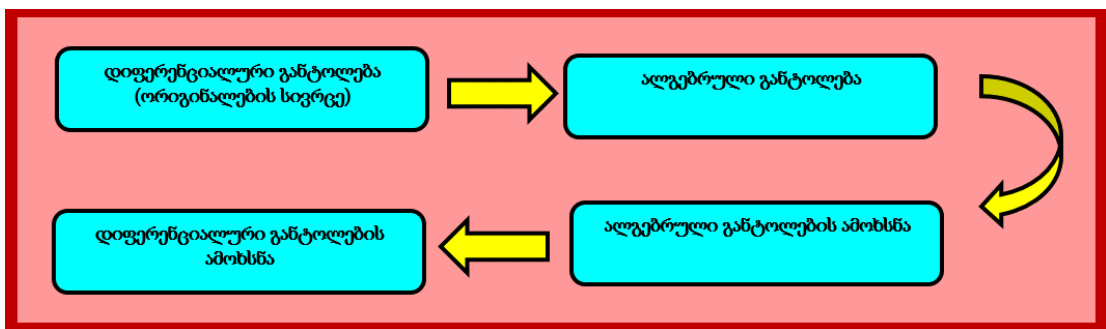
ამ მოდელში შესაძლოა გამსხვილდეს მდგომარეობები 1 და 2. გამსხვილების შემდეგ მივიღებთ დიფერენციალურ განტოლებების სისტემას:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \alpha\lambda)P_0(t) + \mu P_{1,2}(t); \\ \frac{dP_{1,2}(t)}{dt} = (\lambda + \alpha\lambda)P_0(t) - (\lambda + \mu)P_{1,2}(t) + 2\mu P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda P_{1,2}(t) - 2\mu P_3(t) \end{cases} \quad (166)$$

აღსანიშნავია, რომ სისტემა (95) შეიძლება მივიღოთ ფორმალურად, 1 და 2 მდგომარეობების განტოლებების შეკრებით  $\left( \frac{dP_{1,2}(t)}{dt} = \frac{dP_1(t)}{dt} + \frac{dP_2(t)}{dt} \right)$ . სისტემა (94) სრულად იდენტურია (95)-თან, რაც გვიჩვენებს საწყისი და გამსხვილებული გადასასვლებლების გრაფიკს (ნახ. 42).

#### 4.5. საიმედოობის სამი მდგომარეობის მქონე გრაფი გაზომომარაგებაში

ამ ნაწილში განიხილება კოლმოგოროვის საიმედოობის სამი მდგომარეობის მქონე გრაფიკის დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის მეთოდი. ამოხსნის სქემა შემდეგია: განიხილება დიფერენციალური განტოლებების სისტემა დროის  $t$ -ს მიხედვით (ორიგინალების სივრცე)  $\Rightarrow$  ლაპლასის გარდაქმნა და ვლუბულობთ ალგებრული განტოლების სისტემას კომპლექსური ცვლადის  $p$ -ს მიხედვით  $\Rightarrow$  ამოიხსნება ალგებრული განტოლების სისტემა (ასახვის სივრცეში)  $\Rightarrow$  ლაპლასის უკუგარდაქმნის კვლავ შემდეგ მიიღება ამონახსნები დროის  $t$ -ს მიხედვით (ორიგინალების სივრცე) (ნახ. 43).



ნახ. 43. საიმედოობის სამი მდგომარეობის მქონე გრაფის დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის მეთოდის სქემა

განვიხილოთ სამი მდგომარეობის მქონე გრაფიკი (ზოგადი შემთხვევა) და გვაქვს გადასვლის ინტენსივები  $a_{ij}$ :

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = a_{11}P_1(t) + a_{12}P_2(t) + a_{13}P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = a_{21}P_1(t) + a_{22}P_2(t) + a_{23}P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = a_{31}P_1(t) + a_{32}P_2(t) + a_{33}P_3(t). \end{cases} \quad (167)$$

საწყისი პირობებისათვის გვაქვს:

$$P_1(0) = 1; P_2(0) = P_3(0) = 0. \quad (168)$$

მოვახდინოთ (118) სისტემის ლაპლასის გარდაქმნა. გვექნება:

$$\begin{cases} P_1(p) = \frac{a_{11}}{p} P_1(p) + \frac{a_{12}}{p} P_2(p) + \frac{a_{13}}{p} P_3(p) + \frac{1}{p}; \\ P_2(p) = \frac{a_{21}}{p} P_1(p) + \frac{a_{22}}{p} P_2(p) + \frac{a_{23}}{p} P_3(p); \\ P_3(p) = \frac{a_{31}}{p} P_1(p) + \frac{a_{32}}{p} P_2(p) + \frac{a_{33}}{p} P_3(p); \end{cases} \quad (169)$$

მეორე განტოლებიდან:

$$\left(1 - \frac{a_{22}}{p}\right) P_2(p) = \frac{a_{21}}{p} P_1(p) + \frac{a_{23}}{p} P_3(p) \quad (170)$$

$$\left(\frac{p - a_{22}}{p}\right) P_2(p) = \frac{a_{21}}{p} P_1(p) + \frac{a_{23}}{p} P_3(p) \quad (171)$$

$$(p - a_{22}) P_2(p) = a_{21} P_1(p) + a_{23} P_3(p) \quad (172)$$

$$P_2(p) = \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} P_1(p) + \frac{a_{23}}{(p - a_{22})} P_3(p) \quad (173)$$

მიღებული გამოსახულება  $P_2(p)$  ჩავსვამთ პირველ განტოლებაში:

$$P_1(p) = \frac{a_{11}}{p} P_1(p) + \left[ \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} P_1(p) + \frac{a_{23}}{(p - a_{22})} P_3(p) \right] + \frac{a_{13}}{p} P_3(p) + \frac{1}{p} \quad (174)$$

$$P_1(p) = \left[ \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} \right] P_1(p) + \left[ \frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p - a_{22})} \right] P_3(p) + \frac{1}{p} \quad (175)$$

$$P_1(p) = \frac{\frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p - a_{22})}}{\left[ 1 - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} \right]} P_3(p) + \frac{1}{p} \frac{1}{\left[ 1 - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} \right]} \quad (176)$$

$$P_1(p) = \frac{\frac{a_{13} a_{23}}{p(p-a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p-a_{22})} - \frac{a_{11} a_{21}}{p(p-a_{22})} \right]} P_3(p) + \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11} a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \quad (177)$$

$$P_1(p) = \frac{a_{13} a_{23}}{(1-a_{11} a_{21})} P_3(p) + \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11} a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \quad (178)$$

$$P_2(p) = \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \left\{ \frac{a_{13} a_{23}}{(1-a_{11} a_{21})} P_3(p) + \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11} a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} P_3(p) \quad (179)$$

$$P_2(p) = \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13} a_{23}}{(1-a_{11} a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] P_3(p) + \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11} a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \quad (180)$$

აქედან მივიღებთ:

$$P_3(p) = \frac{a_{31}}{p} \left\{ \frac{\frac{a_{13} a_{23}}{p(p-a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p-a_{22})} - \frac{a_{11} a_{21}}{p(p-a_{22})} \right]} P_3(p) + \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11} a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{32}}{p} \left\{ \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13} a_{23}}{(1-a_{11} a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] P_3(p) + \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11} a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{33}}{p} P_3(p) \quad (181)$$

$$\begin{aligned}
& P_3(p) - \frac{a_{31}}{p} \frac{\frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p-a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p-a_{22})} - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} P_3(p) - \\
& - \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] P_3(p) - \frac{a_{33}}{p} P_3(p) = \\
& = \frac{a_{31}}{p} \left\{ \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{32}}{p} \left\{ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} P_3(p)
\end{aligned} \tag{182}$$

$$\begin{aligned}
& P_3(p) = \frac{\frac{a_{31}}{p} \left\{ \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{32}}{p} \left\{ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\}}{1 - \frac{a_{31}}{p} \frac{\frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p-a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p-a_{22})} - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} - \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] - \frac{a_{33}}{p}}
\end{aligned} \tag{183}$$

შევიტანოთ (192), (189)-ში, მივიღებთ:

$$\begin{aligned}
& P_2(p) = \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] \times \\
& \times \frac{\frac{a_{31}}{p} \left\{ \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{32}}{p} \left\{ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\}}{1 - \frac{a_{31}}{p} \frac{\frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p-a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p-a_{22})} - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} - \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] - \frac{a_{33}}{p}} + \\
& + \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]}
\end{aligned} \tag{184}$$



შევიტანოთ (109), (104)-ში, მივიღებთ:

$$\begin{aligned}
 P_1(p) = & \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} \times \\
 & \frac{a_{31}}{p} \left\{ \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{32}}{p} \left\{ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} \\
 \times & \frac{a_{13} a_{23}}{p (p-a_{22})} - \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] - \frac{a_{33}}{p} \\
 & + \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]}
 \end{aligned} \tag{185}$$

ამგვარად, (182), (179) და (183) განსაზღვრულია და ამის შემდეგ საჭიროა ლაპლასის უკუგარდაქმნა. ეს პროცედურა მეტად რთულია და გრძელია. ამიტომ რეკომენდირებულია კონკრეტული მაგალითის გარკვევა. კონკრეტული შემთხვევისას, ხშირად გადასვლის მატრიცაში ხვდება ნული და ამიტომ აღნიშნული (182), (179) და (183) გამოსახულებები მარტივდება და ლაპლასის უკუგარდაქმნა შესაძლებელია ანალიზური ფორმით.

სისტემის (ან მისი ელემენტის) საიმედოობის მახასიათებლების განხილვისას, როგორც წესი განიხილავენ მუშაობის და აღდგენის დროს. მაგრამ ენერგო ობიექტის ექსპლუატაციის დროს ხშირად გვხვდება შემთხვევა, როდესაც სისტემის (ან მისი ელემენტის) მტყუნებისას, გადის გარკვეული დრო რემონტის დაწყებამდე (დაზიანების მოძებნის დრო, რემონტის ორგანიზაციის დრო, მარაგნაწილების მოტანის დრო და ა.შ.). გარკვეული დრო აგრეთვე იხარჯება ექსპლუატაციის ორგანიზაციაზე. დავარქვათ მოცდენის აღნიშნული დროების ჯამს – მოლოდინის დრო. ე.ი. ცნობილი დიქტომიის ნაცვლად, განიხილება სამი შესაძლო მდგომარეობა.

განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ნამუშევარი, აღდგენის და მოლოდინის დროები განაწილებულია ექსპონენციალურად, პარამეტრებით  $\lambda$ ,  $\mu$  და  $\eta$ .

ენერგო ობიექტის ელემენტის მდგომარეობათა გრაფიკს ექნება შემდეგი სახე (ნახ. 44), სადაც "1" - ელემენტი იმყოფება მუშა მდგომარეობაში; "2" - ელემენტი იმყოფება მოლოდინის მდგომარეობაში და "3" - ელემენტი იმყოფება რემონტის მდგომარეობაში.

ამგვარად, მატრიცის სახით გვაქვს:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \end{bmatrix}. \quad (186)$$

ამ შემთხვევაში გვექნება:

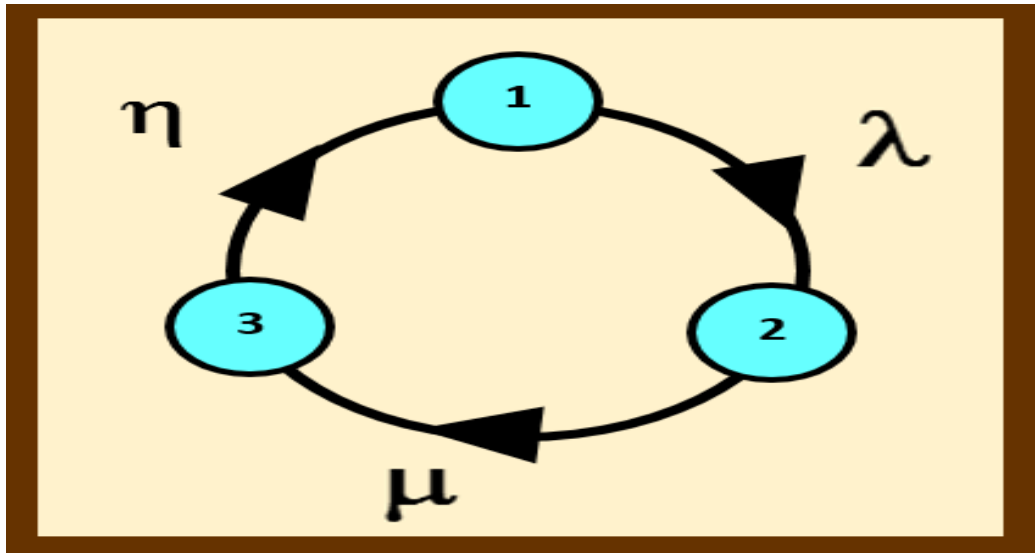
$$\begin{cases} a_{11} = -\lambda; & a_{12} = 0; & a_{13} = \mu. \\ a_{21} = \lambda; & a_{22} = -\eta; & a_{23} = 0. \\ a_{31} = 0; & a_{32} = \eta; & a_{33} = -\mu. \end{cases} \quad (187)$$

სისტემის მოქმედება იანგარიშება პირველი რიგის ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემით, რომლის მატრიცულ ფორმას გააჩნია შემდეგი სახე:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & \mu \\ \lambda & -\eta & 0 \\ 0 & \eta & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \end{bmatrix}, \quad (188)$$

საწყისი პირობებით  $p_1(0) = 1$ ;  $p_2(0) = p_3(0) = 0$ . გახსნილი სახით, სისტემა შემდეგნაირია [75-76]:

$$\begin{cases} \frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda p_1(t) + \mu p_3(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - \eta p_2(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \eta p_2(t) - \mu p_3(t). \end{cases} \quad (189)$$



ნახ. 44. გაზომვარაგების ობიექტის სამ მდგომარეობიანი გრაფიკი

საბოლოოდ, (182), (179) და (183) გამოსახულებები მარტივდება და ლაპლასის უკუგარდაქმნა შესაძლებელია მივიღოთ ანალიზური ფორმით.

$$P_1(p) = \frac{a_{13}a_{23}}{(1 - a_{11}a_{21})} \times \frac{\frac{a_{31}}{p} \left[ \frac{1}{p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p - a_{22})}} \right] + \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} \frac{1}{p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p - a_{22})}} \right]}{1 - \frac{a_{31}}{p} \frac{\frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p - a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p - a_{22})} - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} \right]} - \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p - a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1 - a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p - a_{22})} \right] - \frac{a_{33}}{p}} + \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p - a_{22})} \right]} = \frac{1}{\left[ p + \frac{\lambda^2}{(p + \eta)} \right]} \quad (190)$$

$$\begin{aligned}
P_2(p) &= \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] \times \\
&\quad \times \frac{\frac{a_{31}}{p} \left\{ \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{32}}{p} \left\{ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\}}{1 - \frac{a_{31}}{p} \frac{\frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p-a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p-a_{22})} - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} - \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] - \frac{a_{33}}{p}} + \\
&\quad + \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} = \frac{\lambda}{(p+\eta)} \frac{1}{\left[ p + \frac{\lambda^2}{(p+\eta)} \right]} = \frac{\lambda}{[p(p+\eta)+\lambda^2]}.
\end{aligned} \tag{191}$$

$$\begin{aligned}
P_3(p) &= \frac{\frac{a_{31}}{p} \left\{ \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\} + \frac{a_{32}}{p} \left\{ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{1}{\left[ p - \frac{a_{11}a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} \right\}}{1 - \frac{a_{31}}{p} \frac{\frac{a_{13}}{p} \frac{a_{23}}{(p-a_{22})}}{\left[ \frac{1}{p(p-a_{22})} - \frac{a_{11}}{p} \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \right]} - \frac{a_{32}}{p} \left[ \frac{a_{21}}{(p-a_{22})} \frac{a_{13}a_{23}}{(1-a_{11}a_{21})} + \frac{a_{23}}{(p-a_{22})} \right] - \frac{a_{33}}{p}} = \\
&= \frac{\eta}{p} \left\{ \frac{\lambda}{p+\eta} * \frac{1}{\left[ p + \frac{\lambda^2}{p+\eta} \right]} + \frac{\mu}{p} \right\} = \frac{\lambda\eta}{p[p(p+\mu)+\lambda^2]} + \frac{\mu}{p}.
\end{aligned} \tag{192}$$

საბოლოოდ გვექნება:

$$\left\{ \begin{aligned}
P_1(p) &= \frac{1}{p + \frac{\lambda^2}{(p+\eta)}}; \\
P_2(p) &= \frac{\lambda}{[p(p+\eta)+\lambda^2]}; \\
P_3(p) &= \frac{\lambda\eta}{p[p(p+\mu)+\lambda^2]} + \frac{\mu}{p}.
\end{aligned} \right. \tag{193}$$

თუ შევასრულებთ ლაპლასის უკუგარდაქმნას, საბოლოოდ მივიღებთ:

$$p_1(t) = \frac{\mu\eta}{\lambda\eta + \lambda\mu + \mu\eta} + \left[ 1 - \frac{b + \mu + \eta + \frac{\mu\eta}{a} \left( \frac{a+b}{b} - 1 \right)}{b-a} - \frac{\mu\eta}{\lambda\eta + \lambda\mu + \mu\eta} \right] e^{at} + \frac{b + \mu + \eta + \frac{\mu\eta}{a} \left( \frac{a+b}{b} - 1 \right)}{b-a} e^{bt} \quad (194)$$

$$p_2(t) = \frac{\lambda\mu}{\lambda\eta + \lambda\mu + \mu\eta} + \frac{\lambda - \frac{\lambda\mu}{a} \left( 1 - \frac{a+b}{b} \right)}{b-a} e^{at} + \left[ \frac{\frac{\lambda\mu}{a} \left( 1 - \frac{a+b}{b} \right) - \lambda}{b-a} - \frac{\lambda\mu}{ab} \right]. \quad (195)$$

$$p_3(t) = 1 - p_1(t) - p_2(t). \quad (196)$$

რომლებსაც გააჩნიათ შემდეგი სახე:

$$\begin{cases} a = \frac{1}{2} \left[ -(\lambda + \mu + \eta) + \sqrt{(\lambda + \mu + \eta)^2 - 4(\lambda\eta + \lambda\mu + \mu\eta)} \right]; \\ b = \frac{1}{2} \left[ -(\lambda + \mu + \eta) - \sqrt{(\lambda + \mu + \eta)^2 - 4(\lambda\eta + \lambda\mu + \mu\eta)} \right]. \end{cases} \quad (197)$$

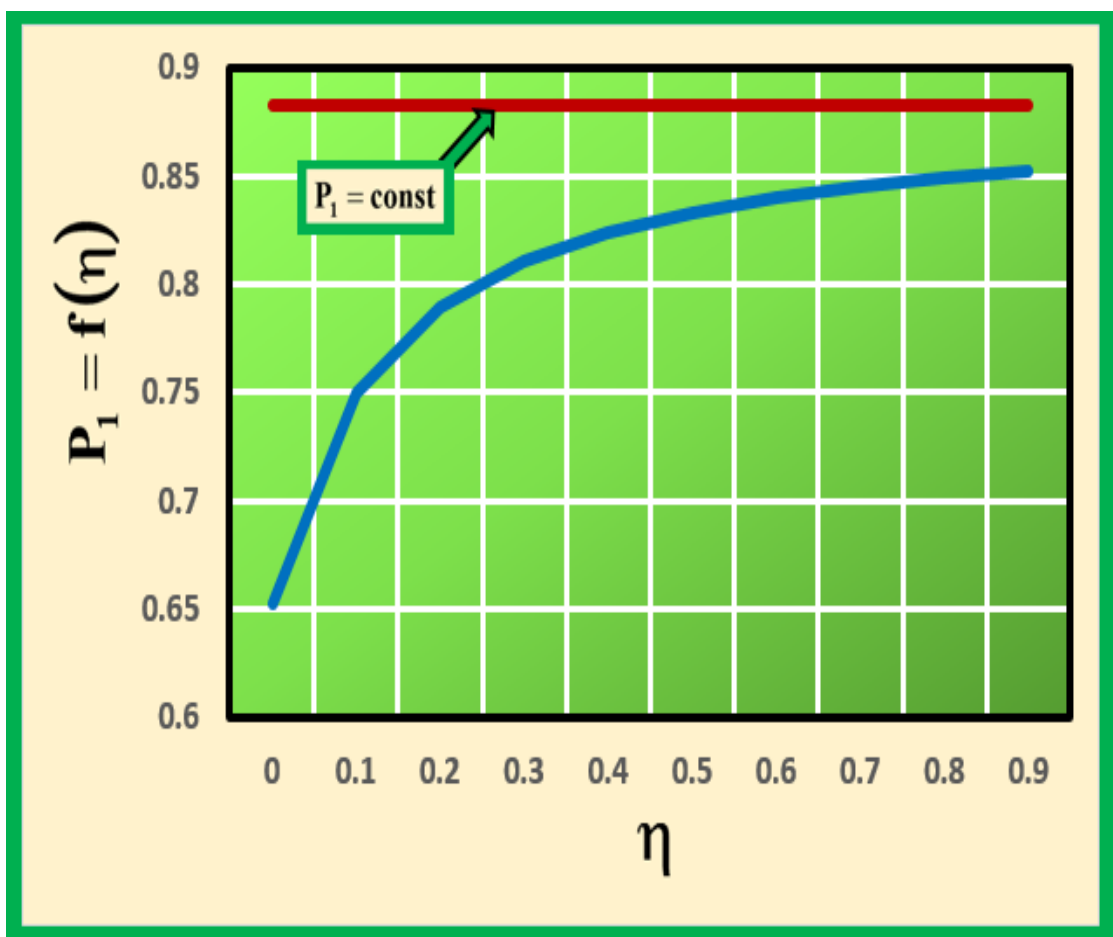
ბუნებრივია, რომ სისტემა, რომელიც იანგარიშება განტოლებებით (190), ყოველთვის როდესაც  $t \rightarrow \infty$  მიისწრაფვის ე.წ. სტაციონარული მდგომარეობებისაკენ. ჩვენს შემთხვევაში სტაციონარული მდგომარეობების ალბათობები ტოლია:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{\mu\eta}{\lambda\mu + \lambda\eta + \mu\eta}; \\ P_2 = \frac{\lambda\mu}{\lambda\mu + \lambda\eta + \mu\eta}; \\ P_3 = \frac{\lambda\eta}{\lambda\mu + \lambda\eta + \mu\eta}. \end{cases} \quad (198)$$

მესამე მდგომარეობის (მოლოდინი) გაუთვალისწინებლობას, მივყევართ უმტყუნო მუშაობის ალბათობის ხელოვნურ გაზრდამდე

(კერძოდ იზრდება მზადყოფნის სტაციონარული კოეფიციენტი). მაგალითისათვის განვიხილოთ გმპ-თვის ჩავთვალოთ, რომ  $\lambda = 0,04$  სთ<sup>-1</sup>;  $\mu = 0,3$  სთ<sup>-1</sup>;  $\eta = 0,5$  სთ<sup>-1</sup>. დამოკიდებულება (86)-ის მიხედვით  $p_1 = 0,824176$ . თუ არ გავითვალისწინებთ მოლოდინის დროს, მაშინ ცნობილი დამოკიდებულებით  $p = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$  გვექნება  $p_1 = 0,882353$ , რაც მეტია დაახლოებით 5,5%-ით.

ნახ. 45-ზე ნაჩვენებია მზადყოფნის კოეფიციენტის დინამიკის გრაფიკი, მოლოდინის  $\eta$  -ს ინტენსივობის ცვლილებისას.



ნახ. 45. მზადყოფნის კოეფიციენტის დამოკიდებულება მოლოდინის ინტენსივობაზე

მიღებული დამოკიდებულებით შესაძლოა გაცდენის ოპტიმალური დროის დადგენა.

## თავი 5. დაბალი წნევის გაზომვარაგების ორი რგოლის და ჩიხის საიმედოობის მახასიათებლების დადგენა

განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი ქსელის დაბალი და საშუალო წნევის გაზსადენების საიმედოობის საკითხები.

გაზგამანაწილებელი ქსელები შედგებიან ძირითადად იმ უბნებისგან, რომლებიც მიედინება გაზი და კვანძებიდან რომლებშიც მომხმარებლებთან ერთდებიან უბნებით და განშტოებებით. კონფიგურაციის (გაერთმთლიანების) ფიგურებს, რომლებიც შედგებიან გვერდებისგან და წვეროებისგან, როდესაც თვითოეულ გვერდს შეესაბამება ორი წვერო, რომელიც არის ამ წახნაგების ბოლო წერტილები, ეწოდებათ გრაფები. შემაერთებული გრაფის ნებისმიერი წვერო უნდა იყოს შეერთებული გვერდების გზით ნებისმიერ სხვა წვეროსთან. ნებისმიერი გაზის ქსელი წარმოადგენს საბოლოო შემაკავშირებელ ორიენტირებელ გრაფს, რომელიც შედგება მწვერვალების სასრული რიცხვისაგან (კვანძებისაგან), შეერთებული ერთმანეთს შორის გვერდებით (უბნებით). გაზის ქსელები, რომლებიც წარმოადგენენ საბოლოო შემაკავშირებელ მაორიენტირებელ გრაფებს, ნაჩვენებია ნახ. 46-ზე. გრაფებს, რომელთა გვერდებიც იკვეთება მხოლოდ კვანძებში, ეწოდებათ ბრტყელი გრაფები. გაზგამანაწილებელი ქსელების უმეტესობა შეიძლება წარმოადგენილ იქნას ბრტყელი გრაფების სახით. თანმიმდევრულად შეერთებული გვერდების (უბნების) ჯაჭვს, რომელშიც ყოველივე წვეროს (კვანძს) გაივლიან ერთხელ, ნაკადის მიმართულებით მოძრაობისას, ეწოდება გზა. მაგალითად გაზგამანაწილებელი ქსელის გზაა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 46-ზე. გზა, რომლის დასაწყისი და ბოლო წვეროს ემთხვევა, ქმნის კონტურს, ან ციკლს.

კონტური, რომელსაც არ გააჩნია მისი ფართობის გადამკვეთი შიდა გვერდები, ეწოდება ელემენტარული რგოლი. ქსელი (ა) (ნახ.46) შედგება ორი ელემენტარული რგოლისგან, ხოლო ქსელი (ბ) – ერთისგან.

გრაფის ხეს ეწოდება ქვეგრავი, რომელიც მოიცავს გრაფის ყველა წვეროს და რომელსაც არ გააჩნია არცერთი შეკრული კონტური. ხეში შემავალ გვერდებს ეწოდებათ მისი ტოტები. ჩიხისებრი განშტოებული გაზის ქსელი წარმოადგენს ხეს (ნახ. 46 ა' და ბ'). რგოლისებრი ქსელი წარმოადგენს გრაფს, რომელიც შედგება მხოლოდ ციკლებისაგან და რომელსაც არ გააჩნია ჩიხისებრი განშტოებები (ნახ. 46 ა და ბ). გაზგამანაწილებელი ქსელების უმეტესობა წარმოადგენს შერეულ გრაფებს, რომლებიც შედგება შეკრული კონტურებისაგან და ჩიხისებრი განშტოებებისაგან. გრაფი (რგოლის ქსელი) შეიძლება ტრანსფორმირდეს ხეში ჩამკეტი უბნის ყოველი ციკლის გამორიცხვის გზით. როგორც ჩანს ჩამკეტი უბნის რიცხვი უდრის ელემენტარული ციკლების რიცხვს. ასე რგოლის ქსელებიდან ა, ბ მიიღება ხეები ა'', ბ'' ნახ.46-ზე პუნქტირით ნაჩვენები ჩამკეტი უბნების გამორიცხვის გზით. ჩამკეტი უბნებად შეიძლება მივიღოთ ქსელის სხვადასხვა უბნები, ამიტომ ყოველი რგოლის ქსელიდან შეიძლება მივიღოთ რამოდენიმე ხე.

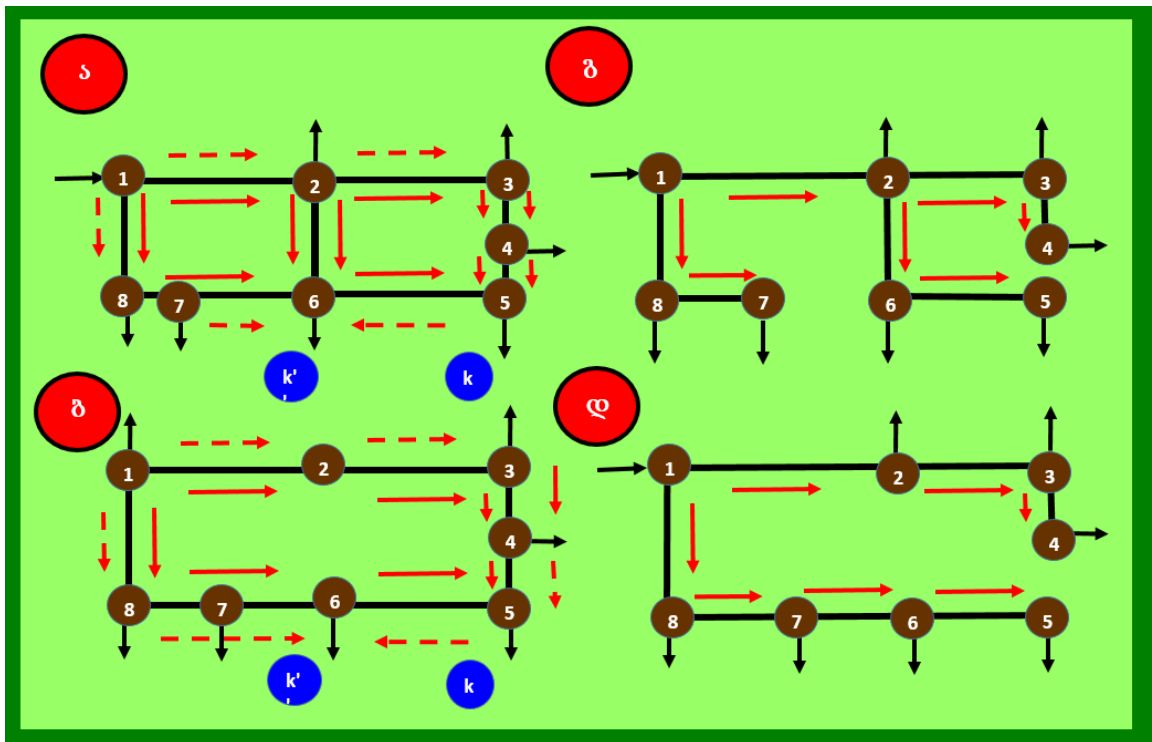
განვიხილოთ განშტოებული და რგოლისებრი გაზის ქსელების თავისებურებები. განშტოებულ ქსელებში გაზი შემოედინება მოხმარების კვანძთან ერთი უბნით (ერთი მიმართულებით), ამიტომ ისინი წარმოადგენენ ჩიხისებურ ქსელებს. მაშასადამე, განშტოებულ ქსელებთან მიერთებულ მოხმარებლებს, გააჩნიათ ცალმხრივი კვება და არ გააჩნიათ ქსელის სარეზერვო უბნები, რომლებითაც გაზი შეიძლება შემოვიდეს მოხმარებლებთან, ძირითადი უბნების მტყუნების დროს. იმის გამო, რომ განშტოებულ ქსელს არ გააჩნია სარეზერვო ელემენტები, გაზგანაწილებელი ქსელის საიმედოობა განისაზღვრება მხოლოდ ქსელის ელემენტების საიმედოობით, რომლითაც გაზი თანმიმდევრულად მიედინება მოხმარებლებთან. თუ განშტოებულ ქსელს მუშაობიდან გამოერთვება ელემენტი (მაგალითად გაზსადენის უბანი), მაშინ ყველა მოხმარებელი, რომელიც მიერთებულია ამ ელემენტით, ვერ მიიღებს გაზს.



განშტოებული ქსელის საიმედოობის აწევა შესაძლებელია მაგალითად ყველა ელემენტის დუბლირებით. თუმცა ეს გზა დაკავშირებულია დამატებით კაპიტალურ დაბანდებებთან და გამანაწილებელი ქსელებისთვის მას არ იყენებენ. გამანაწილებელ სისტემაში შესაძლებელია მხოლოდ ცალკეული უბნების დუბლირება, რომლებიც კვებავენ სისტემას ერთიანად. განშტოებული ქსელების საიმედოობის აწევა მიიღწევა მათი მიერთებით. ნახ. 46-ზე ნაჩვენებია განშტოებული ქსელის (ა' და ბ') გადაწყვეტის ვარიანტი 2,3 ... ,6 მომხმარებლის გაზომვარაგების უზრუნველსაყოფად. ორივე ვარიანტი შეიძლება გარდაიქმნას (ა და ბ) რგოლისებურ სქემაში, ჩამკეტი უბნების შემოღების გზით, რომლებიც ნაჩვენებია ნახაზზე პუნქტურით.

რგოლური ქსელის ძირითადი განსხვავება ჩიხურისაგან ისეა, რომ ისინი შეადგენენ ჩაკეტილ კონტურებს, რის შედეგადაც გაზი უნდა მიეწოდოს მომხმარებელს ორი ან რამოდენიმე წირით, ე.ი. მომხმარებლებს აქვთ ორმხრივი ან მრავალმხრივი კვება. თუ საანგარიშო რეჟიმში გაზი მიედინება კვანძთან, რომელზეც მიერთებულია მომხმარებელი, მხოლოდ ერთი უბნით (მაგალითად კვანძი 3, ნახ. 46) ის მაინც უზრუნველყოფილია ორმხრივი კვებით. ნამდვილად, თუ გამტყუნდება 1-2 უბანი (ნახ. 46, ა და ბ), მაშინ გაზის მოძრაობის მიმართულება ცალკეულ უბნებზე შეიცვლება საწინააღმდეგოზე და გაზი მიემართება 3 უბანზე კვების სხვა ხაზით - 3-4 უბნით.

რგოლისებრი ქსელის საიმედოობა განშტოებულთან შედარებით მნიშვნელოვნად მაღალია, ვინაიდან მას გააჩნია სარეზერვო ელემენტები - ჩამკეტი უბნები. მომხმარებელთა გაზომვარაგების საიმედოობა იქნება უფრო მაღალი, ვიდრე ქსელის ელემენტების საიმედოობა, რომლითაც გაზი ნორმალურ რეჟიმში თანმიმდევრულად მიედინება მომხმარებლებთან. გაზის მომხმარებელთან საანგარიშო გაზის ელემენტის მტყუნებისას ჩნდება გაზის მოძრაობის სხვა გზით სარეზერვო ელემენტით.



ნახ. 46. გაზის მიწოდება მომხარებლებს ჩიხური და რგოლური ქსელებით: ა,გ. რგოლური ქსელების ვარიანტები; ბ,დ. ჩიხური ქსელების ვარიანტები. k,k' - ნაკადის გადანაწილების სხვადასხვა ვარიანტები, ნაკადების შეხვედრების წერტილები. 1 - გაზის მიწოდების კვანძი; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 - გაზის მოხმარების კვანძები

მაშასადამე, რგოლისებრი ქსელის საიმედოობა იქნება უფრო მაღალი ელემენტების საიმედოობაზე, რომელიც ის შედგება. სხვა განსხვავება განშტოებულ ქსელსა და რგოლისებურ ქსელს შორის მდგომარეობს იმაში, რომ ჩიხისებრი განშტოებული ქსელის სატრანზიტო ხარჯები ნაწილდება ყველა უბანზე ცალსახად, ხოლო რგოლისებურ ქსელებში შეიძლება აღინიშნოს მათი განაწილების ურიცხვი ვარიანტები, რაც ნაჩვენებია ქსელების სქემებზე (ნახ. 46). მაგალითად ჩიხისებრი სქემისთვის ა' სატრანზიტო ხარჯი 2-6 უბნისთვის უდრის 5 და 6 კვანძებში ხარჯების ჯამს და ეს არის ერთადერთი გადაწყვეტილება. საერთო შემთხვევაში სატრანზიტო ხარჯი ნებისმიერი უბნისთვის იქნება ყველა საკვანძო ხარჯების ჯამის ტოლი, მდებარე ამ მონაკვეთის უკან. რგოლისებრი უბნისთვის (ვარიანტი ა) უპირველესად შეიძლება დაინიშნოს ნებისმიერ კვანძში გაზის შეხვედრის წერტილი, კვების კვანძის გამორიცხვით, რაც იძლევა გარკვეული ვარიანტების რაოდენობას; მეორედ, გაზის ხარჯი

ნაკადების შეხვედრის კვანძიდან შეიძლება განაწილებულ იქნას კვანძის მიმდებარე მონაკვეთებს შორის ვარიანტების უსასრულო რაოდენობით, რის შედეგადაც ვლინდება რგოლისებურ ქსელებში სატრანზიტო ხარჯების უნებლიე განაწილების შესაძლებლობა. ამასთანავე ნაკადების ოპტიმალური განაწილებისთვის საჭიროა გარკვეული პრინციპის გამოყენება.

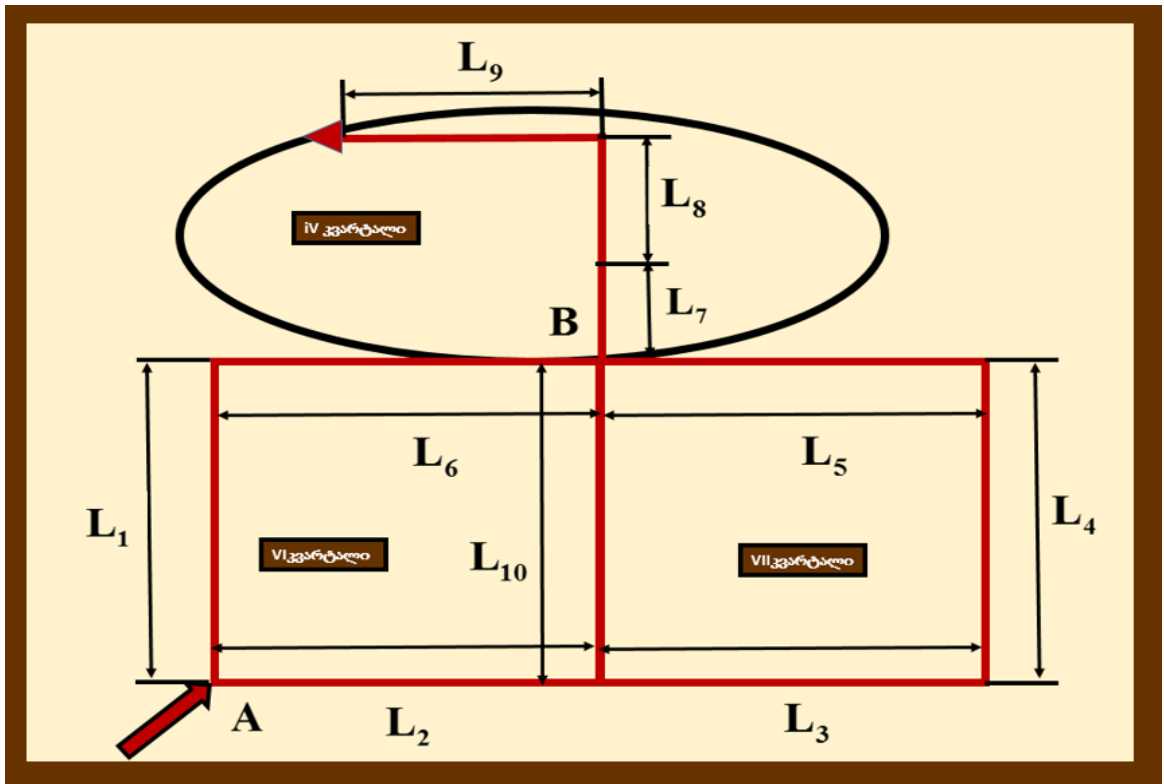
იმის გათვალისწინებით, რომ რგოლისებურ გაზსადენებს აპროექტებენ მხოლოდ იმისთვის, რომ უზრუნველყონ გაზგანაწილებელი ქსელის საიმედო მუშაობა, სატრანზიტო ხარჯების განაწილებისას უნდა ვიხელმძღვანელოთ ქსელის მაქსიმალური საიმედოობის პრინციპით, რომლიდანაც გამომდინარე საუკეთესო იქნება გადაწყვეტილება, რომელიც დაუშვებს ცალკეული უბნების ურთიერთშეცვლას. ამ შემთხვევაში მწყობრიდან გამოსული უბნის დატვირთვა შეიძლება გადაცემულ იქნას მეზობელ უბნებზე ქსელის მუშაობის ნაკლები დარღვევებით.

მესამე განსხვავება განშტოებულ ქსელსა და რგოლისებურ ქსელს შორის მდგომარეობს იმაში, რომ განშტოებული ქსელის რომელიმე უბნის დიამეტრის შეცვლა გავლენას არ ახდენს სხვა მონაკვეთებზე ხარჯების განაწილებას და შედეგად გვაქვს წნევის შეცვლა მხოლოდ ქსელის დასაწყის წერტილში. რგოლისებრი ქსელის რომელიმე უბნის დიამეტრის შეცვლა მიგვიყვანს ყველა დანარჩენი უბნების ხარჯების გადანაწილებასთან, ვინაიდან რგოლისებრი ქსელის შტოები ჩართულია პარალელურად. გარდა ამისა, შეიცვლება წნევა ქსელის კვების წერტილში.

განვიხილოთ გაზგამანაწილებელი ქსელის შემდეგნაირი სახის სქემა. ვთქვათ გვაქვს მიერთებული ორი რგოლური ქსელი, რომელზედაც მიერთებულია ჩიხური ქსელი (ნახ.47).

განხილულია ქ. თბილისის შპს ‘ყაზტრანსგაზ-თბილისის’ გაზგამანაწილებელი ქსელის ერთერთი უბანი, რომელიც შეიცავს ვაჟა ფშაველას გამზირის IV, VI და VII კვარტლების გაზგამანაწილებელი ქსელს. ცხრილ 1-ში მოყვანილია აღნიშნული ქსელის გაზსადენების ტექნიკური

პარამეტრები, კერძოდ უბნების (ელემენტების) სიგრძეები  $L_i$  და დიამეტრები  $D_i$ .

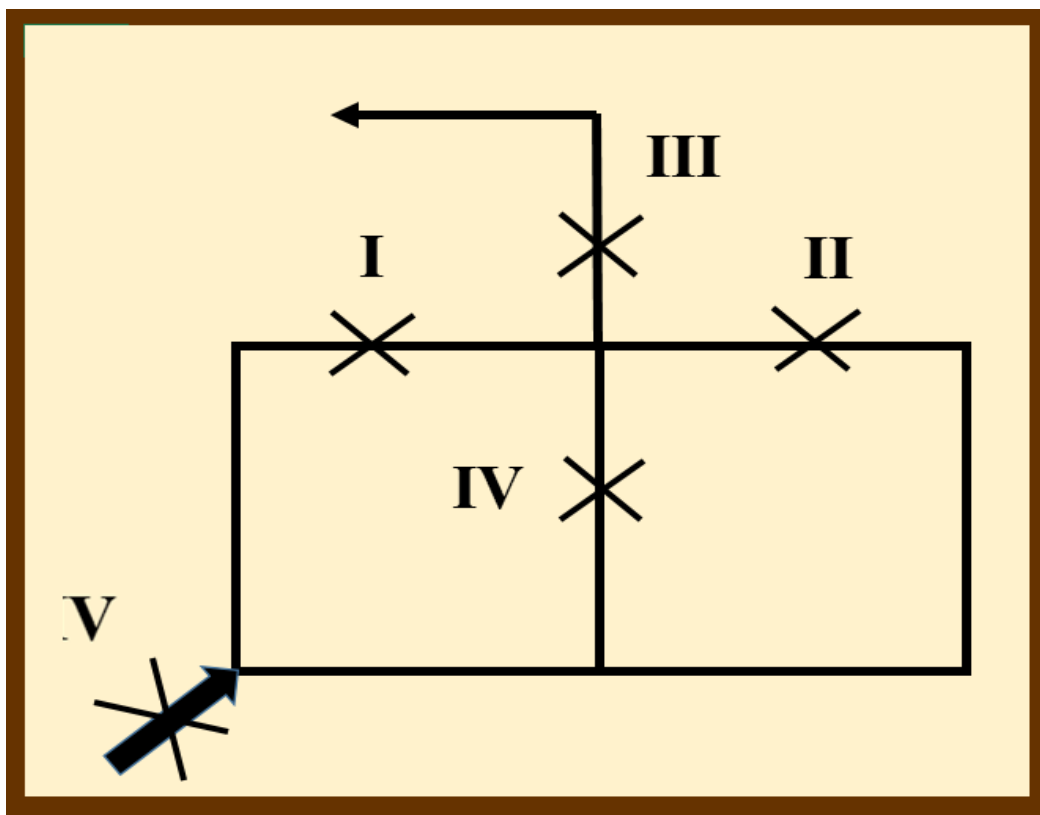


ნახ. 47. ორი რგოლური ქსელი, ჩიხური ქსელის მიერთებით

ცხრილი 15. ქსელის გაზსადენების ტექნიკური პარამეტრები, კერძოდ უბნების (ელემენტების) სიგრძეები  $L_i$  და დიამეტრები  $D_i$

გაზსადენების უბნების სიგრძეები, $L_i$ , კმ	გაზსადენების უბნების დიამეტრები, $D_i$ , მმ
$L_1 = 4,8$	$D_1 = 100$
$L_2 = 8,4$	$D_2 = 150$
$L_3 = 3,93$	$D_3 = 200$
$L_4 = 3,51$	$D_4 = 200$
$L_5 = 4,44$	$D_5 = 250$
$L_6 = 6,78$	$D_6 = 250$
$L_7 = 2,16$	$D_7 = 150$
$L_8 = 1,84$	$D_8 = 100$
$L_9 = 1,56$	$D_9 = 100$
$L_{10} = 1,78$	$D_{10} = 200$

განვიხილოთ აღნიშნული ქსელის იდეალიზირებული სქემა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 48-ზე.



ნახ. 48. გაზგამანწილებელი ქსელის იდეალიზირებული სქემა

გარკვეული მოსაზრებებისა და დაშვებების შემდეგ ჩავთვალოთ: რომ გვაქვს I, II და III ე.წ. საკვანძო საფრთხეების წერტილები. მათი განლაგება ნებისმიერია, მაგრამ ამ წერტილებში გვაქვს მტყუნებები. I ან II მტყუნებებისას, გვექნება რგოლების ნაწილობრივი მტყუნებები. იგივე გვექნება ჩიხის III წერტილისათვის. V წერტილისათვის გვაქვს გაზის მიწოდების წერტილს და მისი მტყუნებისას გვექნება სრული მტყუნება. თუ I ან II მტყუნებებისას გაზის მიწოდების ახლოს, მაშინ აქაც გვაქვს სრული მტყუნება. თუ I, II და IV წერტილები ახლოსაა ჩიხის დასაწყისის წერტილთან, ასევე გვექნება ჩიხის მტყუნება.

ამგვარად, ცხრილ 16-ში მოყვანილია აღნიშნული ქსელის სიტუაციური ანალიზის საიმედოობის პოზიციები.

ცხრილი 16. ქსელის სიტუაციური ანალიზის საიმედოობის პოზიციები.

სიტუაცია	მტყუნებები
0	სრული მუშაუნარიანობა
0'	$\lambda_1$ (მარყუჯი, სიტუაცია I)
0''	$\lambda_2$ (მარყუჯი, სიტუაცია II)
1	$\lambda_1 + \lambda_2$ (ჩიხის სიტუაცია I, II და IV, 3 მტყუნება)
2	$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ (ჩიხის სიტუაცია I, II და III, 3 მტყუნება)
3	$\lambda_0$ (სრული მტყუნება, სიტუაცია IV)

საიმედოობის თეორიის პოზიციიდან, შესაძლებელია გამოვყოთ ოთხი ძირითადი მდგომარეობა, რომლებშიც პერიოდულად გადადის გაზის სექტორის ენერგობიექტი, მისი ექსპლუატაციის მთელი დროის განმავლობაში: 1. მუშა მდგომარეობა, როდესაც ობიექტს გააჩნია ფუნქციონალური დატვირთვა ან იმყოფება დატვირთულ (“ცხელ”) რეჟერვში. 2. ყოფნა დაუტვირთავ (“ცივ”) რეჟერვში, როდესაც გამართული ობიექტი არ იმყოფება დატვირთვის ქვეშ. 3. პროფილაქტიკის ან გეგმიური რემონტის მდგომარეობა, რომლის დროს ხდება ობიექტის ტექნიკური მომსახურება. 4. ობიექტის მტყუნების მდგომარეობა, რომლის დროს იგი ვერ ასრულებს მასზე დაკისრებულ ფუნქციებს [78-79].

ავარიულ მდგომარეობაში მყოფი ობიექტები ექვემდებარება რემონტს, რომელიც აღადგენს მათ საწყის პარამეტრებს, ან იცვლება ახალი, იდენტური ობიექტით (ან მისი ელემენტებით). აღდგენითი სამუშაოები მოითხოვენ დროის გარკვეულ დანაკარგს, ამიტომ ენერგეტიკული ობიექტის მუშაობა, საიმედოობის თეორიის პოზიციიდან, შესაძლებელია განვიხილოთ როგორც მუშაობა აღდგენის სასრული დროით.

ამგვარად, გამოსაკვლევ სისტემა აღიწერება შემდეგი მოდელით: გვაქვს სისტემის  $\mathbf{m}$  შესაძლო მდგომარეობა. მდგომარეობა  $\mathbf{P}(t)$ , დროის ფიქსირებული მომენტისათვის  $t \geq 0$ , განიხილება როგორც შემთხვევითი სიდიდე. სისტემის ქცევა დროში, შესაძლებელია განვიხილოთ როგორც შემთხვევითი პროცესი  $\{\mathbf{P}(t) ; t \geq 0\}$ , მდგომარეობათა სასრული რაოდენობით და პარამეტრის ცვლილების უწყვეტი არით.

ჩვეულებრივად დამხმარე საშუალება, რომელსაც იყენებენ  $m$  სასრული რაოდენობის მდგომარეობის მქონე სისტემის აღწერისათვის, არის სისტემის გადასვლების გრაფი, რომელშიც იგულისხმება სისტემის მდგომარეობათა მიმართული გრაფი, რომლის  $m$  კვანძი შეესაბამება სისტემის ამდენივე მდგომარეობას. ამ გრაფის ორიენტირებული ტოტი, გვიჩვენებს სისტემის ტოტის საწყისი კვანძის შესაბამისი მდგომარეობიდან, საბოლოო კვანძში გადასვლის შესაძლებლობას.

ჩვეულებრივად, ენერგობიექტის ექსპლუატაციის დროს, მისახმარისი პერიოდის გავლის შემდეგ, ელემენტის მომავალი ქცევა, სრულად აღიწერება მისი არსებული მდგომარეობით და არ არის დამოკიდებული მის წინა ისტორიაზე. ამ შემთხვევაში გვაქვს ერთგვაროვანი მარკოვის პროცესი.

პროცესის  $P_i$  მდგომარეობაში ყოფნის,  $P\{p(t) = p_i\} = p_i(t)$  ალბათობებისათვის, ნებისმიერი  $t$  მომენტისათვის, სრულდება თანაფარდობა:

$$\sum_{i=1}^m p_i(t) = 1. \quad (199)$$

სისტემა, რომლის მდგომარეობის ცვლილება დროში აღიწერება ერთგვაროვანი მარკოვის პროცესით, მდგომარეობათა სასრული რაოდენობით და უწყვეტი დროით, ექვემდებარება კოლმოგოროვის განტოლებებს [1-2]:

$$\frac{dp_j(t)}{dt} = \sum_{j=1}^m a_{ji}(t) p_i(t); \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (200)$$

რომელთაც ემატება საწყისი პირობები  $\sum_{j=1}^m p_j(0) = 1$ , სადაც

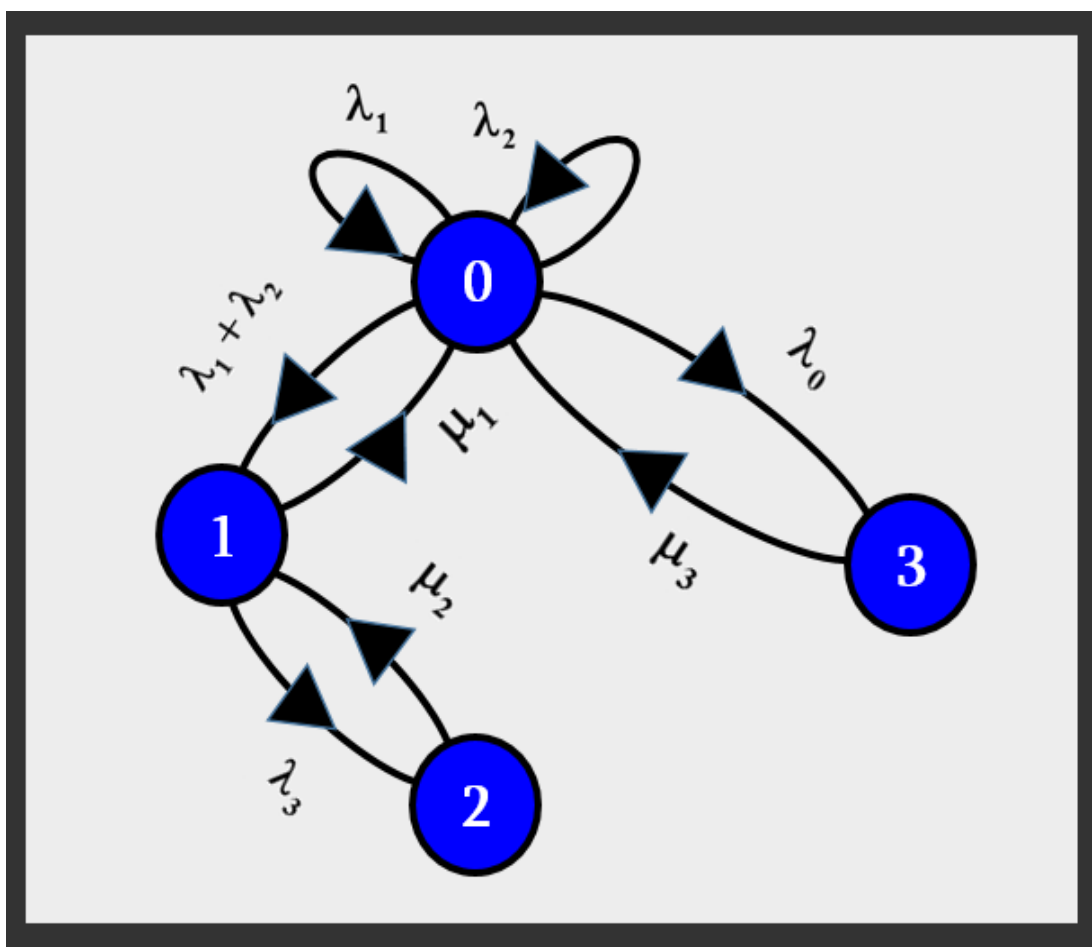
$a_{ji}(t)$ ,  $j \neq i = 1, 2, \dots, m$  არის გადასვლის ინტენსივობები.

სისტემის მოქმედება აღიწერება პირველი რიგის ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემით, რომლის მატრიცულ ფორმას გააჩნია შემდეგი სახე:

საწყისი პირობებით  $p_0(0)=1$ ;  $p_1(0)=p_2(0)=p_3(0)=0$ .

განვიხილოთ ნახ. 49-ზე ნაჩვენები გრაფი, რომელიც წარმოადგენს მხოლოდ გაზის სექტორის ობიექტების მუშა მდგომარეობიდან - მტყუნებაში გადასვლას და პირიქით. ასეთი მოდელი მისაღებია, როდესაც მტყუნების ალბათობა, ნაკლებია ნულოვან (მუშა) მდგომარეობაში ყოფნის ალბათობაზე. ანუ იგნორირებული ორი ობიექტის ერთდროული მტყუნება. როგორც წესი, ეს პირობა მისაღებია. მტყუნებების შემდეგ, შეიძლება გამოვიყენოთ შემდეგი თანაფარდობები.

განვიხილოთ აღნიშნული გაზგამანწილებელი ქსელის შესაბამისი გრაფი (ნახ. 49), ხოლო ცხრილ 2-ზე შესაბამისი გრაფის გადასვლის ინტენსივობები, კერძოდ საიმედოობის პარამეტრები მტყუნებების საფრთხე და აღდგენის ინტენსივობები.



ნახ. 49. გაზგამანწილებელი ქსელის შესაბამისი გრაფი



ცხრილი 17. გრაფის გადასვლის ინტენსივობები, - მტყუნებების საფრთხე და აღდგენის ინტენსივობები.

გრაფის გადასვლის ინტენსივობები	მდგომარეობების ალბათობები			
	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
	$-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$	$\mu_1$	-	$\mu_3$
	$(\lambda_1 + \lambda_2)$	$-(\lambda_3 + \mu_1)$	$\mu_2$	-
	-	$\lambda_3$	$-\mu_2$	$-\mu_3$
ჯამი	0	0	0	0

ამგვარად, აღნიშნული გრაფიკის შესაბამისი კოლმოგოროვის ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებების სისტემა გვაქვს შემდეგი სახით:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_3 P_3(t). \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) - (\lambda_3 + \mu_1)P_1(t) + \mu_2 P_2(t). \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_3 P_1(t) - \mu_2 P_2(t). \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_0 P_0(t) - \mu_3 P_3(t). \end{cases} \quad (201)$$

ჩავთვალოთ, რომ არასტაციონარული მდგომარეობა მეტად მცირეა და შეიძლება ჩაითვალოს რომ

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{dP_2(t)}{dt} = \frac{dP_3(t)}{dt} = 0. \quad (202)$$

ამიტომ, დიფერენციალური განტოლებების სისტემა, გადასვლის ალგებრულ სისტემაში:

$$\begin{cases} -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_3 P_3 = 0. \\ (\lambda_1 + \lambda_2)P_0 - (\lambda_3 + \mu_1)P_1 + \mu_2 P_2 = 0. \\ \lambda_3 P_1 - \mu_2 P_2 = 0. \\ \lambda_0 P_0 - \mu_3 P_3 = 0. \end{cases} \quad (203)$$

ამ სისტემას, რომელიც ჩაკეტილი არ არის, ემატება საწყისი პირობა:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1. \quad (204)$$

ამოვხსნათ სისტემა (202), რომლისთვისაც ამ სისტემის პირველი განტოლების ნაცვლად, ჩავრთოდ განტოლება (204). სისტემა (203)-ის მესამე და მეოთხე განტოლებებიდან მივიღებთ: [80]

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1 = \frac{\mu_2}{\lambda_3} \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{P}_0 = \frac{\mu_3}{\lambda_0} \mathbf{P}_3 \end{cases} \quad (205)$$

შევიტანოთ სისტემაში. გვექნება:

$$\begin{cases} (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\mu_3}{\lambda_0} \mathbf{P}_3 - (\lambda_3 + \mu_1) \frac{\mu_2}{\lambda_3} \mathbf{P}_2 + \mu_2 \mathbf{P}_2 = \mathbf{0} \\ \frac{\mu_3}{\lambda_0} \mathbf{P}_3 + \frac{\mu_2}{\lambda_3} \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_3 = \mathbf{1}. \end{cases} \quad (206)$$

აქედან გვექნება:

$$\left[ (\lambda_3 + \mu_1) \frac{\mu_2}{\lambda_3} - \mu_2 \right] \mathbf{P}_2 = (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{\mu_3}{\lambda_0} \mathbf{P}_3. \quad (207)$$

$$\frac{\mu_3(\lambda_3 + \mu_1) - \mu_2 \lambda_3}{\lambda_3} \mathbf{P}_2 = \frac{\mu_3(\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_0} \mathbf{P}_3. \quad (208)$$

$$\mathbf{P}_2 = \frac{\frac{\mu_3(\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_0}}{\frac{\mu_3(\lambda_3 + \mu_1) - \mu_2 \lambda_3}{\lambda_3}} \mathbf{P}_3 = \frac{\mu_3 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0 (\lambda_3 - \lambda_3 + \mu_1)} \mathbf{P}_3 = \frac{\mu_3 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0} \mathbf{P}_3. \quad (209)$$

$$\left( 1 + \frac{\mu_3}{\lambda_0} \right) \mathbf{P}_3 + \left( 1 + \frac{\mu_2}{\lambda_3} \right) \mathbf{P}_2 = \mathbf{1}. \quad (210)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2 &= \frac{1 - \left( 1 + \frac{\mu_3}{\lambda_0} \right) \mathbf{P}_3}{1 + \frac{\mu_2}{\lambda_3}} = \frac{1 - \frac{(\lambda_0 + \mu_3)}{\lambda_0}}{\frac{(\lambda_3 + \mu_2)}{\lambda_3}} = \frac{1 - \frac{(\lambda_0 + \mu_3) \mu_3 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0}}{\frac{(\lambda_3 + \mu_2)}{\lambda_3}} = \\ &= \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) 2(\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_3 (\lambda_3 + \mu_2)} = \frac{\lambda_3 [\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) 2(\lambda_1 + \lambda_2)]}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3} = \\ &= \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2} \end{aligned} \quad (211)$$

ამგვარად მიიღება  $\mathbf{P}_2$  მდგომარეობის ალბათობის სიდიდე.

ანალოგიურად მივიღებთ:

$$P_3 = \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0}{\mu_3 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} P_2. \quad (212)$$

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0}{\mu_3 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} \frac{\lambda_3 [\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) 2(\lambda_1 + \lambda_2)]}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3} = \\ &= \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)}. \end{aligned} \quad (213)$$

$$P_1 = \frac{\mu_2}{\lambda_3} P_2 = \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)}. \quad (214)$$

$$P_0 = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \lambda_0 - \mu_3^2 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)}. \quad (215)$$

საბოლოოდ, ცნობილია ყველა მდგომარეობის ალბათობის სიდიდეები:

$$\left\{ \begin{aligned} P_0 &= \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \lambda_0 - \mu_3^2 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} \\ P_1 &= \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} \\ P_2 &= \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2} \\ P_3 &= \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)}. \end{aligned} \right. \quad (216)$$

შევამოწმოთ მიღებული შედეგი. გვექნება:

$$\begin{aligned} &\frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3 \lambda_0 - \mu_3^2 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} + \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} + \\ &+ \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2} + \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0 - \mu_3 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_2 \lambda_0 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} = 1 \end{aligned} \quad (217)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\mu_1^2 \mu_2 \mu_3 \lambda_0 - \mu_1 \mu_3^2 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} + \frac{\mu_1 \mu_2^2 \lambda_0^2 - \mu_1 \mu_2 \mu_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} + \\ &+ \frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)^2 - \mu_3 \lambda_3^2 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)^2}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} + \\ &+ \frac{\mu_1^2 \mu_2 \lambda_0 - \mu_1 \mu_2 \lambda_0 \lambda_3 (\lambda_0 + \mu_3) (\lambda_1 + \lambda_2)}{\mu_1 \mu_2 \lambda_0^2 \lambda_3 (\lambda_1 + \lambda_2)} = 1 \end{aligned} \quad (218)$$

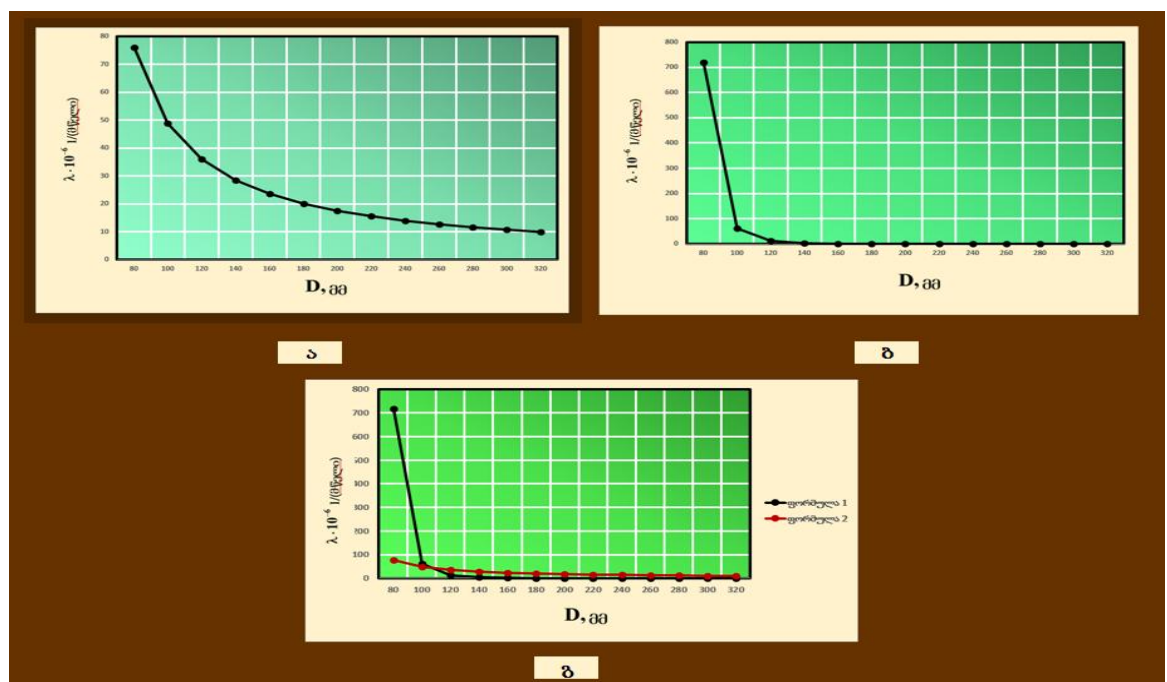
განვსაზღვროთ მტყუნების ინტენსივებები ფორმულით  

$$\lambda = \frac{10^{-6}}{0,000365D - 0,01603}$$
 და  $\lambda = 0,0031e^{988,28/D} \cdot 10^{-6}$  ( $\bar{D}$  -მმ-ში) და ავაგოთ  
 გრაფიკები (ნახ. 50).

სხვადასხვა დიამეტრის მქონე გაზსადენები (ელემენტები), რომლებიც შეერთებულია მიმდევრობით შეიძლება ზოგადად არ თანხდეს საიმედოობის ცნებასთან. ჩავთვალოთ, რომ ერთერთი გაზსადენის უმტყუნოდ მუშაობის ალბათობა, არ არის დამოკიდებული სხვა ელემენტების მტყუნებაზე. მაშინ ელემენტების მიმდევრობითი შეერთებისას, სისტემის უმტყუნო მუშაობის ალბათობა წარმოადგენს ალბათობის თეორემის მიხედვით:

$$P_{\Sigma}(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t) \cdot \dots \cdot P_i(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (219)$$

თუ, გვაქვს სისტემის ნორმალური მუშაობის პერიოდი, მაშინ მიმდევრობითი შეერთებისას, რეზულტირებელი საიმედოობა ტოლია ცალკ-ცალკე ელემენტების უმტყუნო მუშაობის ალბათობის ნამრავლის:



ნახ. 50. გაზგამანწილებელი ქსელის უბნის მტყუნების საფრთხეს დამოკიდებულებები, გაზსადენის საშუალო დიამეტრზე

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} e^{-\lambda_3 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_i t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t}. \quad (220)$$

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-\lambda_2 t}. \quad (221)$$

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (222)$$

საშუალო ნამუშევარი ექსპონენციალური მუშაობისას ტოლია:

$$\mu = \bar{T} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \dots + \frac{1}{\mu_n}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu_i}} \quad (223)$$

თუ მიმდევრობითი შეერთებული გაზსადენები მტყუნებების საფრთხეები ტოლია და  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda$ , მაშინ უმტყუნო მუშაობის ალბათობა ტოლია  $P_{\Sigma}(t) = e^{-n\lambda t}$ , სადაც  $n$  არის შეერთების ელემენტების რაოდენობა, ხოლო საშუალო ნამუშევარია:

$$\mu = \bar{T} = \frac{1}{n \lambda}. \quad (224)$$

## დასკვნები

1. საქართველოს ქალაქების გაზომვარაგების სისტემების სპეციფიკური პროექტების ანალიზისას, ასევე ოპტიმიზაციის სფეროში ნორმატიული დოკუმენტების და მასალებისას გამოვლინდა, რომ: გამოყენებული დეტერმინირებული ტექნიკური და ეკონომიკური მაჩვენებლები საკმარისი არ არის. ასევე ეს არ იძლევა პარამეტრების შესაძლო გადახრების განსაზღვრას ოპტიმალური გადაწყვეტილებებს, ცხადია, რომ იწვევს მატერიალური და დანახარჯების მნიშვნელოვან ეკონომიკურ დანაკარგებს.

2. ნაშრომში შემუშავდა თანამედროვე გაზგამანაწილებული ქსელების საიმედოობის ოპტიმიზაციის მეთოდი, ანალიზური მიდგომის საფუძველზე, რომელიც ითვალისწინებს ქსელის ქვესისტემების საიმედოობის მახასიათებლებს. აღდგენადი პარალელური სისტემების საიმედოობისათვის, შემუშავდა გაანგარიშების მათემატიკური მოდელები (მარკოვის მოდელები დამაჯერობლობის შემთხვევაში და დამოკიდებული მტყუნებებით).

3. გაზგამანაწილებელი ქსელის დინამიკის თავისებურებების გათვალისწინებით, პირველად შემოთავაზებულია ლუპინგის სიმულაციური მოდელი. იგი გვიჩვენებს, რომ ამ მეთოდიკის გამოყენება საშუალებას იძლევა გაზსადენების სისტემის საოპერაციო მართვაში ჩარევას; საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ გაზის ხარჯის გაზრდა და მისი საიმედოობა. ამ მიზნით, მიზანშეწონილია წინასწარ განისაზღვროს ტექნოლოგიური ლუპინგების მუშაობის ტიპური რეჟიმი.

4. ნაშრომში გაზგამანაწილებელი ქსელის საიმედოობის ოპტიმიზაციის პრობლემის გადაჭრისთვის, შემუშავდა საიმედოობის ოპტიმიზაციისა და საიმედოობის კრიტერიუმები, მეთოდოლოგია და ალგორითმური პროცედურა. ამ პროცედურის გამოყენების მაგალითი მოცემულია კონკრეტული სისტემის დეტალურ დონეზე. აგებულია

დეტალური ანალიტიკური მოდელი ქსელის საიმედოობის მახასიათებლების დასადგენად, საწყისი მონაცემების გენერირებისათვის. მიღებულია ანალიზური გამოსახულებები, რაც საშუალებას იძლევა საშუალო წნევის გაზგამანაწილებელი ქსელის საიმედოობის შეფასებას, როდესაც ხდება ქსელის შეფასება ყველა კვანძის გათვალისწინებით.

5. პირველად შემოთავაზებულია და შესრულდა გამოყენებითი მიდგომა პირველადი ინფორმაციის გათვალისწინებით. ეს გამოწვეულია ბუნებრივი გაზის მინიმალური ხარჯების მაქსიმალური ეფექტის დასადგენად. თავდაპირველი ინფორმაციის ცდომილების გათვალისწინებით ხდება ძირითადი ურთიერთდაკავშირებული ამოცანების გადაჭრა: გაზის საკონტროლო წერტილების ოპტიმალური რაოდენობა და გაზმარეგულირებელი სადგურები და პუნქტები; განაწილებისა და რგოლური გაზსადენების გაანგარიშება მინიმალური ინვესტიციისთვის; გაზის მოხმარების პროგნოზირების მეთოდების გაუმჯობესება; ანალიტიკური მეთოდებისა და მოდელების (პროგრამების) განვითარება გაზის მიწოდების სქემების მიზანშეწონილობის შესწავლასა და კომპიუტერების გამოყენება.

6. მიღებულია მზადყოფნის კოეფიციენტის, უმტყუნო მუშაობის ალბათობა და საშუალო დროისა და საფრთხეების მტყუნებების ანალიზური გამოსახულებები, სხვადასხვა სცენარები რეზერვირების გათვალისწინებით. ქსელის საიმედოობის გაანგარიშება და ოპტიმიზაცია იწვევს შრომის ინტენსივობის შემცირებას და ქსელის გამოყენების ეფექტურობის ხარისხის გაუმჯობესებას. ამავე დროს ხდება ადეკვატური ანალიტიკური მოდელების შემუშავება; ოპტიმიზაციის პრობლემების გადაწყვეტა საიმედოობისა და ხარჯების მაჩვენებლების სრული სიზუსტის გათვალისწინება, რაც განსაზღვრავს ქსელის ხარისხს და ეფექტურობას.

7. შემუშავებული საიმედოობის ოპტიმიზაციის პრობლემა შერჩეული მოდელებისათვის. მიღებული შედეგების გათვალისწინებით ჩამოყალიბდა კონკრეტული საწყისი მონაცემების ქსელის სტრუქტურისა და საჭირო

საიმედოობის მოთხოვნები. ჩატარდა ქვესისტემის დუბლირება, მათ შორის მონაცემთა შენახვისა და დამუშავების სისტემები. ქვესისტემების საიმედოობის პარამეტრების შემდგომი გაუმჯობესება იწვევს ეფექტურობის გაზრდას.

8. გაზგამანაწილებელი ქსელების პროექტირება გვიჩვენებს, რომ გაზის მოხმარების ოდენობა ითვლება მხოლოდ გაზსადენის დიამეტრის განსაზღვრისათვის. ეს გვიჩვენებს, რომ ოპტიმიზაციის ამოცანებში მომხმარებელთა მიერ გაზის მოხმარების ოდენობა პირდაპირ გავლენას არ ახდენს პროექტის ეკონომიკურ პარამეტრებზე. აგრეთვე გაზსადენების კონფიგურაციის ფორმირება და შესაბამისად მისი სათანადო აღრიცხვა - განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია.

9. განსხვავებით არსებული მეთოდებისაგან, შემუშავებულია მდგომარეობათა სასრული რაოდენობით და პარამეტრის ცვლილების უწყვეტი დროის, მქონე მარკოვის პროცესის შესაბამისი კოლმოგოროვის განტოლებები. მიღებულია გაზგამანაწილებელი რგოლური და ჩიხური კომბინაციის ქსელი. პირველად მიღებულია ალბათობის ცხადი ანალიზური გამოსახულებები, რაც იძლევა პრაქტიკულ და ზუსტ შედეგს. რეალური შპს „ყაზტრანსგაზ-თბილისის“ კონკრეტული ქსელის (ორი რგოლი და ერთი ჩიხი, ქ.თბილისის ვაჟა ფშაველას ქუჩაზე) საიმედოობის დადგენა, მიღებულია და შესაძლებელია ამ კომპანიის მიერ ქსელის მართვა საიმედოობის თვალსაზრისით. დადგენილია საშუალო წნევის გაზგამანაწილებელი ქსელის გაზსადენების გამტარუნარიანობისა და ენერგოდაზოგვის ეფექტური მეთოდები, კერძოდ ლუპინგის გამოყენება, მისი პარამეტრების დადგენა და მათი ოპტიმიზაცია. ნაშრომში მიღებული შემუშავებული რჩევები, რეკომენდირებულია ყველა გაზგამანაწილებელი კომპანიებისათვის და გასათვალისწინებელია მათი პრაქტიკაში დანერგვა.



## ლიტერატურა

1. Сухарев М.Г. и др. Методические аспекты статистической обработки данных о надежности оборудования магистральных трубопроводов. В кн. методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Кишинев. Штиница. 1984. Вып.29
2. Вольский Э.Л. Повышение эффективности единой системы газоснабжения страны. "Строительство трубопроводов". М., 1990. №8
3. Статистический анализ аварийности газораспределительных систем. Автор: М.Г. Сухарев, д.т.н., профессор; А.Г. Лапига, к.т.н.; Э.В. Калинина к.т.н РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина
4. Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта - М.: МГФ Знание, 2002. - 752 с.
5. А.М. Карасевич, М.Г. Сухарев, Э.В. Калинина, А.Г. Лапига, Ю.В. Дроздов, А.Л. Смирнин. Анализ надежности и безопасности распределительных систем газоснабжения по статистическим данным / Обз. инф. - М.: ООО «Газпром экапо», 2009. - 112 с. - (Транс-порт и подземное хранение газа)
6. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5\\_%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%81%D1%8B\\_%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE\\_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5_%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%81%D1%8B_%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B3%D0%B0%D0%B7%D0%B0)
7. Постановление Госгортехнадзора РФ от 26.08.2002 N 53. «О состоянии и мерах по снижению аварийности и травматизма на объектах магистральных газопроводов ОАО "Газпром"»;
8. <http://googleads.g.doubleclick.net/pagead/ads?client=ca-pub-9486360001572597&output> . . . Запасы природного газа в США. - 123.04.2013
9. <http://www.inosmi.ru/usa/20120607/193289748.html#ixzz29dNaE00>. США обойдут Россию по добыче газа. - 11.04.2013
10. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/stroitel/11584> - vobes ricxvi - 15.03.2013
11. Калинин В. М.. Оценка безотказности и прогнозирование долговечности трубопроводов подземной прокладки.  
[http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.phpnid=3370](http://www.abok.ru/for_spec/articles.phpnid=3370)

12. Ерёмкина В.В. Надежность информационных систем. Благовещенск. Изд. Амурского гос. Ун-та. 2007 г. 124 с
13. Голинкович Т.А. Прикладная теория надежности. М.: Высшая школа. 1977. 160 с
14. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В., Жилин А.В. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Томск. Изд-во ТПУ. 2008. 238 с
15. Сальников С.Ю. Энергоэффективные технико-технологические решения и транспорта газа//Наука и техника в газовой промышленности. 2011. №1. с. 19-33
16. Козлова Т.В. Обоснование выбора режимов газотрибунных газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов. Санкт-Петербург. Дисс. канд. техн. наук. 2013. с 178
17. Будзуляк Б.В., Шайхутдинов А.З., В.А. Щуровский. К вопросу о повышении эффективности транспортировки газа в России. // Газотурбинные технологии. 2003. № 6. С. 2-6.
18. Седых А.Д., Галлиулин З.Т., Леонтьев Е.В. и др. Трубы с гладкостным покрытием. // Газовая промышленность. 2000. № 10. С. 48-50.
19. Wang W.H., Chen L.G. Performance optimization of open cycle intercooled gas turbine power plant with pressure drop irreversibilities. // Journal of Energy Institute. 2008. № 1.
20. ნამგალაძე დ., ლომიძე ი., ბაინდურაშვილი გ.. გაზგამანაწილებელი ქსელის გაზსადენის გამტარუნარიანობის გაანგარიშება ლუპინგის საშუალებით. "ენერჯია", 2017, №2(82), გვ. 27-33.
21. ნამგალაძე დ., ლომიძე ი., ბაინდურაშვილი გ. მაგისტრალური მილსადენის სისტემის ჰიდრომექანიკური ფაქტორების გამოვლენა და ენერგოდამზოგავი რეჟიმების დასაბუთება. "ენერჯია", 2017, №4(84), გვ. 78-82.
22. ნამგალაძე დ., ბაინდურაშვილი გ. გაზგამანაწილებელი ქსელების არააღდგენადი სისტემის საიმედოობის მახასიათებლების დადგენა ცივი და მსუბუქი რეზერვირებისას, ლუპინგის არსებობაში. „საქართველოს საინჟინრო სიახლენი“ – GEN, 2018, № 3'18, გვ. 43-46.

23. Калинин, А.Ф. Повышение эффективности работы технологических участков магистральных газопроводов: дис. д-ра тех. наук: 25.00.19 / Калинин Александр Федорович. М., 2005. 327 с.
24. Сулейманов, А.М. Энергосбережение в технологических процессах трубопроводного транспорта газа: автореф. дис. канд. тех. наук: 25.00.19 / Сулейманов Азат Маратович. Уфа, 2005. - 22 с.
25. Черников, В.Ф. Оптимизация режимов участка магистрального газопровода / В.Ф. Черников, С.А. Джамирзе, А.Г. Ишков и др. // Газовая промышленность. 2010. - №9. - С. 42-44.
26. Mokhatab, Sieid Handbook of natural gas transmission and processing / Mokhatab Sieid, William A. Poe, James G. Speight. Oxford: Gulf Professional Publishing (Elsevier), 2006. - 636 p.
27. Tranter J. Developing an Integrated Condition Monitoring System // Proceedings of a Joint. Conf. Technology Show-case: Integrated Monitoring, Diagnostics and Failure Prevention, Mobile, Alabama, April 22-26, 1996, p. 587-598.
28. Новоселов В.Ф., Гольянов А.И., Муфтахов Е.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации газопроводов. <http://www.twirpx.com/file/1045972/>
29. Сугак Е.В., Василенко Н.В., Назаров Г.Г., Панышин А.Б., Каркарин А.П. Надежность технических систем. Красноярск: МГП «РАСКО», 2001.
30. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем / Пер с англ. М.: Мир, 1973.
31. РД 50-699-90. Методические указания. Надежность в технике. Общие правила классификации отказов и предельных состояний.
32. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
33. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.
34. Дунин-Барковский И.В., Смирнов Н.В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит. 1955.

35. Аксенов Б.Е., Афонькин И.В., Евменов В.П., Нечипоренко М.И. Основы теории вероятностей. Ч. 2. Л.: ЛПИ, 1974.
36. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М.: Ин. лит. 1956.
37. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. М.: Металлургия, 1968.
38. Надежность и эффективность в технике: Справ. В 10 т. Т. 5. М.: Машиностроение, 1988.
39. Шишонок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М.: Советское радио, 1964.
40. Судаков Р.С. Испытания технических систем. М.: Машиностроение, 1988.
41. Надежность и эффективность в технике: Справ. В 10 т. Т. 6. М.: Машиностроение, 1988.
42. Аварии и катастрофы Предупреждение и ликвидация аварий. Кн. 2. М.: Изд-во Ассоциации строительных ВУЗов, 1996.
43. Надежность технических систем: Справ. /Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В.Болотин и др.; Под ред. И.А.Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.
44. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Советское радио, 1975.
45. Зубова А.Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств. Л.: Машиностроение, 1978.
46. Построение математических моделей химико-технологических объектов. / Е.Г.Дудников, В.С. Балакирев, В.Н. Кривсуков. М.: Химия, 1970.
47. Бесчастнов М.В. Взрывобезопасность и противоаварийная защита химико-технологических процессов. М.: Химия, 1983.
48. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие требования по надежности. М.: Изд-во стандартов, 1990.
49. Труханов В.М. Методы обеспечения надежности изделий машиностроения. М.: Машиностроение, 1995.

50. Надежность в машиностроении: Справ. СПб.: Политехника, 1992.
51. РМ-87–88. Руководящий материал. Системы автоматизации технологических процессов.
52. РМ4-224–89. Пособие к ВСН 205–84/ММСС СССР. Системы автоматизации технологических процессов. Требования к выполнению электроустановок систем автоматизации во взрывоопасных зонах.
53. ГОСТ 12.2.085–82. Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности.
54. ПБ 03-221–98. Правила разработки, изготовления и применения мембранных предохранительных устройств.
55. НПБ 53–96. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Пожарные запорные устройства. Общие технические требования. Номенклатура показателей. Методы испытаний. Утв. МВД от 30.04.96 г.
56. Маннанов Г.Р. Оценка надежности химического и нефтехимического оборудования при поверхностном разрушении / Обз. инф. Сер. ХМ-1, М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1988.
57. Маннанов Р.Г. Методы оценки надежности оборудования, подвергающегося коррозии. М.: 1990.
58. Ионов А.В., Буренин В.А. Прогноз развития физико-химических процессов в конструктивных элементах РВС для совершенствования стратегии технического обслуживания и ремонта // Башк. хим. журн. 1995. Т. 2. Вып. 3–4.
59. Бартоломей П.И. Логические основы дискретных автоматов. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. 2001.
60. Александров А.В., Смирнов В.А., Гарляускас А.И., Кузнецов Ю.А. Проблема надежности единой газоснабжающей системы АН СССР Научный Совет по комплексным проблемам энергетики, М., 1973, с.1-13.
61. Александров А.В., Смирнов В.А., Максимов Ю.И. Методологические вопросы обеспечения надежности Единой газоснабжающей системы.
62. В инф.сб. "Экономика, организация и управление в газовой промышленности", М., ВНИИЭгазпром, 1970, № 3, с.6-8, 10.

63. Андреев Б.П., Кузнецов Ю.А., Макаров А.А. Исследование свойств замыкающего топлива и замыкающих затрат. В сб. "Методы математического моделирования в энергетике", Восточно-Сибирское кн. изд., 1966, с.9,7-105.
64. Арянин А.Н., Арский А.К., Кузнецов Ю.А. и др. Оптимизация развития по времени сложных газопроводных систем.-"Экономика и математические методы", 1970, т.6. № I, с.105—III.
65. Бархударян И.Г., Дагестанян М.Г. К вопросу построения математических моделей перспективного прогнозирования режимов газопотребления, депониров.рукопись № 63М, М., ВНИИЭгазпром, 1978,с.2-9.
66. Баясанов Д.Б., Ионин А.А. Распределительные системы газоснабжения, М., Стройиздат, 1977, с.224-248, 25-26.
67. Беляев Л.С., Вайцеховская Г.В., Харченко Н.П. Особенности решения динамических задач в условиях неопределенности. В кн. "Учет неопределенности исходной информации", - Иркутск, СЭИ СО АН СССР, 1973, вып. I, с.52-68.
68. Shiqing Cheng and all. A Novel Well-Testing Model to Analyze Production Distribution of Multi-Stage Fractured Horizontal Well. Journal of Natural Gas Science and Engineering. Sep 2018
69. Hassen Sellami M, Benzaoui L and Mouhoubi I. Prevention against Deposits at the Bottom of Oil Stabilization Column.. J. Oil & Gas Research. 2016:Volume2,Issue 3.
70. Лурье А.Л., Нит И.В. Экономико-математическое моделирование социалистического хозяйства. Изд.Московского университета, 1973, с.10-11, 56-59, 77-80.
71. Ляуконис А.Ю. Выбор оптимальных параметров систем газоснабжения с учетом экономической неопределенности "Экономика, организация и управление в газовой промышленности", М., ВНИИЭгаз-пром, 1979, вып.7,с.1-35.
72. Zhang Wentong and all. Relationship between the stress sensitivity and pore structure of shale. Journal of Natural Gas Science and Engineering · September 2018

73. Жиганнуров, Р.М. Развитие методов и средств неразрушающего контроля магистральных трубопроводов / Р.М. Жиганнуров, И.А. Шаммазов, Б.Н. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов. - №2-3.- 2009- С. 3-9.
74. Коробков, Г. Численное моделирование напряженно деформированного состояния и устойчивости трубопроводов и резервуаров в осложненных условиях эксплуатации / Г.Е. Коробков, Р.М. Зарипов И.А. Шаммазов. - СПб.: Недра, 2009. - 410 с.
75. Намгаладзе Д.П., Кизирия Т.И., Определение функции надежности резервированного элемента энергетического объекта. Тбилиси. GEN. #3. 2007
76. Рейншке К. Модели надежности и чувствительности систем. М., Мир. 1979
77. Головач Ю.А., Захаров В.И. Анализ зависимости параметра потока отказов от диаметра газопроводов. Вісник Донбаської академії будівництва і архітектури. 2016. вып. 2010-6 (86). с 117-122
78. Варфоломеев В.А. и др. Справочник по проектированию, строительства и эксплуатации систем газоснабжения. К. Будівельник. 1988. 238 с
79. Солодков С. А., Корнев С. А. Оптимизация схем газораспределительных систем // Молодой ученый. 2015. №24. С. 216-218.
80. [https://gost.one/document/GOST\\_1362291-50923](https://gost.one/document/GOST_1362291-50923)
81. [https://archive.org/stream/vspomogatelnia00bersgoog/vspomogatelnia00bersgoog\\_djvu.txt](https://archive.org/stream/vspomogatelnia00bersgoog/vspomogatelnia00bersgoog_djvu.txt)
82. Baku state University (kitabxana&Riyaziyyat)
83. <http://trims.edu.az/noduploads/book/quot-%E1%83%9B%E1%83%90%E1%83%97%E1%83%94%E1%83%9B%E1%83%90%E1%83%A2%E1%83%98%E1%83%99%E1%83%90-quot-riyaziyyat-fanni-uzra-10-cu-sinif-ucun-darslik.pdf>