

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

მამუკა ჩხაიძე

გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების (გცბოს)

კვლევა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ტელეკომუნიკაციის  
თეორიისა და სისტემების მიმართულებით

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ტ.მ.დ. პროფ. რ.სვანიძე

რეცენზენტები: -----  
-----

დაცვა შედგება ----- წლის ”-----” -----, ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----  
----- ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს  
კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა – სტუ-ს ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. ნაშრომის აქტუალობა განპირობებულია ტელეკომუნიკაციის განვითარების თანამედროვე ეტაპზე გადასაყვამი ციფრული ინფორმაციის მოცულობის, სიჩქარეების განუხრელი ზრდის, გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების (გცბოს) ეფექტურობის ამაღლებისა და სისტემის ცალკეული კვანძების სრულყოფასთან დაკავშირებული კვლევის აუცილებლობით. გცბოს წარმოადგენს სატელეკომუნიკაციო ინფრასტრუქტურის ძირითად სატრანსპორტო საშუალებას. ბოლო ათწლეულში ტელეკომუნიკაციის განვითარების სამი პრიორიტეტიდან: მობილური და უსადენო ტელეკომუნიკაცია, მონაცემების გადაცემა და ინტერნეტი, გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემები – ამ უკანასკნელს განსაკუთრებული მინიშვნელობა ენიჭება, ვინაიდან გცბოს არის ყველა თანამედროვე სადენიანი ტექნოლოგიის ATM (Asynchronous Transfer Mode - გადაცემის ასინქრონული რეჟიმი), SDH (Synchronous Digital Hierarchy - სინქრონული ციფრული იერარქია, PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy - პლესიოქრონული ციფრული იერარქია), ინტერნეტის (Internet), გავრცელების ძირითადი გარემო. ამდენად, ამ გარემოს ფუნქციონირებაზე ბევრად არის დამოკიდებული მთლიანად მითითებული ტექნოლოგიების მუშაობის საიმედოობა, ხელშეშლამდგრადობა, გადაცემის ხარისხობრივი მაჩვენებლები.

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს გცბოს, მისი ცალკეული კვანძები: სახაზო ტრაქტი, მულტიპლექსირების დროითი TDM (Time Division Multiplexing) და ტალღური WDM (Wavelength Division Multiplexing) სისტემები, სახაზო კოდეკი, ოპტიკური მიმღები, გცბოს-ში ჯიტერისა და ვანდერის წარმოშობის ფიზიკური ბუნება და ხასიათი, ჯიტერის გაზომვისა და შეფასების მეთოდოლოგია, თვალის დიაგრამის ანიმაციური მოდელი, ოპტიკური მიმღების გამაძლიერებლის ოპტიმიზაცია.

**კვლევის საგანია:** გცბოს-ის მიმღების სახაზო ტრაქტის კვლევა რეგენერაციული უბნის ოპტიმიზაციის თვალსაზრისით; გცბოს-ის დროითი მულტიპლექსირების (TDM) და ტალღური მულტიპლექსირების (WDM) სისტემების შედარებითი ანალიზი; ჯიტერი, მისი გამომწვევი მიზეზები, მისი გაზომვისა და შეფასების მეთოდოლოგია, ჯიტერის შეფასება თვალის დიაგრამის ანიმაციური მოდელით; გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების ოპტიკური მიმღების გამაძლიერებლის შერჩევა; გცბოს-ის დისციპლინაში სალექციო, საპროექტო და პრაქტიკული კურსების დამუშავება.

**სამუშაოს მიზანი.** სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს თანამედროვე გცბოს-ის კვლევა როგორც თეორიული, ისე პრაქტიკული მიმართულებით. გცბოს-ში თანამედროვე დონის სალექციო, საპროექტო და პრაქტიკული კურსის მომზადება, რომელშიც ჩამოყალიბებული იქნება გცბოს-ის თეორია, პრაქტიკა, მოდელები და სხვა თვალსაჩინო მასალა, რაც ხელს შეუწყობს ამ მიმართულებით კადრების მომზადებას.

**ძირითადი ამოცანები:**

- ძირითადი მახასიათებლების ფორმალიზაცია და მონაცემთა ბაზის ფორმირება გცბოს-ის მოდელირებისათვის;
- რეგენერაციული უბნის (რუ) სიგრძის ოპტიმიზაცია გცბოს-ში;
- სახაზო სიგნალების ენერგეტიკული სპექტრის გამოთვლის ახალი მიდგომები და ამ პროცესის ავტომატიზაცია გცბოს-ში;
- გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური TDM და WDM ტექნოლოგიების შედარებითი ანალიზი;
- ჯიტერი, მისი გაზომვისა და შეფასების ასპექტები გცბოს-ში; ჯიტერის შეფასების მეთოდოლოგია; ჯიტერის შეფასება თვალის დიაგრამის ანიმაციური მოდელით;
- გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების ოპტიკური მიმღების გამაძლიერებლის შერჩევა-ოპტიმიზაცია;

**კვლევის მეთოდები:** გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების თეორია; შემთხვევითი პროცესების ალბათური ანალიზი; მატრიცების თეორია; იმიტაციური მოდელირება; სიგნალების გადაცემის თეორია; წრფივი პროგრამირება.

**ნაშრომის მეცნიერული სიახლე, ძირითადი შედეგები, თეორიული და პრაქტიკული ღირებულება.** ნაშრომის ყველა ძირითადი შედეგი ახალია. ნაშრომში სისტემატიზებულია მასალა გცბოს-ის კვლევის მიმართულებით: გცბოს-ის ძირითადი მახასიათებლების ფორმალიზაცია, მონაცემთა ბაზის ფორმირება. შემოთავაზებულია სახაზო სიგნალების ენერგეტიკული სპექტრების გამოთვლის იტერაციული მეთოდი, დასაბუთებულია ამ პროცესის ავტომატიზაციის შესაძლებლობა. განხილულია ჯიტერის შეფასებისა და გაზომვის ასპექტები, შემოთავაზებულია ჯიტერის შეფასების მეთოდოლოგია, ანიმაციურ-იმიტაციური მოდელი, ოპტიკური მიმღების გამაძლიერებლის არჩევა და სხვა. ყოველივე ეს საშუალებას იძლევა გცბოს-ის დაგეგმარების დროს მოვახდინოთ მისი ცალკეული კვანძების რაციონალური შერჩევა და ოპტიმიზაცია.

**ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება** მდგომარეობს შემდეგში: მოყვანილია რეკომენდაციები გცბოს-ის მიმღები მოწყობილობის ფოტოდეტექტორის, წინასწარი გამაძლიერებელი მოწყობილობის, რეგენერაციული უბნის ანგარიშის, ჯიტერის შეფასების მეთოდოლოგიის საკითხებზე, რომლებიც შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას გცბოს-ის დაპროექტების, ექსპლუატაციისა და ტესტირების, სისტემის კომპონენტების, პარამეტრებისა და მახასიათებლების ოპტიმიზაციის დროს.

**ნაშრომის აპრობაცია.** სადისერტაციო ნაშრომის შესახებ ძირითადი შედეგები სხვადასხვა წლებში მოხსენებული და განხილული იყო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციებზე და სემინარებზე. მათ შორის:

- თბილისის დავით აღმაშენებლის სახელობის უნივერსიტეტის

პროფესორ-მასწავლებელთა და სტუდენტთა XVII სამეცნიერო კონფერენციაზე. თბილისი, მაისი, 2010 წ. [1];

- აკადემიკოს ი.ფრანგიშვილის დაბადების 80 წლისთავისადმი მიძღვნილ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე, „საინფორმაციო და კომპიუტერული ტექნოლოგიები, მოდელირება, მართვა.“ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, ნოემბერი, 2010 წ. [2];

- მართვის ავტომატიზებული სისტემების შრომებში. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2011 წ. [6];

- საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა და დოქტორანტთა 79-ე ღია საერთაშორისო კონფერენციაზე, თბილისი, 2011 წ. [11];

- პირველი თემატური სემინარი. გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების კვლევა. თბილისი, 2011 წ.

- მეორე თემატური სემინარი. გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური TDM და WDM ტექნოლოგიების შედარებითი ანალიზი. თბილისი, 2012 წ.

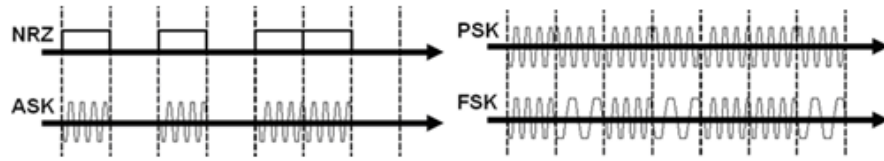
ნაშრომი საფუძვლად დაედება სასწავლო კურსს საგანში „გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სტუდენტებისათვის.

**ნაშრომის პუბლიკაციები** - სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი მასალები გამოქვეყნებულია 11 სამეცნიერო სტატიაში.

**ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა** - ნაშრომის ტექსტი შედგება შესავლის, ხუთი თავისა და 110 დასახელების გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალისგან. ნაშრომის მოცულობა შეადგენს 168 გვერდს ცხრილებისა და ნახაზების ჩათვლით. სამი დანართით.

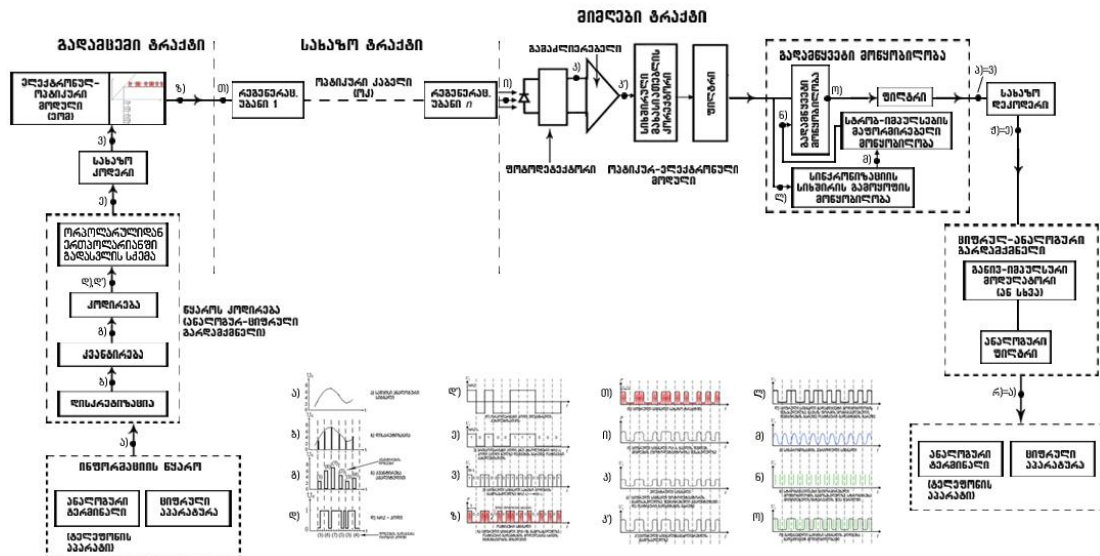
ნაშრომის შესავალში წარმოდგენილია ტელეკომუნიკაციაში გავრცელებული მოდულაციის ძირითადი ტიპები (ნახ.შ.1): ამპლიტუდური (ASK – Amplitude-Shift Keying), ფაზური (PSK – Phase-Shift Keying) და

სიხშირული (FSK – Frequency-Shift Keying). ძირითადად განხილულია გცბოს-ში ყველაზე ხშირად გამოყენებული ამპლიტუდური მოდულაცია.



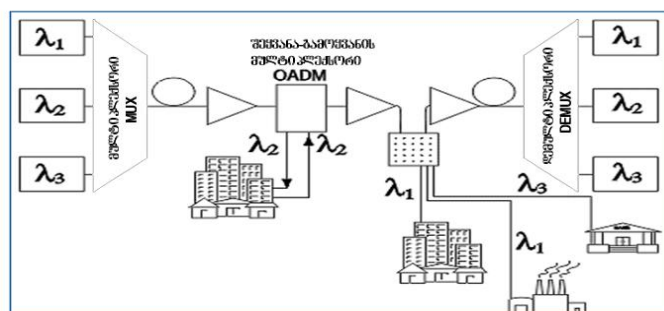
ნახ.შ.1. მოდულაციის სახეები

ნახ.შ.2-ზე მოყვანილია გცბოს-ის TDM (Time Division Multiplexing) - ერთტალღიანი დროითი მულტიპლექსირების სისტემის გამარტივებული სტრუქტურული სქემა და მისი ფუნქციონირების დროითი დიაგრამები. ამ სქემის კვანძების კვლევა წარმოადგენს ნაშრომის ძირითად ამოცანას.



ნახ.შ.2. გცბოს-ის გამარტივებული სტრუქტურული სქემა (TDM - ერთტალღიანი მულტიპლექსირების სისტემა)

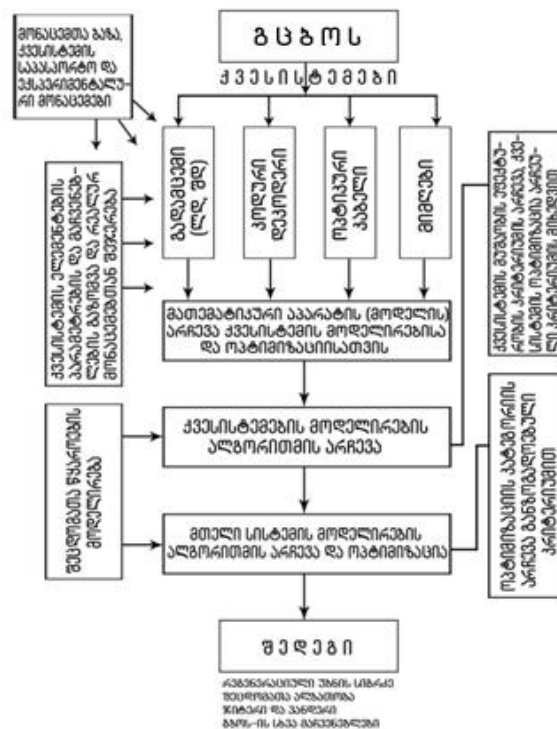
ნახ.შ.3-ზე წარმოდგენილია ტალღური მულტიპლექსირების (WDM) ტიპური სქემა შეყვანა-გამოყვანის მოწყობილობით და კროს კომუტაციით.



ნახ.შ.3. WDM სისტემის ტიპური სტრუქტურული სქემა არხების დამატება/გამოყოფით და კროს კომუტაციის მოწყობილობებით

პირველ თავში წარმოდგენილია ძირითადი მახასიათებლების ფორმალიზაცია გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების (გცბოს) მოდელირების დროს, მონაცემთა ბაზის ფორმირება და რეგენერაციული უბნის (რუ) სიგრძის ოპტიმიზაცია [1,2]

ნაშრომში შემუშავებული გცბოს-ის, როგორც მოდელირების რთული სისტემის, სტრუქტურული სქემა წარმოდგენილია ნახ.1.1-ზე.



ნახ.1.1. გცბოს, როგორც მოდელირების რთული სისტემის სტრუქტურული სქემა

მიმღები ოპტიკური მოდულის (მომ) ძირითად კვანძს ფოტოდეტექტორი წარმოადგენს, რომელიც, როგორც წესი, აიგება p-i-n ან ზეგვისებურ ფოტოდიოდებზე ზფდ (APD – Avalanche photodiode). p-i-n ფოტოდიოდის მგრძნობიარობა (დეტექტირებადი ოპტიკური სიმძლავრის მინიმალური დონე) იანგარიშება ფორმულით:

$$\bar{P}_{p-i-n} = \frac{A_{\lambda}}{\eta_m} \cdot \sqrt{i_{p-i-n}^2}, \quad (1.1)$$



სადაც,  $\eta_m$  - ფოტოდეტექტორის კვანტური ეფექტურობაა,  $A_\lambda = Q_{ფგ} \cdot \left( \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda} \right)$  - კოეფიციენტი, რომელიც ფოტოდეტექტორზე დაცემული ფოტონის ენერგიის პროპორციულია,  $Q_{ფგ}$  - არის შეცდომათა ალბათობის პარამეტრი, რომელიც დამოკიდებულია შეცდომათა ალბათობის მნიშვნელობაზე გცბოს-ში.  $c$  - სინათლის სიჩქარეა,  $h$  - პლანკის მუდმივაა,  $e$  - ელექტრონის მუხტია,  $\lambda$  - ერთტალღიანი გადაცემის ოპტიკურ სისტემაში გამოყენებული ტალღის სიგრძეა,  $\overline{i^2}_{p-i-n}$  - ხმაურის დენის საშუალო კვადრატული მნიშვნელობაა, რომელიც გამოითვლება ფორმულით:

$$\overline{i^2}_{p-i-n} = 4kT(2\pi C_\Sigma)B^2 \left[ \frac{\ln_2}{2K} + \frac{\ln_3(2\pi C_\Sigma)BF_n}{S_m} \right], \quad (1.2)$$

სადაც,  $C_\Sigma$  - ფოტოდიოდის წინასწარი გამაძლიერებლის და მონტაჟის ჯამური ტევადობაა,  $F_n$  - ველის ტრანზისტორის ხმაურ-ფაქტორია,  $\ln_2, \ln_3$  - პერსონიკის ინტეგრალებია,  $B$  - გადაცემის სიჩქარეა,  $S_m$  - ველის ტრანზისტორის დახრილობაა,  $K$  - კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს ფოტომიმდების შესასვლელ წრედში ინტეგრირების სიღრმეს,  $k$  - ბოლცმანის მუდმივაა.

ზვავისებური ფოტოდიოდისთვის ფოტოდიოდის მგრძნობიარობა გამოითვლება ფორმულით:

$$\overline{P}_{ფგ} = \frac{A_\lambda}{\eta_m} \cdot \left[ \frac{\sqrt{\overline{i^2}_{p-i-n}}}{M} + e \cdot Q_{ფგ} \cdot F \cdot \ln_1 \cdot B \right], \quad (1.3)$$

სადაც,  $M$  - გამრავლების კოეფიციენტი.

მაკინტაიერის აპროქსიმაციის შემთხვევაში ჭარბი ხმაურის დროს გვაქვს:

$$F = M \left\{ 1 - (1 - K) \left[ \frac{M - 1}{M} \right]^2 \right\}, \quad (1.4)$$

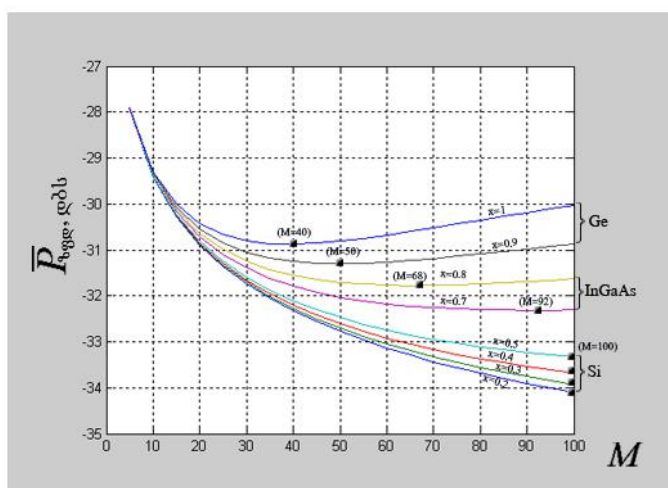
სადაც,  $K$  - მუხტის მატარებლების დარტყმითი იონიზაციის კოეფიციენტი,  $K \leq 1$ .

ხმაურ-ფაქტორისა და ზფდ-ის გამრავლების კოეფიციენტის დამოკიდებულება  $F(M)$  ფოტოდიოდის გარღვევის უბანში შეიძლება აპროქსიმირებულ იქნას, როგორც:

$$F \geq (M) = M^x, \quad (1.5)$$

სადაც,  $x=0.2-0.5$  კრემნიუმის დიოდებისათვის,  $x=0.7-0.8$  InGaAs დიოდებისათვის,  $x=0.9-1$  გერმანიუმის დიოდებისათვის.

ფოტომიმლების მგრძნობიარობის დამოკიდებულება ზფდ-ის გამრავლების კოეფიციენტზე გადაცემის სიჩქარისათვის  $B=2.5$  გბტ/წმ მოცემულია ნახ.1.2-ზე.



ნახ.1.2. ზვავისებური ფოტოდიოდის (ზფდ) მიმღები ოპტიკური მოდულის მგრძნობიარობის ზღურბლის დამოკიდებულება ზფდ-ის გამრავლების კოეფიციენტზე  $M$ , სხვადასხვა დიოდებისათვის. გადაცემის სიჩქარე  $B=2.5$  გბტ/წმ.

გადაცემის სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალი:

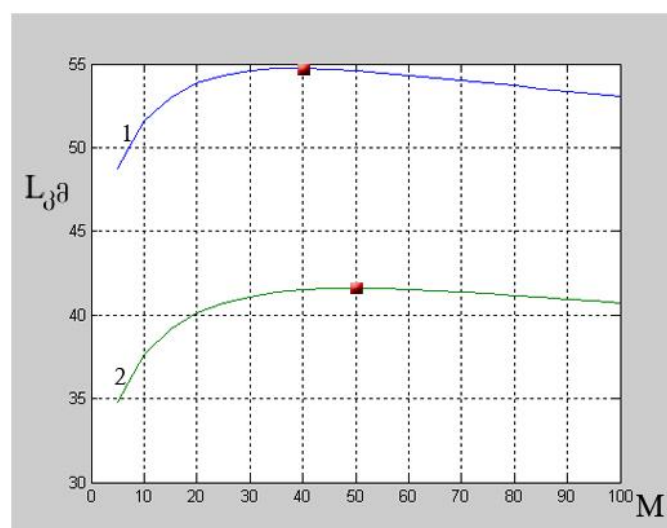
$$\Pi = P_{\text{გადც.}} - P_{\text{შეყვ.}} - P_{\text{გამოყ.}} - P_t - P_{\text{მარაგი}} - P_{\text{მიღ.}} \quad (1.6)$$

რეგენერაციული უბნის სიგრძე გამოითვლება ფორმულით:

$$L_{\text{რეგ}} = \frac{\Pi - 2 \cdot a_{\text{რაზ}} + a_{\text{არარაზ}}}{\frac{a_{\text{არარაზ}}}{l} + \alpha}, \text{ კმ} \quad (1.7)$$

ნახ.1.3-ზე წარმოდგენილია რეგენერაციული უბნის დონეების დიაგრამა და რეგენერაციული უბნის სიგრძე: 1 მრუდი – გადაცემის

ნახ.1.4-ზე მოყვანილია რეგენერაციული უბნის სიგრძის  $L$ -ის ცვლილებების დამოკიდებულება ზედა-ს გამრავლების კოეფიციენტ  $M$ -ზე. 1-ისთვის -  $B=0.1$  გბტ/წმ,  $x=1$ , ხოლო 2 მრუდისთვის -  $B=2.5$  გბტ/წმ,



11

ამრიგად, მომ-ში ზფდ-ს გამოყენებისას გამრავლების კოეფიციენტის ოპტიმალური მნიშვნელობის დადგენის შემთხვევაში რეგენერაციული უბნის სიგრძე შესაძლებელია გაგრძელდეს 10%-ით არაოპტიმალური გამრავლების კოეფიციენტის დროს რეგენერაციული უბნის სიგრძესთან შედარებით. ამ მიზნით საჭიროა შერჩეულ იქნას შესაბამისი ტიპის ზვავისებური ფოტოდიოდი, მუშაობის სათანადო რეჟიმში.

**მეორე თავში წარმოდგენილია სახაზო სიგნალების ენერგეტიკული სპექტრების გამოთვლის ახალი მეთოდოლოგია გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში [3,4]**

გცბოს-ის ძირითადი მახასიათებლები (რეგენერაციული უბნის სიგრძე, სიგნალების დამუშავების მეთოდები, რეგენერატორებში შეცდომათა კონტროლის მექანიზმი, სინქრონიზაციის სისტემა, ხელშეშლამდგრადობა, სახაზო ტრაქტში სიგნალების დამახინჯება და სხვა) მნიშვნელოვანწილად არის დამოკიდებული სახაზო კოდზე, რომლის ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს ენერგეტიკული სპექტრი. ამდენად, გცბოს-ის სახაზო სიგნალების ენერგეტიკული სპექტრების გამოთვლა მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს.

ნაშრომში გამოყენებულია იტერაციული პროცესები, რომლებშიც შეთავსებულია სპექტრალური და ვარიაციული მეთოდების ოპტიმიზაცია.

ენერგეტიკული სპექტრის გამოთვლის კლასიკური მეთოდი ეფუძნება ლ.პოლიაკის და სტატისტიკური რადიოტექნიკიდან ცნობილ ბ. ლევინის მიერ მიღებულ გამოსახულებებს, რომლებიც დამყარებულია ლაგრანჟის საინტერპოლაციო პოლინომის გამოყენებაზე. ეს მეთოდი გულისხმობს  $M'$  (ანუ იგივე  $M$ ) მატრიცის საკუთრივი რიცხვების ცოდნას, მათი ჯერადობის გათვალისწინებით, როგორც ნამდვილ, ასევე კომპლექსურ შემთხვევაში. ამ მეთოდის ნაკლს წარმოადგენს გამოთვლის სირთულე იმ შემთხვევაში, როცა მატრიცის რიგი იზრდება (მაგ.  $N=20,40,80...$ , სადაც,  $N$ -მატრიცის რიგია). აღსანიშნავია, რომ საკუთრივი რიცხვების მოძებნა გაცილებით რთულია, ვიდრე ამავე მატრიცისათვის

წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემების ამოხსნა. შემდგომში ლ. პოლიაკის და რ. სვანიძის, აგრეთვე რ. სვანიძის და კ. მესტიაშვილის მიერ მიღებულ იქნა ენერგეტიკული სპექტრის გამოსათვლელი გამოსახულება, რომელიც არ საჭიროებს მატრიცის საკუთრივი რიცხვების  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  ცოდნას. აქ მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მოცემული  $M'$  (ანუ  $M$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომი. ნაშრომში წარმოდგენილია ორი მეთოდი. პირველი მეთოდი ეყრდნობა ხორნ-ჯონსონის მონოგრაფიას, ხოლო მეორე წარმოადგენს დეინეკის და მისი თანაავტორების მიერ მოდიფიცირებულ აკად. კრილოვის მეთოდს.

სახაზო სიგნალების ენერგეტიკული სპექტრის გამოსათვლელ კლასიკურ გამოსახულებას სიგნალებისათვის დეტერმინირებული სატაქტო ინტერვალით აქვს შემდეგი სახე:

$$F_{\text{შეშვ.}}(\omega) = \frac{2\tau_0^2 |g(\omega\tau_0)|^2 U^2}{T} K \left\{ E - [(M^*)']^2 \right\} \left\{ E - 2(M^*)' \cos \omega T + [(M^*)']^2 \right\}^{-1} PK' - KM_0 PK' \quad (2.1)$$

$$F_{\text{დისკრეტ.}}(\omega) = \frac{4\pi\tau_0^2 |g(\omega\tau_0)|^2 U^2}{T^2} K \left\{ E - [M'(1)]^2 \right\} \left\{ E - 2M'(1) \cos \omega T + [M'(1)]^2 \right\}^{-1} [M'(1)] PK' \quad (2.2)$$

სადაც,  $\tau_0$  - ინფორმაციული იმპულსის ხანგრძლივობაა,  $g(\omega\tau_0)$  - ერთეულოვანი იმპულსის ფურიეს გარდაქმნაა,  $U_0$  - ერთეულოვანი დონის იმპულსის ამპლიტუდაა,  $T$  - ტაქტური ინტერვალია,  $K$  - მატრიცა-სტრიქონია, რომლის ელემენტები წარმოადგენს სახაზო სიგნალის იმპულსების ამპლიტუდის დონეს,  $E$  - ერთეულოვანი მატრიცაა,  $P$  - ფინალური მატრიცა.

$$M(1) = M \left[ \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda^h - 1} \right]_{\lambda \rightarrow M} / \left[ \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda^h - 1} \right]_{\lambda \rightarrow 1}; \quad M_0 = \left[ \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda^h - 1} \right]_{\lambda \rightarrow M} / \left[ \frac{\Delta(\lambda)}{\lambda^h - 1} \right]_{\lambda \rightarrow 1}; \quad M^* = M - M(1);$$

$\Delta(\lambda)_\Delta$  -  $M$  მატრიცის მახასიათებელი მრავალწევრია,  $\lambda \rightarrow M$  - ნიშნავს  $\lambda$  სკალარის შეცვლას  $M$  მატრიცით (შესაბამისად  $\lambda \rightarrow 1$  ნიშნავს  $\lambda$  სკალარის შეცვლას 1-ით).

$P$  - ფინალური ვექტორის განსაზღვრისათვის საჭიროა ამოიხსნას წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემა.

$$M'P = P,$$

P-ს ნორმირებით, მაგალითად ასე  $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$ , შესაძლებელია წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემა

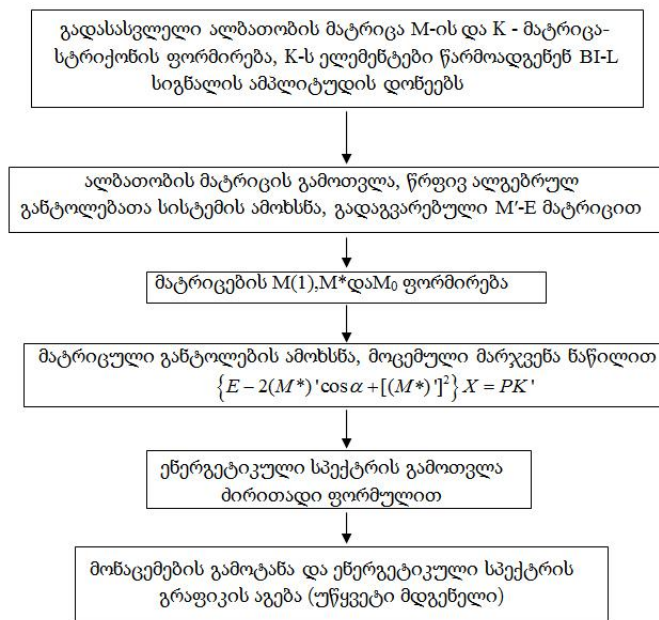
$$\begin{cases} M'P = P \\ \sum_{j=1}^n P_j = 1 \end{cases}$$

ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$AX = f, \quad (2.3)$$

რომელსაც ვხსნით იტერაციული მეთოდით.

ნახ.2.1-ზე წარმოდგენილია BI-L (მანჩესტერის კოდი) სახაზო სიგნალის ენერგეტიკული სპექტრის გამოთვლის პროცედურა.



ნახ.2.1. BI-L სახაზო სიგნალის ენერგეტიკული სპექტრის გამოთვლის პროცედურა

პირველი მეთოდის გამოყენებისას  $\Delta(\lambda)$ -ის დადგენისათვის განვსაზღვროთ ასახვა  $T: M_n \rightarrow C^{n^2}$  შემდეგნაირად: ჩავწეროთ M შემდეგი სახით  $M = [m_1, m_2, \dots, m_n]$  - სადაც პირველი n - ელემენტი წარმოადგენს M მატრიცის პირველი სვეტის ელემენტებს, შემდეგი n - ელემენტი წარმოადგენს მეორე სვეტის ელემენტებს და ა.შ. ეს გამოსახულება არის ვექტორული სივრცის  $M_n$  და  $C^{n^2}$  იზომორფიზმი (ანუ წრფივი ურთიერთცალსახა ასახვა). განვიხილოთ ვექტორების მიმდევრობა:

$$\begin{aligned} \nu_0 &= T(E), \\ \nu_i &= T(M^i), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

აღნიშნოთ, რომ ვექტორთა სიმრავლე  $\{\nu_0, \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n\}$  წრფივად დამოკიდებულია.

ახლა გამოვიყენოთ გრამა-შმიდტის ორთოგონალიზაციის პროცესი  $\nu_0, \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$  ვექტორებისათვის.

$$\begin{aligned} \tilde{\nu}_0 &= \nu_0 \\ \tilde{\nu}_1 &= \nu_1 + a_{12}\nu_0 \quad a_{12} = -\frac{(\nu_0, \nu_1)}{(\nu_0, \nu_0)} \\ &\dots \\ \tilde{\nu}_k &= \nu_k + a_{k-1,1}\nu_0 + a_{k-1,2}\nu_1 + \dots + a_{k-1,k-1}\nu_{k-1} \end{aligned}$$

სადაც  $a_{i,j}$  განისაზღვრება ორთოგონალიზაციის პირობებიდან.

$$(\nu_i, \nu_j) = 0, i \neq j; \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

ორთოგონალიზაციის პროცესი მიმდინარეობს მანამდე, სანამ არ მივიღებთ ნულოვან ვექტორს. რადგან ნებისმიერ  $p$ -განზომილებიან სივრცეში ყოველი  $(p+1)$  ვექტორისაგან შემდგარი სისტემა წრფივად დამოკიდებულია, ზემოთ აღნიშნული პროცესის შედეგად აუცილებლად მივიღებთ ნულოვან ვექტორს.

თუ ნულოვანი ვექტორი მიღებულია  $K$ -ურ ბიჯზე, მაშინ  $M$  მატრიცის მინიმალური მრავალწევრის მაჩვენებელი არის  $K-1$ .

აქედან გამომდინარეობს, რომ თუ  $K$ -ურ ბიჯზე გამოითვლება გრამა-შმიდტის ორთოგონალიზაციის ნულოვანი ვექტორი:

$$0 = (\alpha_0\nu_0, \alpha_1\nu_1, + \dots + \alpha_K\nu_{K-1})$$

მაშინ

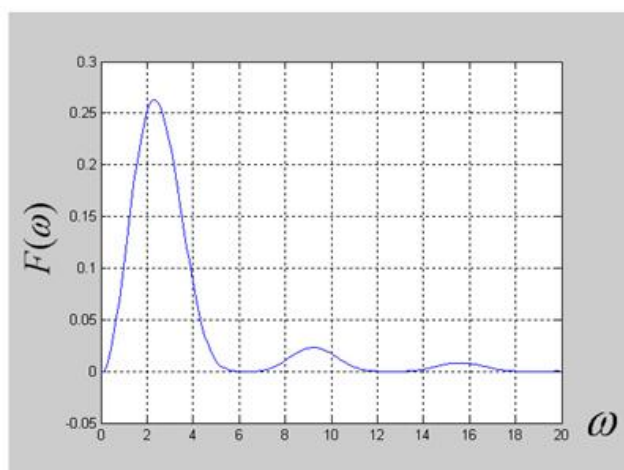
$$T^{-1}(\alpha_0\nu_0, \alpha_1\nu_1, + \dots + \alpha_K\nu_{K-1}) = \alpha_0 I + \alpha_1 M + \alpha_2 M^2 + \dots + \alpha_{K-1} M^{K-1} = 0$$

ეს ნიშნავს, რომ  $q_M(t) = (\alpha_{K-1} M^{K-1} + \alpha_{K-2} M^{K-2} + \dots + \alpha_1 M + \alpha_0) / \alpha_{K-1}$  არის  $M$  მატრიცის მახასიათებელი მრავალწევრი.

ამრიგად, BI-L სახაზო სიგნალის ენერგეტიკული სპექტრის ზემოთ აღნიშნული იტერაციული მეთოდით გამოთვლის დროს გამოთვლის

პროცესი მნიშვნელოვნად მარტივდება და მთლიანად ექვემდებარება ავტომატიზაციას. მიღებული შედეგი ემთხვევა კლასიკური მეთოდით დათვლილ სიგნალის ენერგეტიკულ სპექტრს.

ნახ.2.2-ზე მოყვანილია BI-L სახაზო სიგნალის ენერგეტიკული სპექტრი (უწყვეტი მდგენელი), რომელიც გამოთვლილია შებრუნებული მატრიცების მეთოდით, იტერაციული პროცესის გამოყენებით, ფიქსირებული სიზუსტით  $\varepsilon = 0,000001$ .



ნახ.2.2. BI-L სახაზო სიგნალის ენერგეტიკული სპექტრი

ნაშრომში შემოთავაზებულია აგრეთვე ალბათური მატრიცებისათვის მახასიათებელი პოლინომის აგების მეორე მეთოდი, რომელიც დიდი ზომის ალბათური  $M$  ( $M'$ ) მატრიცებისათვის საშუალებას იძლევა მატრიცის მახასიათებელი პოლინომის გამოთვლა დაყვანილ იქნას მცირე ზომის  $V$  ( $V'$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომის დათვლაზე. ალბათურ მატრიცებთან დაკავშირებული გამოთვლები პირველ შემთხვევასთან შედარებით კიდევ უფრო მარტივდება.

დებულება 1. mBnB კლასის გადასვლის ალბათობის  $M$  მატრიცა შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი ბლოკური სახით:

$$M = \begin{bmatrix} \ominus & E & & \\ & \ominus & & \\ & & \ominus & \\ V & & & \ominus \end{bmatrix},$$



სადაც, ყოველი ბლოკური მატრიცა  $\Theta, E, V$  წარმოადგენს  $m$  რიგის კვადრატულ მატრიცას.

ასეთი მატრიცის მქონე სიგნალებს განეკუთვნება ბლოკური კოდები  $mBnB$  ( $m=1,2,3 \dots; n=2,3,4 \dots$ ), NRZ, RZ, BI-L, EP-1, რადევ-სტოიანოვის, მილერის, BM, BS, ბლოკური კოდები ჩასმებით  $mB1C$ ,  $mB1P$ ,  $DmB1M$  და სხვა.

დებულება 2.  $M$  მატრიცის ყველა საკუთრივი მნიშვნელობა წარმოადგენს  $V$  მატრიცის შესაბამისი საკუთრივი რიცხვების  $n$ -ურ ხარისხს.

$V$  მატრიცისათვის  $\Delta(\lambda)$  მახასიათებელი პოლინომის განსაზღვრისას გამოყენებულია კრილოვის მიერ შემოთავაზებული მეთოდი. ნაშრომში ჩამოყალიბებულია ამ მეთოდის მომგებიანი სახეცვლილება, რომელიც შემოგვთავაზებს ფრეზერმა, დანკანმა და კოლარმა. იგი ეყრდნობა ჰამილტონ-კელის თეორემას, რომლის თანახმადაც  $n$  რიგის ნებისმიერი მატრიცა  $A$  აკმაყოფილებს თავის მახასიათებელ განტოლებას:

$$\Delta(\lambda) = \lambda^n + \gamma_1 \lambda^{n-1} + \gamma_2 \lambda^{n-2} + \dots + \gamma_n = 0,$$

$\Delta(\lambda)$ -ს განსაზღვრისათვის განვიხილოთ ვექტორების შემდეგი მიმდევრობა:

$X^0$  -  $n$  განზომილებიანი ნებისმიერი საწყისი არანულოვანი ვექტორია და განსხვავდება ვექტორისაგან, რომლის ყველა ელემენტი ერთი ტოლია.

$$X^i = V * X^{i-1}, \quad (i=1 \dots n).$$

$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  მახასიათებელი მრავალწევრის კოეფიციენტების განსაზღვრისათვის ამოვხსნათ  $A\gamma = B$  წრფივი ალგებრულ განტოლებათა სისტემა, სადაც

$$A = [x^{n-1}, x^{n-2}, \dots, x^1, x^0],$$

$$B = -x^n.$$

მახასიათებელი მრავალწევრის მისაღებად გავამრავლოთ  $V$  მატრიცა ნებისმიერ არანულოვან ვექტორ-სვეტზე.

$$C(0) = \{c_{10}, c_{20}, \dots, c_{n0}\},$$

აღვნიშნოთ მიმდევრობით

$$C(1) = VC(0) = \{c_{11}, c_{21}, \dots, c_{n1}\},$$

$$C(2) = VC(1) = V^2C(0) = \{c_{12}, c_{22}, \dots, c_{n2}\},$$

...

$$C(n) = VC(n-1) = \dots = V^n C(0)$$

მივიღებთ

$$C(0)p_n + C(1)p_{n-1} + \dots + C(n-1)p_1 = -C(n),$$

ეს მატრიცული განტოლება წარმოადგენს წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  უცნობებით.

$$\sum_{k=0}^{n-1} c_{ik} \gamma_{n-k} = -c_{in}, \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

ამოვხსნით რა ამ სისტემას  $\gamma_k$ -ს ( $k=1, 2, \dots, n$ ) მიმართ, მივიღებთ საუკუნის განტოლებას  $V$ -თვის.

$P$  ფინალური ალბათობის მატრიცის გასაგებად ვხსნით წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას.

$$M'P = P,$$

ნორმირება გავუკეთოთ  $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T$ -ს მაგალითად, ასე:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1,$$

შედეგად მიღებული წრფივი ალგებრული განტოლებათა სისტემა

$$\left\{ \begin{array}{l} M'P = P \\ \sum_{j=1}^n P_j = 1 \end{array} \right\},$$

ჩავწეროთ ბლოკური სახით:

$$\begin{pmatrix} 0 & V' \\ I & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix},$$

აქედან

$$\left\{ \begin{array}{l} V'P_1 = P_1 \\ P_2 = P_1 \end{array} \right\},$$

ამრიგად მივდივართ წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემამდე  $V'$  მატრიცისათვის:

$$V'X = X, \quad (2.4)$$

მოვახდინოთ  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ -ის ნორმირება, მაგალითად ასე:  $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1$ . (2.4)-ის ამოსახსნელად შემოთავაზებულია იტერაციული პროცესი:

ამრიგად, ბლოკური mBnB კლასის ციფრული სახაზო სიგნალების ენერგეტიკული სპექტრების განსაზღვრის ახალი მეთოდოლოგია კლასიკური მეთოდისაგან განსხვავებით მნიშვნელოვნად ამარტივებს ალბათურ მატრიცებთან დაკავშირებულ გამოთვლებს. კლასიკურ შემთხვევაში, სადაც ენერგეტიკული სპექტრების გამოსათვლელად მოითხოვებოდა გადასვლის ალბათური  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის ყველა საკუთრივი (ნამდვილი და კომპლექსური) რიცხვების ცოდნა, შემოთავაზებულ მეთოდში საჭიროა მხოლოდ მითითებული მატრიცის მახასიათებელი პოლინომის შედგენა. ხოლო მეორე შემთხვევაში ალბათური მატრიცის დიდი ზომების დროს ისე, როგორც პირველ შემთხვევაში გამოითვლება  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომი, მაგრამ ამ შემთხვევაში ამოცანა მარტივდება კიდევ იმით, რომ  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომი, შესაძლებელია შედგეს  $V$  ( $V'$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომის საშუალებით.  $V$  ( $V'$ ) მატრიცის რიგი გაცილებით დაბალია, ვიდრე არსებული  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის რიგი და შესაბამისად მისი გამოთვლაც უფრო მარტივია.

მესამე თავში მოყვანილია გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური დროითი მულტიპლექსირების (TDM) და ტალღური მულტიპლექსირების (WDM) ტექნოლოგიების შედარებითი ანალიზი [5,6,11]

ნაშრომში ერთმანეთს შედარებულია ამ სისტემების მახასიათებლები: კავშირის სისტემის სტრუქტურის მოქნილობის, გადაცემის სიჩქარის და გამტარუნარიანობის და ბიტური შეცდომათა ალბათობის, რეგენერაციული

უბნის სიგრძის, სტანდარტიზაციის ამჟამინდელი დონის, მულტიპლექსირების სისტემების სატრანსპორტო ტექნოლოგიებთან ურთიერთქმედების, სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალის (ბიუჯეტი) მიხედვით. ორივე ტექნოლოგიის შემთხვევაში გადაცემის გარემოს ოპტიკური ბოჭკო (კაბელი) წარმოადგენს.

გამტარუნარიანობის თვალსაზრისით WDM მულტიპლექსირების სისტემა მნიშვნელოვნად აღემატება TDM მულტიპლექსირების სისტემას, რაც გამოიხატება ოკ-ში მრავალი ლულის ორგანიზების შესაძლებლობით, მაშინ როდესაც, დროითი მულტიპლექსირების სისტემაში ორგანიზებულ ტრაქტებში სიჩქარის გაზრდა ამ სისტემაში გამოყენებული ელექტრონული კომპონენტების სწრაფქმედებით არის შეზღუდული.

ტალღური მულტიპლექსირების სისტემას აშკარა უპირატესობა გააჩნია დროითი მულტიპლექსირების სისტემასთან შედარებით არსებული მოქმედი, ტრადიციული TDM ოპტიკური მაგისტრალების მოდერნიზაციის შესაძლებლობის თვალსაზრისით, როდესაც პირველ შემთხვევაში შესაძლებელია დროითი მულტიპლექსირების სისტემის ხელახალი მულტიპლექსირება ტალღური მულტიპლექსირების სისტემით და დამატებითი ლულების ორგანიზება, მაშინ როდესაც დროითი მულტიპლექსირების სისტემის შემთხვევაში გადასაცემი ინფორმაციის სიჩქარის მოცულობის გაზრდა შესაძლებელია მხოლოდ იმავე ლულაში გადაცემის სიჩქარის გაზრდით, რაც როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ შეზღუდულია. TDM მულტიპლექსირების სისტემებში არხების გამტარუნარიანობის გაზრდის ერთადერთი შესაძლებლობაა სიჩქარის გაზრდა, ანუ STM-N არსებულზე მაღალი იერარქიის აპარატურის ორგანიზება, რაც შეზღუდულია გამოყენებული ელექტრონული კომპონენტების სწრაფქმედებით.

სახაზო ტრაქტის ორგანიზების თვალსაზრისით სპექტრალური მულტიპლექსირების სისტემა გამოირჩევა სიიაფით, მასში გამოყენებული ოპტიკური გამაძლიერებლების გამო, დროით სისტემებში გამოყენებულ

რეგენერატორებისგან განსხვავებით, რომელთა ღირებულება რამდენადმე მაღალია, მაგრამ ამ ეტაპზე ძვირია ტალღური მულტიპლექსირების სისტემებში გამოყენებული მულტიპლექსორ/დემულტიპლექსორი, შეყვანა/გამოყვანის მოწყობილობები, რაც მთლიანობაში აძვირებს WDM სისტემას TDM სისტემასთან შედარებით.

სტრუქტურული მოქნილობის თვალსაზრისით უპირატესობა ტალღური მულტიპლექსირების სისტემის მხარესაა, ვინაიდან ამ შემთხვევაში ადვილი და მოხერხებულია ნებისმიერი რაოდენობის არხების შეყვანა-გამოყვანა მაგისტრალის პრაქტიკულად ნებისმიერ ადგილას. ეს უპირატესობა კიდევ უფრო ნათელი ხდება თანამედროვე დიდ ქალაქებში მოთხოვნილი მაგისტრალური და რგოლური ქსელების ორგანიზებისას, როდესაც აუცილებელია არხების შეყვანა/გამოყვანის ორგანიზება მაგისტრალის მრავალ წერტილში.

სატრანსპორტო ტექნოლოგიებთან ურთიერთქმედების მოდელის თვალსაზრისით WDM ტექნოლოგია უფრო მოქნილი და ეფექტურია ვიდრე არსებული SDH/SONET ტექნოლოგიები.

ამ ეტაპზე არსებული სტანდარტიზაციის დონის მიხედვით, როგორც მოსალოდნელი იყო TDM სისტემები მთლიანად სტანდარტიზებულია, მაშინ როდესაც WDM სისტემებში ეს პროცესი ჯერ კიდევ არ დამთავრებულა და იხვეწება ასეთ სისტემებში ახალი ტექნოლოგიების დანერგვასთან ერთად, რომელთა საფუძველს თანამედროვე ფიზიკისა და ელექტრონიკის მიღწევები წარმოადგენს.

WDM მულტიპლექსირების შემთხვევაში ადვილი აქვს არხებს (ლულებს) შორის ურთიერთგადასვლას ანუ ურთიერთგავლენას, რასაც ადვილი არ აქვს TDM მულტიპლექსირების სისტემებში, მიუხედავად ამისა მდგრადობა ხელშეშლის მიმართ ორივე სისტემაში შეიძლება შევაფასოთ, როგორც ტოლფასი.

მულტიპლექსირების ორივე სისტემისათვის გამოყენებულია სტანდარტიზებული და სპეციალური კონსტრუქციის ოპტიკური კაბელები.

მულტიპლექსირების ორივე სისტემაში გამოიყენება ერთიდაიგივე სახაზო კოდები, ძირითადად ბლოკური სახაზო კოდები, თუმცა ბოლო წლებში მნიშვნელოვან გამოყენებას პოვენ ხელშეშლამდგრადი სახაზო კოდები.

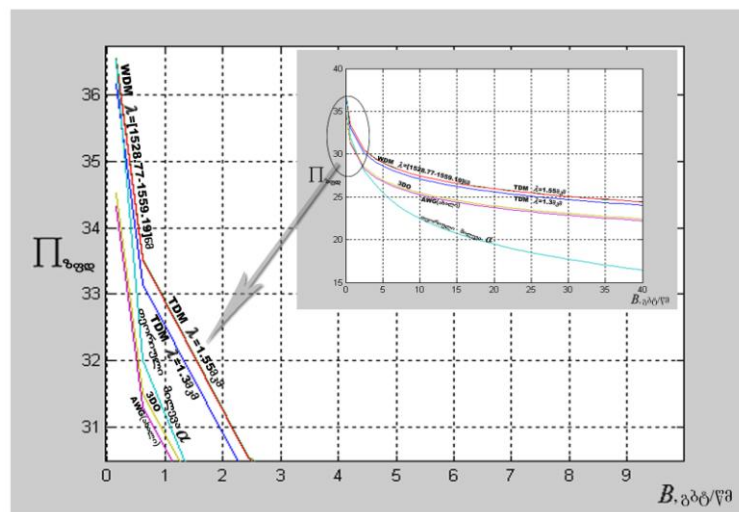
მიუხედავად იმისა გახდება თუ არა TDM ტექნოლოგია უნივერსალური პროტოკოლი ისე, როგორც ინტერნეტ პროტოკოლი IP (Internet Protocol) და ადაპტირებული იქნება SONET/SDH სტანდარტებთან, უახლოეს წლებში ამ ტექნოლოგიას მრავალი ოპერატორი გამოიყენებს და TDM ტექნოლოგიების „მეორე სუნთქვა“ უზრუნველყვეს სოლიტონების შესწავლაში წარმატებებმა და მისი გამოყენების პერსპექტივებმა. ამდენად, ამ ეტაპზე მისი სრულფასოვანი შეცვლა არცერთ ტექნოლოგიას არ შეუძლია. თუმცა WDM ტექნოლოგიები იარსებებენ და განვითარდებიან TDM ტექნოლოგიების განვითარების პარალელურად მთლიანად კავშირგაბმულობის არხების გამტარუნარიანობის ეფექტურობის ამაღლებისათვის. ამდენად, პროგრესი TDM სისტემის განვითარებაში იმავდროულად პროგრესია WDM სისტემისათვისაც, სადაც ეს პირდაპირ შეიძლება დაინერგოს და არა პირიქით.

WDM სისტემებში ობ-ზე მიწოდებული მთლიანი სიმძლავრე შეზღუდულია გამომსხივებელი მოწყობილობის, ლაზერის უსაფრთხოების დასაშვები დონით ან ობ-ს გულარისათვის დასაშვები არაწრფივი დამახინჯებებით. ამასთან, ვინაიდან თითოეული ოპტიკური არხის სიმძლავრის მნიშვნელობა ობ-ში ორგანიზებული ოპტიკური არხების რაოდენობაზეა დამოკიდებული, ამ ფაქტორის გაუთვალისწინებლობამ შესაძლებელია რომელიმე არხზე მიგვიყვანოს სიმძლავრის მნიშვნელობის შემცირებამდე და არ მოხდეს ბიტური შეცდომების (BER - Bit Error Rate) მოთხოვნილი დონის დაკმაყოფილება. გასაგები მიზეზების გამო ასეთი რამ TDM სისტემებში მოსალოდნელი არ არის.

მულტიპლექსირების სისტემის ენერგეტიკული პოტენციალის (ბიუჯეტის) მიხედვით მოვახდინოთ TDM და WDM სისტემების შედარება

იმის გათვალისწინებით, რომ ამ სისტემებში ამჟამად ფართოდ არის დანერგილი STM-64 (9.9 გბტ/წმ) და Ethernet 10GE (10 გბტ/წმ) სისტემები, აგრეთვე STM-256 და Ethernet-100 GE. ამდენად, აღნიშნული სისტემების შედარება უპრიანია მოვახდინოთ (40-100) გბტ/წმ სიჩქარეებზე ოპერირებით.

ენერგეტიკული პოტენციალის დამოკიდებულება გადაცემის სიჩქარეზე TDM დროითი მულტიპლექსირების შემთხვევაში ზვავისებური ფოტოდiodის დროს (იხ. ფორმულა 1.3) წარმოდგენილია ნახ.3.1-ზე.



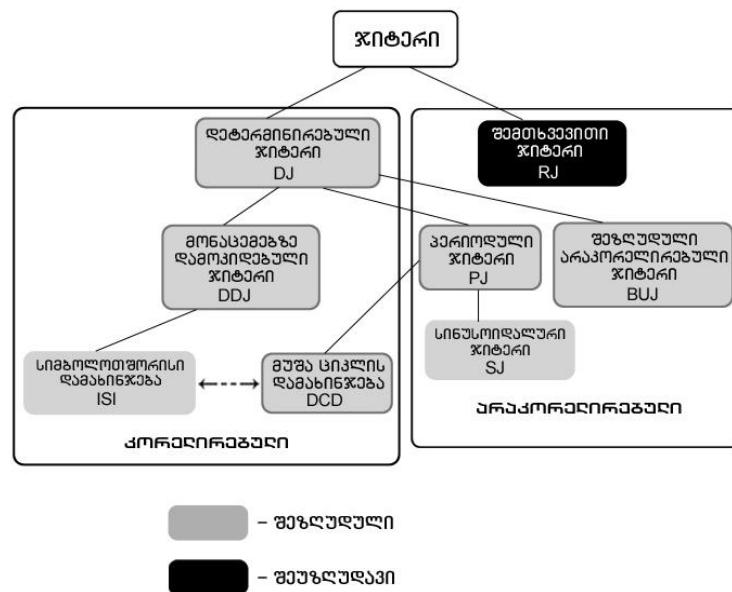
ნახ.3.1. მულტიპლექსირების TDM და WDM სისტემების ენერგეტიკული პოტენციალის (ბიუჯეტის) დამოკიდებულება გადაცემის სიჩქარეზე, ზვავისებური ფოტოდiodის შემთხვევაში

როგორც ნახაზიდან ჩანს სისტემის ბიუჯეტის თვალსაზრისით დროითი მულტიპლექსირების სისტემას ტალღურთან შედარებით უპირატესობა გააჩნია მხოლოდ შედარებით დაბალ სიჩქარეებზე (STM-1, STM-4, შესაბამისად – 0.155, 0.622 გბტ/წმ სიჩქარის საზღვრებში), რაც აიხსნება ტალღური მულტიპლექსირების სისტემებში გამოყენებული დამაბოლოებელი და შეყვანა-გამოყვანის მულტიპლექსორ/დემულტიპლექსორების მიერ შეტანილი დამატებითი მილევით, დროითი მულტიპლექსირების სისტემებთან შედარებით. აქვე უნდა აღინიშნოს შემდეგი გარემოებები: ტალღური მულტიპლექსირების სისტემების

ტექნოლოგიები დღენიადაგ ვითარდება და იხვეწება, ამიტომ დროითი სისტემების მითითებული უპირატესობაც უახლოეს მომავალში მინიმუმამდე იქნება დაყვანილი.

მეოთხე თავში წარმოდგენილია ჯიტერი, მისი გაზომვისა და შეფასების ასპექტები გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში [7,8,9]

ჯიტერის ყველაზე გავრცელებული კლასიფიკაცია წარმოდგენილია ნახ.4.1-ზე.



ნახ.4.1. ჯიტერის კლასიფიკაცია

ჯიტერის დეტალური კლასიფიკაციით გვაქვს: დეტერმინირებული ჯიტერი (DJ - Deterministic Jitter); ა) კორელირებული ჯიტერი: – მონაცემებზე დამოკიდებული ჯიტერი (DDJ - Data-Dependent Jitter); – სიმბოლოთაშორისი დამახინჯება (ISI - Inter-Symbol Interference); – გადაცემის (მუშა ციკლის) დამახინჯება (DCD - Duty-Cycle Distortion). ბ) არაკორელირებული ჯიტერი: – პერიოდული ჯიტერი (PJ - Periodic Jitter), (მისი კერძო შემთხვევაა – სინუსოიდალური ჯიტერი (SJ - Sinusoidal Jitter); – შეზღუდული არაკორელირებული ჯიტერი - (BUJ - Bounded Uncorrelated Jitter). გ) შემთხვევითი ჯიტერი (RJ - Random Jitter).



თანამდროვე თეორიის მიხედვით ჯიტერის გაზომვისა და შეფასებისას გამოიკვეთა ჯიტერის ორგვარი ხასიათი: დეტერმინირებული და შემთხვევითი ჯიტერი. შემთხვევითი ჯიტერი (RJ) განეკუთვნება შეუზღუდავი ტიპის ჯიტერს, რომელიც შესაძლებელია აღიწეროს გაუსის (ნორმალური) განაწილების კანონით და ხასიათდება შემთხვევითი სიდიდის განაწილების სიმკვრივის მახასიათებლებით (შემთხვევითი სიდიდის საშუალო მნიშვნელობა – მათემატიკური მოლოდინი და საშუალო კვადრატული გადახრა (RMS - Root Mean Square). დეტერმინირებული ჯიტერი (DJ) წარმოადგენს შეზღუდული ჯიტერის სახეს, რომელიც თავისთავად შედგება სხვადასხვა სახის ჯიტერებისაგან, რომელთა წარმოქმნის წყარო და ბუნება სხვადასხვაა.

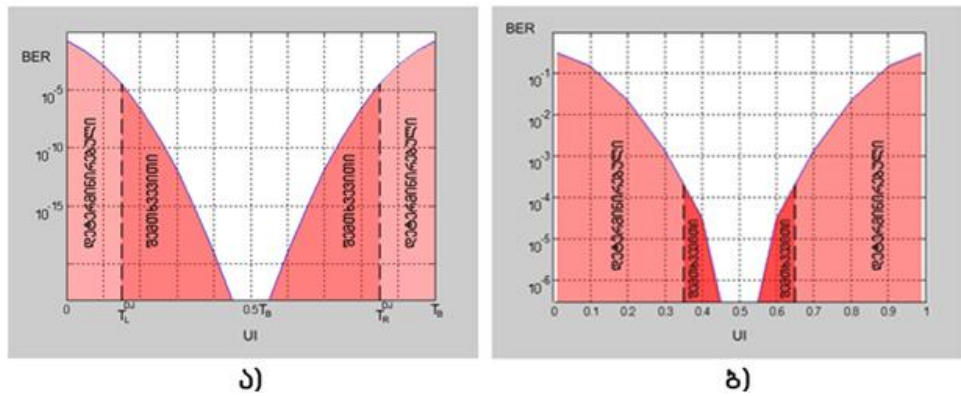
ნაშრომში წარმოდგენილია ჯიტერის რაოდენობრივი შეფასების მეთოდოლოგია. ზოგად შემთხვევაში საერთო (ტოტალური, ჯამური) ჯიტერი (TJ) შესაძლებელია გამოისახოს როგორც დეტერმინირებული და შემთხვევითი ჯიტერების სტანდარტულ გადახრათა ჯამით:

$$TJ(p-p) = DJ(p-p) + n \cdot RJ(rms) \quad (4.1)$$

სადაც, TJ(p-p) - ტოტალური (ჯამური) ჯიტერია; DJ(p-p) - დეტერმინირებული (რეგულარული) ჯიტერი; RJ(rms) - შემთხვევითი ჯიტერი; n - კოეფიციენტია, რომლის საშუალებითაც თითოეული შემთხვევისათვის უნდა ვიპოვოთ სტანდარტული გადახრა –  $\sigma$ .

ჯიტერის რაოდენობრივად შესაფასებლად განვიხილოთ მონაცემების ნაკადი, რომლისთვისაც საერთო ჯიტერისათვის ავიღოთ 0,3 Up-p; იმის გათვალისწინებით, რომ განიხილება ერთეულოვანი ინტერვალის (UI - Unit Interval) ნახევარი, ვიღებთ UI=0.5. ხოლო ამავე ნახევარზე ტოტალური (ჯამური) დეტერმინირებული ჯიტერი DJ<sub>T</sub>=0.15UI, შემთხვევითი ჯიტერი RJ=0.05.

ნახ.4.2-ზე წარმოდგენილია ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის დამოკიდებულება ტოტალური (საერთო, ჯამური) ჯიტერის მნიშვნელობაზე ერთეულოვან ინტერვალში UI.



ნახ.4.2. ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის (BER) დამოკიდებულება დეტერმინირებული და შემთხვევითი ჯიტერების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ერთეულოვან ინტერვალში (UI).  
ა)  $DJ_T = 0,3Up-p$ ;  $RJ=0,05$ ; ბ)  $DJ_T = 0,3Up-p$ ;  $RJ=0,09$

საერთო ჯიტერის მნიშვნელობაში იგულისხმება ჯამური (ტოტალური) დეტერმინირებული ჯიტერის მნიშვნელობა  $DJ_T=0,3Up-p$ , რომელშიც შეიძლება შედიოდეს: მონაცემებზე დამოკიდებული ჯიტერი (DDJ); გადამცემის (მუშა ციკლის) დამახინჯება (DCD); პერიოდული ჯიტერი –  $DJ_{per}$  (ასეთი ტიპის ჯიტერის კერძო შემთხვევაა სინუსოიდალური ჯიტერი  $DJ_{sin}$ ) და ა.შ., შემთხვევითი ჯიტერის მნიშვნელობა  $RJ=0.05$ . (ნახ.4.2 ა); ხოლო ნახ.4.2 (ბ) მოყვანილია გრაფიკი, როდესაც  $DJ_T=0.3Up-p$ ;  $RJ=0.09$ .

ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის (BER - Bit Error Rate) დამოკიდებულება ერთეულოვან ინტერვალში –  $BER = \Psi(UI)$  ფაქტიურად ასახავს თვალის დიაგრამის კონფიგურაციას. მოყვანილი U-ს მაგვარი მრუდი (Bathtub Curve) წარმოადგენს ბიტების გამოჩენის ალბათობის (BER) დამოკიდებულებას ერთეულოვან ( $UI \equiv T$ ) ინტერვალზე, ანუ სტრობირების წერტილის) მდებარეობაზე სატაქტო ინტერვალში. ეს მრუდი მოხერხებულია ხმაურის ანალიზისათვის. U მრუდის ცენტრში ( $UI = 0.5$ ) ჭარბობს დეტერმინირებული ჯიტერის მნიშვნელობა (ბიტის განსაზღვრის ტოლი ალბათობა). საცდელი წერტილის ცენტრიდან გადაადგილება იწვევს ჯიტერის ზრდას, ანუ BER-ის მნიშვნელობა იზრდება სწრაფად (იზრდება შემთხვევითი ხმაურის გავლენა). საცდელი წერტილის ოპტიმალური

მნიშვნელობა იმყოფება ერთეულოვანი ინტერვალის (თვალის დიაგრამის) ცენტრში. საერთოდ, მიღებული შეფასებით ჯიტერმა არ უნდა გადააჭარბოს მნიშვნელობას, როდესაც ბიტური შეცდომების კოეფიციენტი (BER)  $10^{-12}$  – ზე მეტია. კავშირის სისტემის მდგრადობა განისაზღვრება U-ს მაგვარი მრუდის ტოტებს შორის მანძილით. რაც უფრო შორს არის U მრუდის მარცხენა ტოტი მარჯვენასგან BER-ის განსაზღვრისას, მით მეტია ჯიტერის მიმართ მდგრადობის რეზერვი. როგორც ნახაზებიდან ჩანს საცდელი (სტრობირების) წერტილის გადაადგილებისას BER არათანაბრად, მკვეთრად იზრდება, რაც მიაწინებს საცდელი წერტილის პრეციზიულობაზე ამ ინტერვალში. პირველ შემთხვევაში (ნახ.4.2 ა) დაშორება ორ მრუდს შორის დიდია, რაც განაპირობებს მთლიანად ტელეკომუნიკაციის სისტემის მდგრადობას, ხოლო მეორე შემთხვევაში (ნახ.4.2 ბ), როდესაც შემთხვევითი ჯიტერის მნიშვნელობა მაღალია ( $RJ=0.09$ , ვიდრე პირველ შემთხვევაში ( $RJ=0.05$ ) შეცდომათა ალბათობა შესამჩნევად იმატებს. ეს მიუთითებს იმაზე, რომ გცბოს-ის მიმდების გადამწყვეტ მოწყობილობაში ციფრული სიგნალის იდეალური სტრობირებიდან (ცენტრში) გადახრა არ გამოიწვევს სიგნალი/ხელშეშლა ფარდობის მნიშვნელოვან შემცირებას და აქედან გამომდინარე მთლიანად კავშირის სისტემის მდგრადობა მაღალია.

კონკრეტული იერარქიული დონის გცბოს-ის გადაცემის ხარისხის შეფასებისას მოხერხებულია ვისარგებლოთ თვალის დიაგრამის ნილბით (შაბლონით). ტესტირება სრულდება შემდეგი წესით: ხორციელდება მოცემული ნილბის (შაბლონის) ზედდება რეალურზე, რომელიც მიღებულია თვალის დიაგრამის გაზომვების შედეგად. თუ ნილბის საზღვრები იმყოფება რეალური თვალის დიაგრამის შიგნით ან ემთხვევა თვალის დიაგრამის გახსნას, მაშინ შესაძლებელია გამოვიტანოთ დასკვნა, რომ ტესტირებადი გადაცემის ციფრული სისტემა ხარისხის მაჩვენებლებით შეესაბამება ციფრული იერარქიის მოცემულ დონეს (BER - ბიტურ შეცდომათა ალბათობით, ჯიტერით).

რეალურად მიღებულ თვალის დიაგრამაზე ნილბის ზედდების დროს აგრეთვე გაითვალისწინება არა მხოლოდ თვალის დიაგრამის გახსნა, არამედ საშუალო დონიდან გადახრის შეზღუდვები.

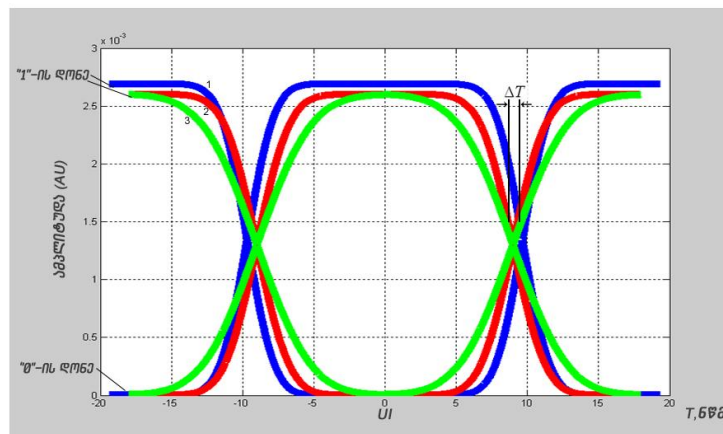
გარკვეულ ინტერესს წარმოადგენს ჩატარდეს თვალის დიაგრამის ანალიზი მათემატიკური მეთოდების გამოყენებით, რაც თავისთავად საშუალებას მოგვცემს ანიმაციური მოდელის საშუალებით მკაფიოდ განვსაზღვროთ ჯიტერის მახასიათებლები, მოვახდინოთ ჯიტერის შეფასება გცბოს-ის კონკრეტული იერარქიული დონის ციფრული სისტემისათვის სტანდარტული თვალის ნილბის (შაბლონის) ნორმებთან შედარება ITU-T G.957 რეკომენდაციების შესაბამისად.

თვალის დიაგრამა აგებულია შემდეგი მონაცემებით:

მრუდი 1:  $P^{1''} = 2.69 \cdot 10^{-3}$  მვტ;  $S_L = 1.49$  ნწმ;  $T = 19.35$  ნწმ;  $\tau_{\text{მაქს.გაშლა}} = -9.675$  ნწმ;

მრუდი 2:  $P^{1''} = 2.6 \cdot 10^{-3}$  მვტ;  $S_L = 1.79$  ნწმ;  $T = 18$  ნწმ;  $\tau_{\text{მაქს.გაშლა}} = -9$  ნწმ; მრუდი

3:  $P^{1''} = 2.6 \cdot 10^{-3}$  მვტ;  $S_L = 3$  ნწმ;  $T = 18$  ნწმ;  $\tau_{\text{მაქს.გაშლა}} = -9$  ნწმ;



ნახ.4.3. თვალის დიაგრამა. მრუდი 1 -  $P^{1''} = 2.69 \cdot 10^{-3}$  მვტ,  
 $P^{0''} = 2.259 \cdot 10^{-13}$  მვტ; მრუდი 2 -  $P^{1''} = 2.6 \cdot 10^{-3}$  მვტ,  
 $P^{0''} = 1.289 \cdot 10^{-9}$  მვტ; მრუდი 3 -  $P^{1''} = 2.6 \cdot 10^{-3}$  მვტ,  
 $P^{0''} = 7.019 \cdot 10^{-6}$  მვტ,  $\Delta T$  - ჯიტერი.

ნახ.4.3-ზე მოყვანილი თვალის დიაგრამები (1,2,3) ახასიათებენ სასარგებლო სიგნალის თვალის ამპლიტუდას, თვალის ღერძთან (თვალის დიაგრამის შუა ნაწილში წარმოსახვითი ღერძი) გადაკვეთის წერტილს,

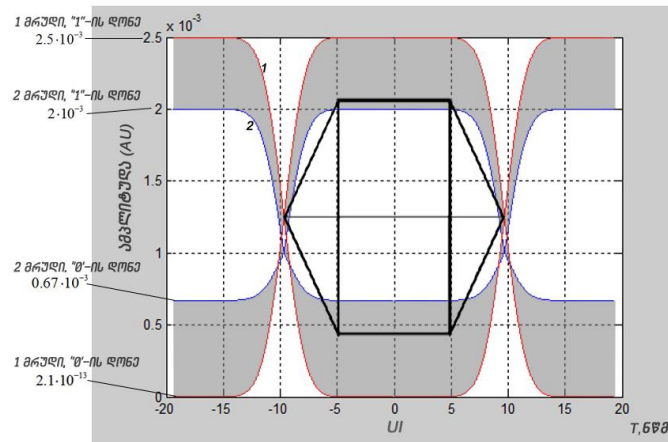
თვალის დონეს თვალის მილევის დროს, თვალის ზრდის დროს და თვალის სიგანეს ერთნაირი მნიშვნელობები აქვთ, თუმცა შეიმჩნევა დიდი განსხვავება თვალის ამ დიაგრამებს შორის, კერძოდ, ძალიან განსხვავდება მათი პარამეტრები: თვალის სიმაღლე, თვალის სიგნალ/ხმაური ფარდობა, თვალის ამპლიტუდა თვალის მაქსიმალური გახსნის ცენტრიდან მარჯვნივ/მარცხნივ და სხვა. ასევე ნახ.4.3-ზე მოყვანილ თვალის დიაგრამებზე (1,2,3) შეინიშნება ჯიტერი. ეს კი იმაზე მეტყველებს, რომ თვალის დიაგრამას BER ბიტურ შეცდომათა ინტენსივობას უფრო მეტი კოეფიციენტი აქვს (რაც ცხადია ცუდია). ნახ.4.3-ზე სიგნალი საკმაოდ განიცდის ხმაურის გავლენას. ზემოთ ჩამოთვლილი პარამეტრების გამოთვლის შემდეგ ზუსტად შეიძლება სასარგებლო სიგნალის დანახვა, ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის განსაზღვრა და გადაწყვეტილების მიღება, თუ როგორ შეიძლება ციფრული სიგნალის გაუმჯობესება განსაზღვრულ სატელეკომუნიკაციო ქსელში. ხოლო სიგნალის ფორმის გაუმჯობესების ყველა აუცილებელი ეტაპის შესრულების შემდეგ გაზომვის შედეგების თვალნათლივ დანახვა.

ნაშრომში შეფასებულია ჯიტერის გავლენა კონკრეტული ციფრული სატრანსპორტო მოდულის STM-1 (Synchronous Transport Module) იერარქიის სიგნალების გადაცემის ხარისხზე. ამ მიზნით მოვახდინოთ თვალის დიაგრამის შეთავსება სტანდარტულ ნილაბთან (შაბლონთან).

ნახ.4.4-ზე წარმოდგენილია თვალის დიაგრამის სტანდარტული ნილაბი (შაბლონი) ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო გაერთიანების (ITU-T - International Telecommunications Union) G.957 რეკომენდაციების მიხედვით გადაცემის SDH ციფრული სისტემისათვის ერთეულოვან UI ინტერვალში და თვალის დიაგრამა – მრუდი 1 -  $P^{+1''} = 2.5 \cdot 10^{-3}$  მვტ,  $P^{0''} = 2.1 \cdot 10^{-13}$  მვტ; მრუდი 2 -  $P^{+1''} = 2 \cdot 10^{-3}$  მვტ,  $P^{0''} = 0.67 \cdot 10^{-3}$  მვტ.

ამ შემთხვევაში ჯიტერის მნიშვნელობა დიდია, რაც გასათვალისწინებელია, ვინაიდან იმოქმედებს კავშირის ხარისხზე.

შაბლონის დარღვევა ამპლიტუდაში აშკარაა. ამდენად, ციფრული სიგნალის გადაცემის ხარისხი არადადამაკმაყოფილებელია.



ნახ.4.4. თვალის დიაგრამის სტანდარტული ნიღაბი (შაბლონი) ITU-T G.957 რეკომენდაციების მიხედვით გადაცემის SDH ციფრული სისტემის STM-1 იერარქიისათვის ერთეულოვან UI ინტერვალში და თვალის დიაგრამა – მრუდი 1 -  $P_{11} = 2.5 \cdot 10^{-3}$  მკტ,  $P_{01} = 2.1 \cdot 10^{-13}$  მკტ; მრუდი 2 -  $P_{11} = 2 \cdot 10^{-3}$  მკტ,  $P_{01} = 0.67 \cdot 10^{-3}$  მკტ.

მითითებული იმიტაციურ–ანიმაციური მოდელი საშუალებას იძლევა ციფრული სიგნალის ხელოვნური დამახინჯებით განვსაზღვროთ ჯიტერის მნიშვნელობა, სიგნალი/ხმაურის დონე და წაგება იდეალურ სიგნალი/ხელშეშლა ფარდობასთან შედარებით, განვსაზღვროთ ციფრული სისტემის ხელშეშლამდგრადობის გაუარესება, რაც საშუალებას იძლევა წინასწარ შევაფასოთ კავშირის ხარისხი მოცემულ ციფრულ სისტემაში. აგრეთვე, SDH იერარქიის სისტემებისათვის შევაფასოთ ციფრული სიგნალის გადაცემის ხარისხის შესაბამისობა ITU-T-ს რეკომენდაციებით დადგენილ ნორმებთან.

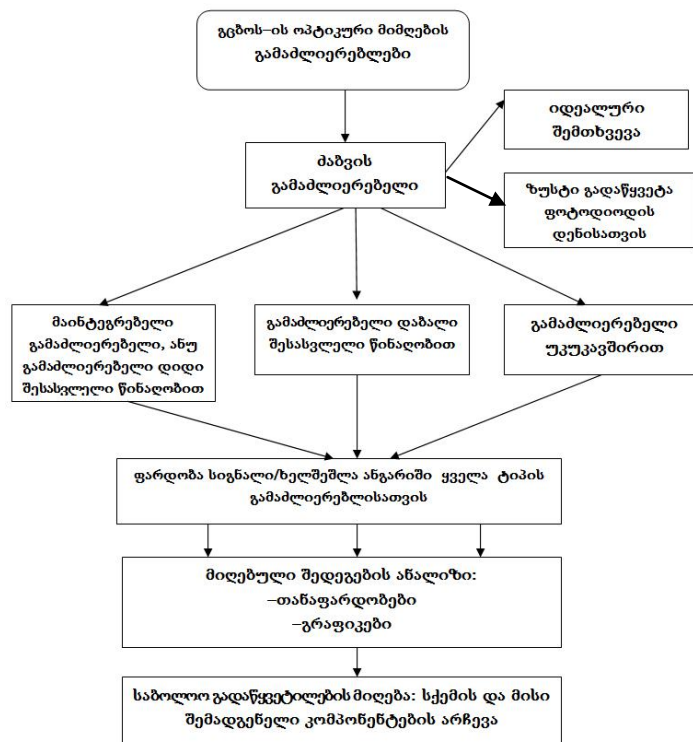
მეხუთე თავში წარმოდგენილია გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან–ოპტიკური სისტემების ოპტიკური მიმღების გამაძლიერებლის შერჩევისა და ოპტიმიზაციის საკითხები [10]

წინასწარი გამაძლიერებელი წარმოადგენს ოპტიკური მიმღების ფოტოდეტექტორის მომდევნო კასკადს, რომელიც აძლიერებს მიღებულ დენის სიგნალს და გარდაქმნის მას ძაბვად. ისევე, როგორც კავშირის

ნებისმიერი ტექნოლოგიის სისტემაში (TDM, WDM და სხვა) სიგნალი/ხმაურის თანაფარდობა ოპტიკური სისტემის გამოსასვლელზე და მისი მახასიათებლები განისაზღვრება ოპტიკური მიმღების იმ რგოლით, რომელშიც მიღებულ სიგნალს უმცირესი დონე აქვს, ვინაიდან აღდგენილ ელექტრულ სიგნალზე ხდება ფოტოდეტექტორის და თავად წინასწარი გამაძლიერებლის ხმაურის ზედდება.

ნახ.5.1-ზე წარმოდგენილია ნაშრომში შემუშავებული ოპტიკური გამაძლიერებლის არჩევის სტრუქტურული სქემა.

ნახ.5.2-ზე მოცემულია გცბოს-ის მიმღების წინასწარი გამაძლიერებლის არჩევის სტრუქტურული სქემის ფორმალიზებული ვარიანტი, რომლის თითოეულ კვანძში მითითებულია მოცემული ტიპის გამაძლიერებლის სიგნალი/ხელშეშლა გამოსათვლელი ფორმულები და გამაძლიერებლის ტიპის არჩევის პროცედურა.



ნახ. 5.1. გცბოს-ის ოპტიკური მიმღების წინასწარი გამაძლიერებლის არჩევის სტრუქტურული სქემა

ნაშრომში გაანალიზებულია ნახ.5.2-ზე მოყვანილი ცნობილი კლასიკური ზოგადი გამოსახულება სიგნალი/ხმაურის ფარდობისათვის და

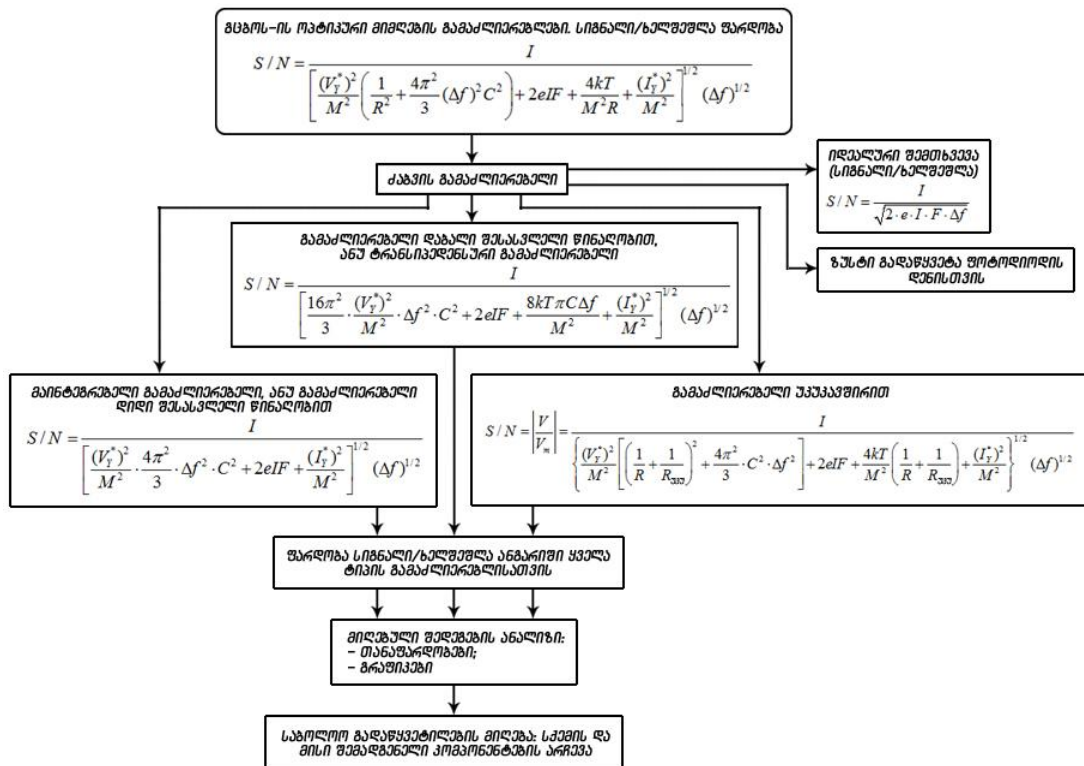


სიგნალი/ხმაური ფარდობის ოპტიმიზაციის გზები. ამ გამოსახულებაში ხმაურის ხუთი მდგენელიდან თითოეული აღნიშნულია ა-ე ასოებით. ამავე დროს მდგენელების ასეთი შეკრება სამართლიანია, თუ თითოეული ექვემდებარება ნორმალური განაწილების კანონს.

$$S/N = \frac{I}{\left[ \frac{(V_y^*)^2}{M^2} \left( \frac{1}{R^2} + \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C^2 \right) + 2eIF + \frac{4kT}{M^2 R} + \frac{(I_y^*)^2}{M^2} \right]^{1/2} (\Delta f)^{1/2}}, \quad (5.1)$$

ა            ბ            გ            დ            ე

სადაც,  $I_y^*, V_y^*$  - შესაბამისად დენის და ძაბვის მნიშვნელობებია გამაძლიერებლის გამოსასვლელზე,  $I$  - ოპტიკური მიმღების ფოტოდენის სიდიდეა,  $R, C$  - შესაბამისად წინასწარი გამაძლიერებლის წინაღობა და ტევადობაა,  $\Delta f$  - გატარების ზოლია პირდაპირი მოდულაციის დროს.



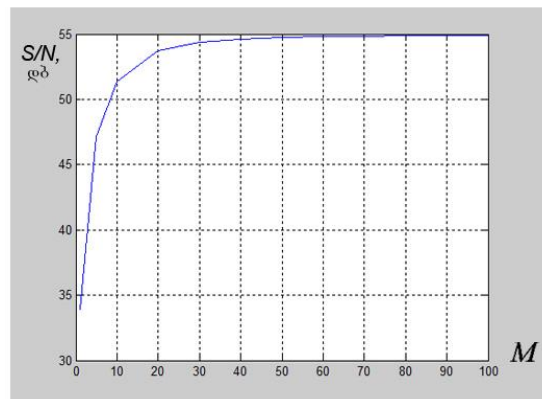
ნახ. 5.2. გზბოს-ის ოპტიკური მიმღების წინასწარი გამაძლიერებლის ტიპის არჩევის ფორმალიზებული სქემა

აღნიშნული ტიპის გამაძლიერებლების ძირითადი პრობლემა - მათი სტაბილურობის შენარჩუნებაა, ვინაიდან უკუკავშირის განფენილი განაწილებული წრედის გამოყენება, რომელიც მოიცავს გამაძლიერებელს

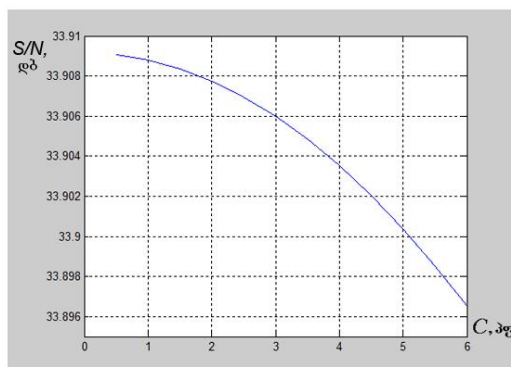


გამდიერების დიდი კოეფიციენტით და მაღალი შესასვლელი იმპედანსით, მას მაღალი სიხშირეების უბანში დადებითი უკუკავშირის წარმოშობის შედეგად გამამდიერებლის სქემას თვითაღზნების მიმართ მიდრეკილს ხდის. თვითაღზნებისგან თავის დასაცავად საჭიროა სქემის შესაბამისი ელემენტების ეფექტური ეკრანილება და კარგად მოფიქრებული კომპანილება. ნაშრომში ჩატარებულია ანგარიში ყველა ტიპის წინასწარი გამამდიერებლისათვის კონკრეტული პარამეტრებით.

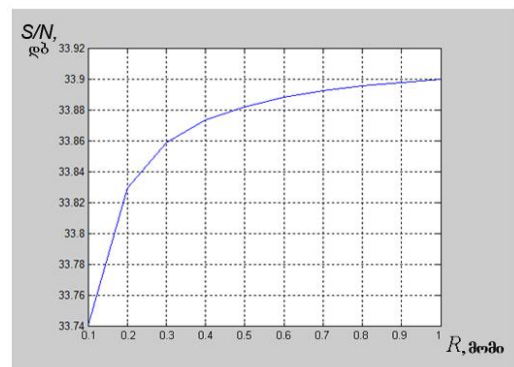
უკუკავშირიანი გამამდიერებლის სიგნალ/ხმაურის ( $S/N$  - Signal/Noise) ფარდობის დამოკიდებულება ზვავისებური ფოტოდიოდის გამრავლების კოეფიციენტზე  $M$ , ტევადობაზე  $C$  და წინალობაზე  $R$  წარმოდგენილია შესაბამისად ნახ.5.3-ზე, ნახ.5.4-ზე და ნახ.5.5-ზე.



ნახ.5.3. უკუკავშირიანი გამამდიერებლის სიგნალ/ხმაურის ( $S/N$ ) დამოკიდებულება ზვავისებური ფოტოდიოდის გამრავლების კოეფიციენტზე



ნახ.5.4. უკუკავშირიანი გამამდიერებლის სიგნალ/ხმაურის ( $S/N$ ) დამოკიდებულება ტევადობაზე



ნახ.5.5. უკუკავშირიანი გამამდიერებლის სიგნალ/ხმაურის ( $S/N$ ) დამოკიდებულება წინალობაზე

ნაშრომში ყველა ტიპის წინასწარი გამაძლიერებლის სიგნალი/ხმაური ფარდობის  $M$ ,  $R$  და  $C$  პარამეტრებზე დამოკიდებულების ანალიზი წარმოდგენილია ნახ.5.2-ზე. ალგორითმი საშუალებას იძლევა შერჩეულ იქნას გცბოს-ის მიმღებისათვის ოპტიმალური წინასწარი გამაძლიერებლის სქემა.

### დასკვნა

ნაშრომში მიღწეული შედეგები შესაძლებელია ჩამოვყალიბოთ შემდეგი სახით:

1. შემუშავებულია გადაცემის ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემის (გბოს), როგორც მოდელირების რთული სისტემის სტრუქტურული სქემა და მონაცემთა ბაზა. დადგენილია მიმღები ოპტიკური მოდულის ფოტოდეტექტორის მგრძნობიარობის გადაცემის სიჩქარისაგან დამოკიდებულება, მათ შორის ზფდ-ის გამრავლების კოეფიციენტის ოპტიმალური მნიშვნელობისათვის, რაც საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ p-i-n და APD ფოტოდეტექტორების მგრძნობიარობის დამოკიდებულება გადაცემის სიჩქარეზე ოპტიკური დიაპაზონის სხვადასხვა ტალღის სიგრძეზე, მოვახდინოთ გცბოს-ის მთელი რიგი მაჩვენებლების (რეგენერაციული უბნის სიგრძე სხვადასხვა ტიპის სახაზო კოდების შემთხვევაში, ფარდობა სიგნალი/ხელშეშლა ოპტიკური მიმღების გამოსასვლელზე, შეცდომათა ალბათობა ერთეულოვანი რეგენერატორის და სახაზო ტრაქტში რამოდენიმე რეგენერატორის განთავსებისას და ა.შ.) გამოთვლა.

განსაზღვრულია, რომ მიმღებ ოპტიკურ მოდულში (მომ) ზფდ-ს გამოყენებისას გამრავლების კოეფიციენტის ოპტიმალური მნიშვნელობის დადგენის შემთხვევაში რეგენერაციული უბნის სიგრძე შესაძლებელია გაგრძელდეს 10%-ით არაოპტიმალური გამრავლების კოეფიციენტის დროს რეგენერაციული უბნის სიგრძესთან შედარებით. ამ მიზნით საჭიროა

შერჩეულ იქნას შესაბამისი ტიპის ზვავისებური ფოტოდiodი, მუშაობის სათანადო რეჟიმში.

2. შემოთავაზებულია ბლოკური mBnB კლასის ციფრული სახაზო სიგნალების ენერგეტიკული სპექტრების განსაზღვრის ახალი მეთოდოლოგია, რაც კლასიკური მიდგომისაგან განსხვავებით მნიშვნელოვნად ამარტივებს ალბათურ მატრიცებთან დაკავშირებულ გამოთვლებს. კლასიკურ შემთხვევაში, სადაც ენერგეტიკული სპექტრების გამოსათვლელად მოითხოვებოდა გადასვლის ალბათური  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის ყველა საკუთრივი (ნამდვილი და კომპლექსური) რიცხვების მნიშვნელობების ცოდნა, ამ მეთოდით გამოთვლა ხორციელდება გადასვლის ალბათური  $M$  მატრიცის საკუთრივი მნიშვნელობების ცოდნის გარეშე, მხოლოდ მატრიცის მახასიათებელი პოლინომის შედგენით, რაც არსებითად აადვილებს გაანგარიშებას, განსაკუთრებით  $M$  მატრიცის დიდი ზომის დროს. ხოლო მეორე მეთოდოლოგიით ალბათური მატრიცის დიდი ზომების დროს ისე, როგორც პირველ შემთხვევაში, გამოითვლება  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომი, მაგრამ ამ შემთხვევაში ამოცანა მარტივდება კიდევ იმით, რომ  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომი, შესაძლებელია შედგეს  $V$  ( $V'$ ) მატრიცის მახასიათებელი პოლინომის საშუალებით. ვინაიდან  $V$  ( $V'$ ) მატრიცის რიგი გაცილებით დაბალია, ვიდრე არსებული  $M$  ( $M'$ ) მატრიცის, შესაბამისად მისი გამოთვლაც უფრო მარტივია. შექმნილია პროგრამათა პაკეტი სახაზო კოდების ენერგეტიკული სპექტრების გამოსათვლელად, პროგრამა შესრულებულია დაპროგრამების ენა „Mathlab“-ში.

3. განხორციელებულია TDM და WDM მულტიპლექსირების სისტემების შედარებითი ანალიზი, რომლის მიხედვითაც: გამოკვლეულია ამ სისტემების უპირატესობა/ნაკლოვანებები გამტარუნარიანობის, მოდერნიზაციის, სახაზო ტრაქტის ორგანიზების, სტრუქტურული მოქნილობის, სატრანსპორტო ტექნოლოგიებთან ურთიერთქმედების, სტანდარტიზაციის დონის, ოპტიკური კაბელების ტიპის, სახაზო კოდების

გამოყენების ტიპის, ამ ტექნოლოგიების პარალელურ და ერთად ფუნქციონირების, სისტემების ენერგეტიკული პოტენციალის და მომუშავე პერსონალის კვალიფიკაციის თვალსაზრისით.

4. სისტემური მიდგომის საფუძველზე, განსაზღვრულია სიგნალის მთლიანობის დარღვევის ხასიათი გცბოს-ში. ჯიტერის თანამედროვე თეორია და პრაქტიკა, მისი გამომწვევი მიზეზები, ჯიტერისა და ხმაურის ფიზიკური ბუნება, ჯიტერის რაოდენობრივი მახასიათებლები, ჯიტერის შეფასებისა და გაზომვის ასპექტები, ჯიტერის თანამედროვე ნორმები პლეზიოქრონულ (PDH) და სინქრონულ (SDH) სისტემებში, ჯიტერის თვალის ნიღაბი (შაბლონი).

5. შემოთავაზებულია ჯიტერის შეფასების მეთოდოლოგია, რომლის მიხედვითაც ჯამური ჯიტერი წარმოდგენილია დეტერმინირებული და შემთხვევითი ჯიტერების სტანდარტულ გადახრათა ჯამით. გაანგარიშებულია ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტის (BER) დამოკიდებულება დეტერმინირებული და შემთხვევითი ჯიტერების კონკრეტული მნიშვნელობებისათვის ერთეულოვან ინტერვალში (UI)  $BER = \Psi(UI)$ . წარმოდგენილი მეთოდოლოგია საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ სხვადასხვა სახის ჯიტერების განცალკევება, დავადგინოთ ციფრული სატელეკომუნიკაციო სისტემისათვის ჯიტერის ბიტურ შეცდომათა კოეფიციენტზე (ალბათობაზე) გავლენა.

6. შეფასებულია მოთხოვნები ჯიტერის პარამეტრების მიმართ გცბოს-ში. განსაზღვრულია ITU-T-ს მიერ რეკომენდირებული ჯიტერის ნორმები და მახასიათებლები, თვალის დიაგრამის ნიღაბი (შაბლონი).

7. შემოთავაზებულია თვალის დიაგრამის ანიმაციური მოდელი, რომელშიც გამოყენებულია დიაგრამის აგების მათემატიკური მეთოდი. ასეთი მიდგომით და ITU-T-ს რეკომენდაციებით შეფასებულ იქნა კონკრეტული გცბოს-ის ხარისხობრივი მაჩვენებლები. კერძოდ, სინქრონული ციფრული იერარქიის (SDH) სისტემის STM-1 დონისათვის

თვალის დიგრამისა და თვალის დიაგრამის სტანდარტული ნიღბის (შაბლონის) ზედდებით.

8. შემოთავაზებულია გცბოს-ის მიმღების წინასწარი გამაძლიერებლის ტიპის არჩევის და სქემის კომპონენტების დადგენის პროცედურების სქემა. ჩატარებულია წინასწარი გამაძლიერებლის კომპონენტების ინჟინრული გათვლა სიგნალი/ხმაური (S/N) ფარდობის მნიშვნელობის შეფასებისათვის, რაც საშუალებას იძლევა თითოეული კონკრეტული შემთხვევისათვის ავირჩიოთ ოპტიკური მიმღების წინასწარი გამაძლიერებლის სქემა და კომპონენტები.

### ლიტერატურა

1. ჩხაიძე მ., სვანიძე რ., მესტიაშვილი კ. ძირითადი მახასიათებლების ფორმალიზაცია გადაცემის ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების (გცბოს) მოდელირების დროს. თბილისის დავით აღმაშენებლის სახელობის უნივერსიტეტი. პროფესორ-მასწავლებელთა და სტუდენტთა XVII სამეცნიერო კონფერენცია. თბილისი, მაისი, 2010 წელი.
2. ჩხაიძე მ., სვანიძე რ. რეგენერაციული უბნის (რუ) სიგრძის ოპტიმიზაცია გადაცემის ციფრულ ბოჭკოვან-ოპტიკურ სისტემებში (გცბოს). აკადემიკოს ი.ფრანგიშვილის დაბადების 80 წლისთავისადმი მიძღვნილი საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „საინფორმაციო და კომპიუტერული ტექნოლოგიები, მოდელირება, მართვა.“ შრომები, თბილისი, 2011, გვ. 15-17.
3. Местиашвили К.В., Чхаидзе М.Т., Сванидзе Р.Г., Об автоматизации вычислений энергетических спектров линейных сигналов в цифровых волоконно-оптических системах передачи. Georgian Engineering News, №4, 2009.
4. Местиашвили К.В., Чхаидзе М.Т., Сванидзе Р.Г., Бирман Ф.М. К оптимизации вычислений энергетических спектров линейных сигналов в цифровых волоконно- оптических системах передачи. Georgian Engineering News, №3, 2011. с. 72-75.

5. ჩხაიძე მ. გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური TDM და WDM ტექნოლოგიების შედარებითი ანალიზი. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი „ინტელექტუალი“, №16, თბილისი, 2011, გვ. 129-137.
6. ჩხაიძე მ. დროითი (TDM) და ტალღური (WDM) მულტიპლექსირების სისტემების შედარება ენერგეტიკული პოტენციალის მიხედვით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. მართვის ავტომატიზებული სისტემები. შრომები, №1(10), თბილისი, 2011, გვ. 286-289.
7. ჩხაიძე მ.თ., სვანიძე რ.გ., ჯიტერი, მისი გაზომვისა და შეფასების ასპექტები. Georgian Engineering News, №2, 2012.
8. ჩხაიძე მ.თ., სვანიძე რ.გ., ჯიტერის შეფასების მეთოდოლოგია. Georgian Engineering News, №2, 2012.
9. ჩხაიძე მ.თ., სვანიძე რ.გ., ჯიტერის შეფასება თვალის დიაგრამის ანიმაციური მოდელით. Georgian Engineering News, №3, 2012.
10. ჩხაიძე მ.თ., სვანიძე რ.გ., გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური სისტემების (გცბოს) ოპტიკური მიმღების წინასწარი გამაძლიერებლის ოპტიმიზაცია. Georgian Engineering News, №3, 2012.
11. ჩხაიძე მ. გადაცემის ციფრული ბოჭკოვან-ოპტიკური TDM და WDM ტექნოლოგიების შედარებითი ანალიზი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. სტუდენტთა 79-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თეზისების კრებული, თბილისი, 2011, გვ.34.

## **ABSTRACT**

The work deals with the investigation of digital fiber-optics transmission systems (DFOTS).

A scheme of DFOTS as a complex system is presented. The aspects of its basic units and formalization of its characteristics are considered. Among them are an optical transmission module (OTM), codec, optical cable (OC), an optical receiver etc.

The structure of the database of DFOTS and the database for some its subsystems were elaborated. The database included additional attenuation of optical fiber, the dependence of the optical receiver sensitivity on the transmission speed for

photodetectors with p-i-n and avalanche photodiodes etc. For various avalanche photodiodes (APD) were defined the optimal values of the amplification coefficient, for which optimal values of the regeneration section (RS) length were determined. When selecting the optimal values for APD, the regeneration section length could be extended by 10% in comparison with that at a nonoptimal amplification coefficient, which effects economy in the overall cost of the system.

The iteration method is proposed for calculation of energy spectra of the linear signals of DFOT. The calculation by this method is performed without knowing the eigenvalues of the matrix of transition probabilities, which makes the calculation with large matrices much simpler. A program package was developed. This package makes the calculation much simpler in the case of high-order probability matrices and promotes the automation of calculation. The developed method gives good practical results in resolving the problems in some other fields of science and engineering.

A comparative analysis of the systems of Time Division Multiplexing (TDM) and Wavelength Division Multiplexing (WDM) systems was performed. There were analyzed the basic indices of the systems: capacity, possibilities for modernization of available traditional TDM highways, organization of the linear track, structural flexibility, the model of interaction with transportation technologies, the budget of systems etc. The appropriate methodology was developed. The conclusions about the advantages, drawbacks and equivalence of the systems were made.

The significance of jitter in digital transmission systems, its origin and physical nature were characterized by the systems approach. Classification of jitter is given; the techniques of jitter measurement and assessment are analysed, the assessment of jitter by using the eye diagram being one of the most important. The Dual-Dirac method is considered as the latest one for measurement of jitter. This method allows representing the jitter in terms of deterministic and random jitters. Basic requirements to the jitter in Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) and Synchronous Digital Hierarchy (SDH) systems were stated. The standards of the International Telecommunication Union (ITU) in this relation were worked out. The jitter testing mask is presented.

A simulation-animation model of the eye diagram was developed. The model makes possible the determination of the jitter value by artificial distortion of the signal, the determination of the signal/noise ratio and the loss as compared to the ideal signal/noise ratio, and the determination of the degree of deterioration of the digital

system resistance to interferences, which allows assessing beforehand the quality of communication in the given digital system. In addition, we can assess the correspondence of signal transmission quality to ITU-T standards for the SDH system.

The aspects of restoration of the electric signal of the optical receiver were studied. A formalized version of the structural scheme of selection of amplifiers for DFOTS was elaborated. In each node of the scheme, the formulae for calculation of the signal/noise ratio of the corresponding amplifier and the procedure of choosing the appropriate amplifier are given. Preliminary calculation of the signal/noise ratio of the optical receiver of DFOTS was performed by particular data for amplifiers of all types. This allows choosing the preliminary amplifier circuit and components of the optical receiver in each particular case.

The programs composed in the frame of this work were realized in Mathlab.

The results of this work can be used in designing of the units of DFOTS. They also can be used in the course "Digital Fiber-Optics Transmission Systems" intended for the students and post-graduates of the Faculty of Energetics and Telecommunication of the Georgian Technical University.