



სამცხე-ჯავახეთის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ინჟინერიის, აგრარულ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა
ფაკულტეტი

ინფორმატიკის სადოქტორო პროგრამა

დარეჯან ვედიაკოვი

**ელექტრონული წრედების პარამეტრების
კორექტულობის შემოწმების ალგორითმები**

ინფორმატიკის დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაცია

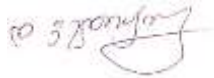
სამეცნიერო ხელმძღვანელი: *ვასილ ტაბატაძე*
ფიზიკის დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი

ახალციხე
2025

განაცხადი

მე, დარეჯან ვედიაკოვი ვაცხადებ, რომ წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი წარმოადგენს ჩემს ორიგინალურ ნამუშევარს და არ შეიცავს სხვა ავტორების მიერ აქამდე გამოქვეყნებულ, გამოსაქვეყნებლად მიღებულ ან დასაცავად წარდგენილ მასალას, რომელიც ნაშრომში არ არის მოხსენიებული ან ციტირებული სათანადო წესების შესაბამისად.

ხელმოწერა



თარიღი

სარჩევი

განაცხადი.....	2
ანოტაცია	5
ANNOTATION.....	8
შესავალი.....	10
თავი 1. თეორიული საფუძვლები და კვლევის კონტექსტი	22
1.1 სიგნალები და სისტემები	22
1.2 სიგნალის ციფრული დამუშავების ძირითადი მექანიზმები.....	33
1.3 ციფრული სიგნალის დამუშავების მათემატიკური აპარატი.....	40
1.3.1 სიგნალის მათემატიკური წარმოდგენა	40
1.3.2 ელექტრონული წრედების მოდელირება	41
1.3.3 ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა (DFT) და ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა (FFT)	43
1.3.4 სინგულარული მნიშვნელობების დაშლა (SVD).....	44
1.3.5 ჰილბერტის დისკრეტული გარდაქმნა (DHT)	46
1.3.6 S -პარამეტრების ხარისხის შემოწმება ფიზიკურ ერთეულებში.....	47
1.3.7 AWGN არხის როლი S-პარამეტრების ხარისხის შეფასებაში	52
1.3.8. MATLAB-ის როლი სიგნალის დამუშავებაში.....	55
1.3.9 თვალის დიაგრამების ანალიზი.....	60
თავი 2. პარამეტრების ვერიფიკაციის თეორიული და პრაქტიკული მიდგომები	64
2.1 ელექტრონული წრედის პარამეტრების ვერიფიკაციის არსი	64
2.2. სიმულაციაზე დაფუძნებული ვერიფიკაციის ალგორითმები	67
2.3 ანალიტიკური ვერიფიკაციის ტექნიკა	71
2.4. სტატისტიკური მეთოდები ვერიფიკაციისთვის	75
2.5. ინოვაციური ალგორითმები და ახალი ტენდენციები	79
2.6. პრაქტიკული მოსაზრებები და გამოწვევები.....	83
2.7. ვერიფიკაციის ალგორითმების ანალიზი და შერჩევის სტრატეგიები.....	86
თავი 3. სიგნალის მთლიანობის შემოწმების მეთოდები	89
3.1 კაუზალობის შემოწმების მეთოდები.....	89
3.2. ექსტრაპოლაცია DC-ში	92
3.3. საწყისი პასიურობის შემოწმება ნედლ მონაცემებზე	96
თავი 4. რიცხვითი ექსპერომენტის შედეგი	100

4.1. ქსელის აგება მოცემული პარამეტრებით და მისი შემოწმება გამართულობაზე თავალის დიაგრამით	100
4. 2. კაუზალობის შეფასება ჰილბერტის გარადაქმნით (DHT)	105
4. 3. ქსელის შემოწმება პასიურობაზე	112
4.4. სიგნალის მდგრადობის შეფასება ხმაურის პირობებში	120
თავი 5. რიცხვითი ექსპერიმენტის შესასრულებლად საჭირო MATLAB კოდი	130
5.1 ციფრული სიგნალის გენერირება დროის დომენში	130
5.2 ექვალაიზაციის ალგორითმი თავალის დიაგრამის ანალიზისთვის	131
დასკვნა	136
სამომავლო მიმართულებები და რეკომენდაციები	139
გამოყენებული ლიტერატურა	142
ნახაზების, ცხრილების და დიაგრამების ნუსხა	146
ძირითადი ტერმინების განმარტება	148
აბრევიატურის ნუსხა.....	149
ABBREVIATIONS	151

ანოტაცია

წარმოდგენილი კვლევა ეფუძნება თანამედროვე ელექტრონული სისტემების მოდელირებისა და ვერიფიკაციის კრიტიკულ საჭიროებებს. კვლევის მთავარი მიზანი იყო ელექტრონული წრედების პარამეტრების კორექტულობის შემოწმების ალგორითმების განვითარება და მათი ეფექტიანობის პრაქტიკული დადასტურება. აღნიშნული ამოცანა განსაკუთრებით აქტუალურია S-პარამეტრებზე (Scattering Parameters) დაფუძნებულ მოდელებთან მიმართებით, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება მაღალსიხშირიან სისტემებში. მიუხედავად მათი ფართო გამოყენებისა, მოდელების სანდოობა დამოკიდებულია ფიზიკურ თანხვედრაზე კაუზალობის, პასიურობისა და შექცევადობის შენარჩუნებაზე. აღნიშნული პირობების დარღვევა იწვევს მოდელის არასტაბილურობასა და არარეალურ ქცევას, რაც ელექტრონული სისტემების მუშაობის სანდოობაზე მნიშვნელოვნად მოქმედებს.

კვლევის თეორიულ საფუძვლად იქცა დასკვნა, რომ მაღალი სიხშირის სისტემებში სიგნალის მთლიანობის დარღვევა შეიძლება წარმოიშვას სწორედ პარამეტრების ფიზიკური შეუსაბამობის შედეგად. ამიტომ, აუცილებელია ისეთი ვერიფიკაციის ალგორითმების შემუშავება, რომლებიც უზრუნველყოფენ მოდელების ფიზიკურ სისწორესა და მათ გამოთვლით ეფექტიანობას. ლიტერატურის მიმოხილვამ აჩვენა, რომ ტრადიციული მეთოდები ეფექტიანია წრფივ მოდელებში, თუმცა მათი გამოყენება რთულ, ჰიბრიდულ და არაწრფივ სისტემებში ხშირად შეზღუდულია. ეს ფაქტორი განაპირობებს ინოვაციური, განვითარებული მიდგომების დანერგვის საჭიროებას.

კვლევის ფარგლებში შემუშავდა ჰილბერტის დისკრეტულ გარდაქმნაზე დაფუძნებული ალგორითმი, რომელიც კაუზალობის შემოწმებისას უზრუნველყოფს გადაცემის ფუნქციის რეალურ და წარმოსახვით კომპონენტებს შორის შესაბამისობას და ეფექტურად გამოავლენს არაკაუზალურ კომპონენტებს. პასიურობის უზრუნველსაყოფად შემოთავაზებულია SVD (სინგულარული მნიშვნელობების დაშლა)-ზე დაფუძნებული მეთოდოლოგია, რომელიც მატრიცულ კორექციას ახორციელებს მინიმალური დამახინჯებით, რითაც ინარჩუნებს მოდელის სტრუქტურასა და სიზუსტეს.

MATLAB-ში დაიწერა პროგრამები, რომელთა საშუალებით გამოკვლეულ იქნა 20 GHz-მდე სიხშირეზე მომუშავე PCB პლატა (Printed Circuit Board) და 6-დიუმბიანი, 50 ომიანი წინაღობის მქონე ზოლოვანი ხაზი (microstrip transmission line).

ალგორითმების ტესტირება განხორციელდა MATLAB-ის საშუალებით ორ საცდელ მონაცემთა ნაკრებზე — Through_20GHz.s2p და Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p (მომწოდებელი — მისურის შტატის უნივერსიტეტის ლაბორატორია).

ჩატარებულმა ექსპერიმენტულმა შედეგებმა აჩვენა მაღალი სიზუსტე და ვოლტაჟური განსხვავებების მინიმალური მნიშვნელობები, რაც ადასტურებს შემუშავებული მიდგომის ეფექტიანობასა და პრაქტიკულ სანდობას. რიცხვითმა ექსპერიმენტებმა გამოავლინა მეთოდების მდგრადობა, ადაპტურობა და გამოყენებადობის პოტენციალი მრავალფეროვან საინჟინრო სცენარებში.

კვლევის პრაქტიკული მნიშვნელობა მრავალმხრივია, რამდენადაც პასიურობისა და კაუზალურობის კონტროლი კრიტიკულია მაღალი სიჩქარის PCB სისტემების, ინტერფეისების, EMC (ელექტრომაგნიტური თავსებადობა) ტესტირებისა და სიგნალის მთლიანობის შენარჩუნებისთვის. შემუშავებული MATLAB-ზე დაფუძნებული ალგორითმები ადვილად ინტეგრირდება არსებულ CAD (კომპიუტერულად მხარდაჭერილი დიზაინი) პროცესებში, ამცირებს დიზაინის ციკლის ხანგრძლივობას და ზრდის მოდელირების სანდობას. IEEE P370 სტანდარტის გამოყენება უზრუნველყოფს მოდელების სტრუქტურულ შესაბამისობასა და სტანდარტიზებულ შეფასებას.

თანამედროვე კვლევითი ტენდენციები ასახავს ვერიფიკაციის მეთოდების ტრანსფორმაციას ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული სისტემების მიმართულებით. Physics-Informed Neural Networks (PINN- ფიზიკაზე დაფუძნებული ნეირონული ქსელები), SROPEE და Spectral MOR მეთოდები აერთიანებენ ფიზიკურ კანონებსა და მონაცემებზე დაფუძნებულ მოდელირებას, რაც ამცირებს ემპირიულ მონაცემებზე დამოკიდებულებას და ზრდის პროგნოზირების სიზუსტეს. ასეთი ჰიბრიდული მიდგომები უზრუნველყოფენ გამოთვლითი რესურსების ოპტიმიზაციას და ქმნიან წინაპირობას რეალურ დროში ვერიფიკაციის დანერგვისთვის.

სამომავლოდ, კვლევების მიზანი უნდა იყოს ინტეგრირებული ალგორითმების განვითარება, რომლებიც ერთდროულად უზრუნველყოფენ ფიზიკური თანხვედრის პირობებს, პროგნოზირების სიზუსტესა და ინტერპრეტირებადობას. ამასთან, აუცილებელია ყურადღების გამახვილება AI-არქიტექტურების გამჭვირვალობაზე და IEEE სტანდარტებთან შესაბამისობაზე, რაც ხელს შეუწყობს ელექტრონული სისტემების მოდელირების უფრო ეფექტურ და სანდო რეალიზაციას.

ALGORITHMS FOR VERIFYING THE CORRECTNESS OF ELECTRONIC CIRCUIT PARAMETERS

Darejan VEDIKOV

ANNOTATION

The presented study is based on the critical requirements of modeling and verification in modern electronic systems. The primary objective of the research was to develop algorithms for verifying the correctness of electronic circuit parameters and to demonstrate their practical effectiveness. This task is particularly relevant for models based on S-parameters (Scattering Parameters), which are widely used in high-frequency systems. Despite their broad applicability, the reliability of these models depends on physical consistency, specifically the preservation of causality, passivity, and reciprocity. Violations of these conditions can lead to model instability and non-physical behavior, significantly affecting the performance and reliability of electronic systems.

The theoretical foundation of the study stems from the observation that signal integrity issues in high-frequency systems may arise precisely due to the physical inconsistency of parameters. Therefore, it is essential to develop verification algorithms that ensure both the physical correctness of the models and their computational efficiency. A literature review indicated that traditional methods are effective for linear models but are often limited when applied to complex, hybrid, and nonlinear systems. This limitation motivates the adoption of innovative, advanced approaches.

Within the scope of this research, an algorithm based on the discrete Hilbert transform was developed to verify causality, ensuring consistency between the real and imaginary components of the transfer function and effectively identifying non-causal components. To enforce passivity, an SVD (Singular Value Decomposition)-based methodology was proposed, performing matrix correction with minimal distortion, thereby preserving the model's structure and accuracy.

Specialized MATLAB programs were developed to investigate a Printed Circuit Board (PCB) operating up to 20 GHz and a 6-inch microstrip transmission line with 50 Ω

characteristic impedance. The algorithms were tested in MATLAB on two benchmark datasets — `Through_20GHz.s2p` and `Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p` (provided by the University of Missouri laboratory). The experimental results demonstrated high accuracy and minimal voltage deviations, confirming the effectiveness and practical reliability of the proposed approach. Numerical experiments further revealed the methods' robustness, adaptability, and applicability across a variety of engineering scenarios.

The practical significance of this study is multifaceted, as controlling passivity and causality is critical for high-speed PCB systems, interfaces, EMC (Electromagnetic Compatibility) testing, and maintaining signal integrity. The MATLAB-based algorithms can be easily integrated into existing CAD (Computer-Aided Design) workflows, reducing design cycle time and enhancing modeling reliability. The adoption of the IEEE P370 standard ensures structural compliance and standardized evaluation of the models.

Current trends indicate a transformation of verification tools toward AI-based systems. Physics-Informed Neural Networks (PINNs), SROPEE, and Spectral MOR methods combine physical laws with data-driven modeling, reducing reliance on empirical data and increasing predictive accuracy. Such hybrid approaches optimize computational resources and lay the groundwork for real-time verification implementation.

Looking ahead, research should focus on developing integrated algorithms that simultaneously ensure physical consistency, predictive accuracy, and interpretability. Additionally, attention should be given to the transparency of AI architectures and compliance with IEEE standards, thereby supporting more efficient and reliable modeling of electronic systems.

შესავალი

თანამედროვე ელექტრონული სისტემების სანდო მოდელირებისთვის აუცილებელია ქსელის პარამეტრების ისეთი შერჩევა, რომელიც ფიზიკურ რეალობას შეესაბამება. S-პარამეტრები (Scattering Parameters) როგორც პასიურ, ისე აქტიურ მაღალსიხშირიან სისტემებში ფართოდ გამოიყენება მათი მოქნილობისა და მრავალპორტიანობის გამო. თუმცა, მათი მოდელის გამოყენება მხოლოდ იმ შემთხვევაში ხდება, თუ ისინი აკმაყოფილებენ ფიზიკურად აუცილებელ თვისებებს: კაუზალურობას, პასიურობასა და შექცევადობას (reciprocity). ეს მახასიათებლები ქსელის სტაბილურობას, სიმულაციის სიზუსტეს და მოწყობილობის რეალურ გარემოსთან შესაბამისობას განსაზღვრავენ, ამ აუცილებლობას თანამედროვე კვლევებიც ადასტურებენ. მაგალითად, Torun და მისი კოლეგები (2019) ნეირონულ ქსელებში (NN) უშუალოდ ინტეგრირებულ განხორციელების ფენებს იყენებენ, რაც უზრუნველყოფს NN-გენერირებული მოდელების ფიზიკურ სისწორეს და მათ უსაფრთხო გამოყენებას შემდგომ სიმულაციებში (Torun A.Hakki 2019)

აღნიშნული მიმოხილვა იმ ალგორითმებისა და მიდგომების სისტემურ ანალიზს ეძღვნება, რომლებიც S-პარამეტრების ფიზიკური სისწორის შემოწმებასა და დაცვას უზრუნველყოფენ. განხილული იქნება როგორც ტრადიციული მატრიცულ-ანალიტიკური მეთოდები, ასევე თანამედროვე ნეირონული ქსელებისა და ღრმა სწავლების საფუძველზე შექმნილი განხორციელების სტრატეგიები. ფიზიკური თანხვედრის ძირითადი მახასიათებლები:

კაუზალობა. კაუზალურობა წარმოადგენს აუცილებელ პირობას სისტემის რეალურობაზე — სისტემის პასუხი იმპულსზე არ შეიძლება იმპულსამდე განვითარდეს. ელექტრონული წრედებისთვის ეს ნიშნავს, რომ გადაცემის ფუნქცია, ან მისი ფურიეს გარდაქმნა, უნდა იყოს ჰოლომორფული კომპლექსური სიხშირის ზედა ნახევარსიბრტყეში. ეს სიგნალის ტრანსფორმაციის უნიკალურობას და ფიზიკურ შესაბამისობას უზრუნველყოფს.

მათემატიკურად, კაუზალურობას შეესაბამება კრამერს-კრონინგის დამოკიდებულება რეალურ და წარმოსახვით კომპონენტებს შორის. თორუნი (Torun) და მისი ჯგუფი ნეირონული ქსელების სტრუქტურებს გვთავაზობენ, სადაც

კაუზალობის აღსრულების ფენა (Causality Enforcement Layer (CEL)) ინტეგრირებულია ტრენინგის პროცესში, რაც საშუალებას იძლევა მოდელი ავტომატურად აკმაყოფილებდეს კაუზალურობის მოთხოვნას (Torun, Hakki, და სხვ. 2020, 1-3).

ჰაკი, თორუნი და სხვები გვთავაზობენ მეთოდს, რომელიც უზრუნველყოფს ნეირონული ქსელის (NN) მოდელების გამოყენებით გენერირებული S-პარამეტრების ფიზიკურად თანმიმდევრულობას და შემდგომ მათ უსაფრთხოდ გამოყენებას დროის დომენურ სიმულაციებში. ეს კაუზალობის და პასიურობის აღსრულების ფენების, როგორც NN-ის ბოლო ორი ფენის, შემოღებით მიიღწევა, NN მოდელის ტრენინგისა და დასკვნის გამოტანის გამოთვლითი ხარჯების მინიმიზაციის პარალელურად. შემოთავაზებული ტექნიკა დემონსტრირებულია პაკეტის ბირთვში არსებული დიფერენციალური ფილებით დაფარული ხვრელის (PTH) 13 განზომილებიანი გეომეტრიული პარამეტრების შესაბამის ფართოზოლოვან S-პარამეტრებთან 100 გჰც-მდე შესატყვისობის შესწავლით (Torun, Hakki, და სხვ. 2019, 1-5).

პასიურობა. პასიურობის პრინციპი გულისხმობს, რომ სისტემა არ უნდა წარმოქმნიდეს ან გამოყოფდეს საკუთარ ენერგიას. ეს პირობა განსაკუთრებული მნიშვნელობის მაშინ ხდება, როდესაც სისტემის სტაბილურობა და ენერგიის შენარჩუნება კრიტიკულ როლს ასრულებს.

S-პარამეტრების (გადაცემის პარამეტრების) ფორმალიზაციის ფარგლებში, ეს პრინციპი ითარგმნება შემდეგი მათემატიკური პირობით: S-მატრიცის (განსაზღვრული გარკვეული სიხშირეზე) სინგულარული მნიშვნელობები არ უნდა აღემატებოდეს ერთს:

$$\|S(j\omega)\|_2 \leq 1 \quad \forall \omega \in \mathbb{R}$$

ეს ნიშნავს, რომ სისტემა არ ახდენს სიგნალის გაძლიერებას (ენერგეტიკული თვალსაზრისით), რაც პასიურობის პირობის შესრულებაა.

გუსტავსენის (Gustavsen) მიერ შემუშავებული ალგორითმი გვთავაზობს ასეთ მიდგომას: ნაშთური მატრიცის (residue matrix) საკუთარი მნიშვნელობების მცირედი მოდიფიკაციით, შესაძლებელია ისე შევცვალოთ სისტემა, რომ ის სრულად დაემორჩილოს პასიურობის პირობებს — ყოველგვარი მნიშვნელოვანი ცდომილებისა ან მოდელის მთლიანობის დარღვევის გარეშე (Gustavsen 2010, 15-20).

ალტერნატიულად, Beckers და მისი ჯგუფი წარადგენენ ახალ მიდგომას, რომელიც აერთიანებს ფიზიკურად ინფორმირებულ სწავლებას (physics-informed learning) და პასიურობის პირობების გათვალისწინებას პირდაპირ ნეირონული ქსელის სწავლის პროცესში. შედეგად, ნეირონული მოდელი სწავლობს არამხოლოდ მონაცემების მიახლოებას, არამედ მათ ფიზიკურად სარწმუნო და პასიურ ფორმაში წარმოდგენასაც (Beckers და Colombo 2025, 45).

შექცევადობა. შექცევადობა ითხოვს, რომ გადაცემის ფუნქცია იყოს სიმეტრიული: $S^T = S$. ეს პრინციპი გამოხატავს Maxwell-ის განტოლებებიდან მომდინარე ენერჯის შენახვის კანონს წრფივ სისტემებში და მრავალპორტიანი სისტემების მოდელირებისთვის აუცილებელ პირობად ითვლება. IEEE P370 სტანდარტი ამ პირობას მკაცრად ითხოვს, განსაკუთრებით მაღალი სიხშირის (>25GHz) ინტერფეისების მოდელირებისას (IEEE Standard for Electrical 2021, 141-147).

Doshi და მისი თანაავტორები გვთავაზობენ ალგორითმებს, რომლებიც პასიურობასა და კაუზალურობასთან ერთად ასევე უზრუნველყოფენ შექცევადობის აღსრულებას ოპტიმიზაციის საფუძველზე. ამ მიდგომით არის S-პარამეტრების ფიზიკურად შესაბამისი მოდელირება მაღალი სიხუსტით უზრუნველყოფილი (Doshi და Pupalaikis 2012).

ტრადიციული ალგორითმები: ნაშთური მატრიცის კორექცია. Gustavsen-ის მეთოდი (2010) ეფუძნება მოდელების Pole-Residue ფორმით წარმოდგენას და S-პარამეტრების პასიურობის უზრუნველყოფას ერთეულოვანი მნიშვნელობების მცირე კორექციის გზით. ამ მიდგომაში გამოიყენება ერმიტული (Hermitian) სტატისტიკური ანალიზი და ხაზგასმულია მოდელური სტრუქტურის შენარჩუნება (Gustavsen 2010, 23-35).

სინგულარობებზე დაფუძნებული უზრუნველყოფა. SVD-ზე დაფუძნებული სტრატეგიები აკვირდებიან იმ კრიტიკულ სიხშირეებს, სადაც S-პარამეტრების პასიურობის დარღვევაა დაფიქსირებული, და ამ რეგიონებში ახორციელებენ ლოკალურ კორექციას. აღნიშნული მიდგომა შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც დამოუკიდებლად (standalone), ისე კონვექსურ ოპტიმიზაციასთან კომბინაციაში, რაც ზრდის ალგორითმის ეფექტურობასა და კონვერგენციის სიხუსტეს.

მ. წიკლაური ნაშრომში „კაუზალობა, დაყოვნება და ფიზიკა რეალურ სისტემებში“ გაანალიზებულია ფიზიკური სისტემების კაუზალობის თვისება და მისი ფიზიკური საფუძვლები. განხილულია სხვადასხვა მეთოდოლოგია კაუზალობის შემოწმების და აღსრულებისთვის როგორც დროის, ასევე სიხშირის დომენში. წარმოდგენილია კაუზალობის დარღვევის გასაზომი მეტრიკა. განხილულია იდეალურად წრფივი ფაზის მქონე სისტემის ფიზიკური ანომალია და ნაჩვენებია, რომ ფაზის არაწრფივი ნაწილის მცირე დარღვევას შეუძლია არაკაუზალობა დააფიქსიროს (Tsiklauri, Zvonkin და Jun 2014, 961-966).

ვექტორული მიახლოება და პასიურობის მონიტორინგი. მრავალფაზიანი პასიურობის უზრუნველყოფის სქემები ეფუძნება მაკრომოდელების (rational models) აგებას, რომლის შემდგომაც მიმდინარეობს პასიურობის შემოწმების ოპერაცია და საჭიროებისამებრ – შედეგების გასწორება (Antoulas და Sorensen 2022, 1-10).

სტანდარტიზაციის მნიშვნელობა. S-პარამეტრების ფიზიკური სისწორისა და პრაქტიკულ გამოყენებადობას უზრუნველყოფს საერთაშორისო სტანდარტიზაციის პროცესები. IEEE Std 370-2020 წარმოადგენს ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს დოკუმენტს, რომელიც განსაზღვრავს S-პარამეტრების მოდელირების, გაზომვისა და შეფასების მახასიათებლებს. სტანდარტი მიმართულია მაღალი სიხშირის (>20 GHz) ინტერფეისების ანალიზზე და გამოიყენება როგორც ინდუსტრიაში, ისე კვლევით ცენტრებში.

სტანდარტი შემდეგ მნიშვნელოვან კრიტერიუმებს განსაზღვრავს:

IEEE P370 სტანდარტი წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან დოკუმენტს ელექტრონული მოდელირების სფეროში, რომელიც ადგენს ელექტრონული სისტემების გადაცემის მახასიათებლების სიზუსტისა და ფიზიკური შესაბამისობის საკვანძო პრინციპებს. აღნიშნული სტანდარტი განსაზღვრავს შემდეგ კრიტერიუმებს:

1. **პასიურობა (Passivity):** სისტემას არ უნდა ჰქონდეს ენერჯის გენერაციის უნარი. ყველა სიხშირეზე გადაცემულმა სიგნალმა არ უნდა გამოიწვიოს ენერჯის მატება. სტანდარტი ითხოვს, რომ სისტემის აღწერისას გამოყენებული S-პარამეტრები აკმაყოფილებდნენ მატრიცულ პირობას, რომელიც უზრუნველყოფს გადაცემის

ნორმის ერთზე ნაკლები მნიშვნელობით შეზღუდვას, რაც წარმოადგენს პასიურობის მაჩვენებელს.

2. **კაუზალობა (Causality):** კაუზალური სისტემა რეაგირებს მხოლოდ იმ მოვლენებზე, რომლებიც უკვე მომხდარია ან ხდება მოცემულ მომენტში. შესაბამისად, გადაცემის ფუნქცია უნდა წარმოადგენდეს ისეთ სისტემას, რომლის გამოსავალი არ არის დამოკიდებული შემომავალ სიგნალზე მის მიღებამდე. ეს უზრუნველყოფს ფიზიკურად რეალისტური ქცევის იმიტაციას მოდელში.

3. **შექცევადობა (Reciprocity):** აღნიშნული მახასიათებელი ეხება სისტემის სიმეტრიულობას — თუ სისტემა შექცევადია, მაშინ სიგნალის გადაცემა ერთ პორტიდან მეორეში ან პირიქით, იწვევს იდენტურ რეაქციას. მათემატიკურად ეს ნიშნავს, რომ S-პარამეტრების მატრიცა უნდა იყოს ტრანსპონირებული ტოლი თავდაპირველ მატრიცას (IEEE Standard for Electrical 2021, 50-60).

4. **განსაზღვრული სიზუსტე (Defined Accuracy):** IEEE P370 აწესებს კონკრეტულ ზღვრულ ნორმებს, თუ რამდენად დიდი შეიძლება იყოს მოდელირებულ და ექსპერიმენტულად გაზომილ მახასიათებლებს შორის აცდენა. ეს ნიშნავს, რომ ყოველ მოდელს უნდა ახლდეს შეფასებული მაქსიმალური ცდომილება, რომელიც არ უნდა სცილდებოდეს სტანდარტით განსაზღვრულ ზღვარს.

5. **მოდელის სტაბილურობა და განზოგადებადობა (Model Robustness and Generalizability):** ეფექტური მაკრომოდელი უნდა ინარჩუნებდეს სტაბილურობას პარამეტრების მცირე ცვლილების შემთხვევაშიც. სტანდარტი მოითხოვს ისეთი მოდელების გამოყენებას, რომლებიც ეფექტურად ფუნქციონირებენ სხვადასხვა ოპერაციულ პირობებში და აქვთ გადამუშავების უნარი, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია რეალურ აპლიკაციებში.

მნიშვნელოვანია, რომ სტანდარტი არ არის მხოლოდ დოკუმენტური მოთხოვნების კრებული, არამედ იგი მოიცავს სპეციფიკურ ტესტებსა და შესაბამისი მეთოდოლოგიების ფორმალიზებას, მაგალითად: დროით დომენში რეფლექტომეტრია (Time Domain Reflectometry - TDR), სიხშირით დომენში გაზომვები (Frequency Domain Measurements - FDM), და შერეული რეჟიმის S-პარამეტრების ტესტირება (Mixed-mode S-parameter Testing).

IEEE P370-ის სტანდარტი ასევე პირდაპირ უკავშირდება ISO/IEC-ის სტანდარტიზაციის პროცესებსა და სხვა შესაბამის პროექტებს, მათ შორის IBIS (I/O Buffer Information Specification). ეს ტექნოლოგიური კოორდინაციის შესაძლებლობას ქმნის მრავალ პორტიან ელექტრონულ სისტემებში.

შესაბამისობის მიღწევა IEEE P370-ის მიხედვით მნიშვნელოვანია, რათა S-პარამეტრების გამოყენება წარმატებით განხორციელდეს EMC ტესტირებაში, სქემების დიზაინში, მაღალი სიჩქარის PCB ანალიზსა და სტანდარტიზებული IP მოდულების გადაცემაში (IEEE Standard for Electrical 2021, 100-120).

უახლესი ალგორითმები და ინტეგრირებული სტრუქტურები. SROPEE (2024)

Choupanzadeh და Zadehgoლ-ის მიერ „წარმოდგენილი ალგორითმი აერთიანებს ვექტორული მისადაგების (Vector Fitting) მეთოდს, სინგულარული მნიშვნელობების გაკონტროლებას (Singular Value Enforcement) და მოდელის რიგის შემცირებას (Model Order Reduction) — რაც უზრუნველყოფს მოდელის თავსებადობას SPICE-თან.“. მეთოდი აჩქარებს სიმულაციას და ამცირებს გართულებას (Choupanzadeh, Zadehgoლ and Member 2024, 1-12).

სპექტრული ფაქტორიზაცია. Antoulas და Sorensen გვთავაზობენ პასიურობის შენარჩუნების ალგორითმს მოდულების შემცირებისას, რომელიც ეფუძნება სპექტრულ ფაქტორიზაციას და მაღალი დონის კონტროლის სისტემებში გამოიყენება. სწრაფ და ოპტიმალური ალგორითმებს გვთავაზობენ პასიურობის, შექცევადობისა და კაუზალურობის განხორციელების ერთდროული შემოწმებისთვის. ეს მიდგომა ოპტიმიზაციის გზით საერთო გადაწყვეტას პოულობს ყველა მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად (Antoulas და Sorensen 2022)

ხელოვნური ინტელექტი და ნეირონული ქსელები: CEL და PEL სტრუქტურა CEL (Causality Enforcement Layer) და PEL (Passivity Enforcement Layer) – ეს არის ორი სპეციალური ფენა (შრე) ნეირონულ ქსელში, რომლებიც შექმნილია იმისათვის, რომ უზრუნველყოს მოდელის შედეგების ფიზიკური სისწორე. Torun და მისი კოლეგები (2020) ნეირონულ ქსელში ამ ფენებს ამატებენ სწავლების ეტაპზე, რაც ნიშნავს, რომ ქსელი სწავლობს არა მხოლოდ მიახლოებას (approximation), არამედ იმავდროულად

ფიზიკურად სწორი სისტემის წარმოდგენასაც (Torun, Aygün და Swaminathan 2020, 1-3).

ფიზიკით განპირობებული ნეირონული ქსელები Physics-Informed Neural Networks (PINNs) მოდელებში ჩაშენებულია ფიზიკური შეზღუდვები, რაც ზრდის უტყუარობას და განაპირობებს ნაკლებ საჭიროებას დამატებითი post-processing-ისათვის

ჰიბრიდული სისტემები. Doshi და მისი გუნდის კვლევები ხსნიან პასიურობის ცნების გაფართოებას დისკრეტ-კონტინუუმ ჰიბრიდულ სისტემებზე. შესაბამისად, განხორციელების ალგორითმები უნდა იყოს სპეციფიკურად მორგებული (Doshi and Pupalaikis 2012).

კვლევის მიზანი: ელექტრონული წრედების პარამეტრების კორექტულობის ვერიფიკაციის პროცესის მეთოდური გაანალიზება და გაუმჯობესება, თანამედროვე ალგორითმების, სტანდარტიზაციის პრინციპებისა და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მიდგომების სინთეზით. კვლევის მიზანია შეირჩეს და შეფასდეს ისეთი ალგორითმები, რომლებიც უზრუნველყოფენ S-პარამეტრების ფიზიკურ თანხვედრას (პასიურობა, კაუხალობა, შექცევადობა), მაღალი სიზუსტის, სტაბილურობისა და ინდუსტრიული გამოყენებადობის პირობებში.

კვლევის მიზნის მისაღწევად დასახულია შემდეგი **ამოცანები**:

1. შეისწავლოს S-პარამეტრების ფიზიკური თანხვედრის პრინციპები, მათ შორის პასიურობა, კაუხალობა და შექცევადობა.
2. განხორციელდეს ტრადიციული ვერიფიკაციის ალგორითმების (Vector Fitting, Residue Matrix Correction, SVD და სხვ.) კლასიფიკაცია და ანალიზი მათი ეფექტურობისა და გამოყენების პირობების მიხედვით.
3. განიხილოს თანამედროვე მეთოდები, მათ შორის Physics-Informed Neural Networks (PINN), Spectral Model Order Reduction (Spectral MOR) და SROPEE, როგორც პროგრესული მიდგომები ვერიფიკაციის პროცესში.
4. შეფასდეს IEEE P370 სტანდარტის როლი და გავლენა მოდელების ფორმალიზაციასა და დამოწმებაზე.

5. შედარდეს ტრადიციული და ნეირონულ ქსელებზე დაფუძნებული ალგორითმები როგორც სიზუსტის, ისე სტაბილურობისა და გამჭვირვალობის თვალსაზრისით.

6. ჩამოყალიბდეს რეკომენდაციები ჰიბრიდული, ინტეგრირებული მიდგომების დანერგვის მიზნით, მათ შორის AI და სტანდარტიზაციის შერწყმის გზით.

კვლევის მეთოდოლოგია:

კვლევა განხორციელდა კომპიუტერული სიმულაციის გამოყენებით და სიმულაცია განხორციელებულია MATLAB -ის ჩანართების საშუალებით

არხის მონაცემების წყარო არის გაზომვა, სრულტალღოვანი მოდელირება და ანალიტიკური მოდელირება, მაგრამ არცერთი მათგანი არ იძლევა იდეალურ მონაცემებს. გაზომვას ყოველთვის ახლავს ხმაური სხვადასხვა წყაროდან, მონაცემების გატარების ზოლი შეზღუდულია და შეიძლება მიღებულ იქნას მხოლოდ სასრული რაოდენობის წერტილების სახით. ანალიტიკური მოდელი იყენებს მათემატიკურ აპროქსიმაციას, ამარტივებს რეალობას და არ შეიცავს სისტემის ყველა შესაძლებელ კომპონენტს. გარდა ამისა, არსებობს მცირე რაოდენობა გეომეტრიებისა რომლებიც შესაძლებელია ზუსტად აღიწეროს ანალიტიკური მეთოდით. სრულტალღოვანი მოდელი აგრეთვე იყენებს მათემატიკურ დაშვებებს და შეზღუდულია კომპიუტერული მოდელირებისთვის დამახასიათებელი გამოთვლის ცდომილებით. ამიტომ ნებისმიერი მონაცემები რომლებიც აღწერენ ფიზიკურ სისტემას მთლად ზუსტი არ არის და არ აღწერს მას სრულყოფილად. არსებული მონაცემების ხარისხის შეფასებისთვის საჭიროა არსებობდეს ხარისხის შეფასების შესაძლებლობა, მის საფუძველზე მიღებული შედეგების და დასკვნების საიმედოობის მისაღწევად. მოდელირების პროცედურები, რომლებიც გამოიყენება სიგნალის მთლიანობის შესაფასებლად მოცემული სისტემებისთვის, ძალიან მგრძობიარეა მათში გამოყენებულ მონაცემებთან მიმართებაში. თუ მონაცემები არღვევენ რეალური სისტემების მნიშვნელოვან ფიზიკურ თვისებებს, შედეგები შეიძლება იყოს უაზრო და მიღებული იქნას არასწორი გადაწყვეტილებები/ამოხსნები, რომლებიც გავლენას მოახდენს პროდუქტის დიზაინზე. როგორც უკვე აღვნიშნეთ S-პარამეტრები უნდა

აკმაყოფილებდნენ სამ ძირითად თვისებას (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019, 81-87).

მოდელირებულ ან გაზომილ მონაცემებში, შეცდომების სხვადასხვა წყაროს გამო, ეს თვისებები შესაძლოა დარღვეულიყო. S-პარამეტრების ხარისხის შესაფასებლად, არსებობს რამდენიმე მეთოდი. შექცევადობის, კაუზალობის და პასიურობის პროცენტული შეფასება სიხშირულ არეში შემოთავაზებულია მ. წიკლაურის და მისი თანაავტორების ნაშრომებში, მოცემულია კაუზალობის შეფასება პროცენტებში დროით სივრცეში, როგორც ენერჯის ნაწილი, რომელიც იმპულსური რეაქციის დაყოვნებამდე აღმოჩნდება. შემოთავაზებულია კაუზალობის შეფასება გადაცემის ფუნქციის რეალურ და წარმოსახვით ნაწილებს შორის კრამერს-კრონიგი დამოკიდებულებების საფუძველზე. ყველა ეს შეფასება მოცემულია ან აბსოლუტური მნიშვნელობით ან პროცენტებით (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე and წიკლაური 2019, 81-87).

წარმოდგენილი კვლევის სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

1. მრავალმხრივი ალგორითმული მიდგომების სისტემატიზაცია და შედარებითი ანალიზი, რომელიც მოიცავს როგორც ტრადიციულ მეთოდებს (Vector Fitting, SVD, Matrix Correction), ასევე უახლეს სტრატეგიებს (PINN, SROPEE, Spectral MOR). კვლევა ავლენს ამ მიდგომების კომპლემენტარობას და კონკრეტულ გამოყენების სფეროებს.

2. IEEE P370 სტანდარტის პრინციპების ინტეგრაცია ვერიფიკაციის პროცედურებთან, რაც შესაძლებლობას იძლევა პრაქტიკულ დონეზე შეფასდეს მოდელის შესაბამისობა ინდუსტრიულ მოთხოვნებთან და უზრუნველყოფს მისი ხარისხის გაზომვადობას.

3. ფიზიკურად ინფორმირებული ნეირონული ქსელების (Physics-Informed Neural Networks) გამოყენება არა მხოლოდ სიგნალის აღსადგენად, არამედ ფიზიკური თანხვედრის პრინციპების ტრენინგის პროცესში ჩაშენებისთვის, რაც იძლევა უფრო სტაბილური და ინტერპრეტირებადი მოდელების მიღების შესაძლებლობას.

4. ტექნოლოგიების ერთიან ფონზე დაყრდნობით შედგენილი ჰიბრიდული მიდგომის კონცეპტუალური განხილვა, რომელიც აერთიანებს მონაცემებზე

დაფუძნებულ და ფიზიკურად ინფორმირებულ ვერიფიკაცია ერთი მოდელის ფარგლებში (Tsiklauri, Zvonkin და Jun 2014).

S-პარამეტრების ფიზიკური თანხვედრის უზრუნველყოფა წარმოადგენს ძირითად გამოწვევას როგორც თეორიულ მოდელირებაში, ისე სამრეწველო CAD პროცესებში. მოცემულ ლიტერატურულ მიმოხილვაში დეტალურად განვიხილეთ კაუზალობის, პასიურობისა და შექცევადობის ფიზიკური პრინციპები, მათემატიკური საფუძვლები და შეფასების კრიტერიუმები. აღინიშნა, რომ ეს მახასიათებლები განსაზღვრავენ მოდელის სტაბილურობას, ენერგეტიკულ კონსერვაციასა და სიმულაციის სიზუსტეს.

ტრადიციული ალგორითმები, როგორცაა Vector Fitting, SVD დაფუძნებული კორექციები და residue matrix enforcement, უზრუნველყოფენ მაღალი ხარისხის მაკრომოდელების აგებას. IEEE P370 სტანდარტი ქმნის გამართულ ჩარჩოს, რომელიც ხელს უწყობს სტრუქტურულ შესაბამისობას და ხელს უშლის მოდელირების არამართებულ გამოყენებას.

უახლესი წლების განმავლობაში განვითარებულმა მიდგომებმა — მაგალითად, SROPEE და Spectral MOR — შეამცირეს ალგორითმების გამოთვლითი სირთულე და გაზარდეს მათი ეფექტურობა. ამავდროულად, ნეირონული ქსელების ინტეგრაცია, Physics-Informed Neural Networks-ის ჩათვლით, ახალ პერსპექტივებს ხსნის მოდელების ავტომატური კორექტულობის უზრუნველსაყოფად.

მნიშვნელოვანია ხაზგასმა, რომ სამომავლო კვლევებმა შეიძლება კონცენტრირება მოახდინოს სტრატეგიების განხორციელების ინტეგრაციაზე მრავალგანზომილებიან, დროში ცვალებად სისტემებთან, სტოქასტიკური მოდელირებისა და მრავალფაზიანი ჰიბრიდული ქსელების პირობებში. ასევე, საჭიროა უფრო ინტერპრეტირებადი მოდელების განვითარება, რათა ინჟინრებს გადაწყვეტილების დასაბუთებულად მიღების საშუალება ჰქონდეთ.

და ბოლოს, ელექტრონული წრედების მოდელირება S-პარამეტრების გამოყენებით საჭიროებს კომპლექსურ, მაგრამ საფუძვლიან მიდგომას, რომელიც აერთიანებს ფიზიკურ პრინციპებს, მათემატიკურ შეფასებებს, ალგორითმულ გადაწყვეტილებებსა და სტანდარტულ წესებს. ამგვარად, კორექტულობის შემოწმების

ალგორითმები არა მხოლოდ ტექნიკური გამოწვევაა, არამედ აუცილებელი საფუძველია მაღალი ხარისხის დიზაინისთვის და ინოვაციური განვითარებისთვის.

სადისერტაციო ნაშრომის მოკლე მიმოხილვა: ნაშრომი შედგება ხუთი ძირითადი თავისგან, ლიტერატურის მიმოხილვის, დასკვნისა და ბიბლიოგრაფიისაგან და ელექტრონული წრედების პარამეტრების კორექტულობის შემოწმების ალგორითმების კომპლექსურ ანალიზს ეძღვნება. ნაშრომში განხილულია როგორც თეორიული საფუძვლები, ისე გამოთვლითი ტექნოლოგიები და პრაქტიკული ვალიდაციის მექანიზმები, განსაკუთრებით S-პარამეტრების ჭრილში.

ნაშრომის პირველი თავი ეძღვნება კვლევისთვის აუცილებელი თეორიული საფუძვლების და ლიტერატურის მიმოხილვას, ციფრული სიგნალის დამუშავების მათემატიკურ აპარატს, სიგნალის მათემატიკურ წარმოდგენას. ელექტრონული წრედების მოდელირებას და მათი დამუშავების თეორიებს, ასევე ფურიეს დისკრეტულ და სწრაფ გადაქმნებს, ჰილბერტის დისკრეტულ გარდაქმნას, S პარამეტრების ხარისხის შემოწმებას ფიზიკურ ერთეულებში; არხის ანალიზისთვის თვალის დიაგრამის ანალიზს და AWGN (ადიტიური თეთრი გაუსის ხმაური) როლს არხის პარამეტრების ხარისხის შეფასებაში. განხილულია პროგრამული პაკეტის MATLAB -ის როლი სიგნალის ციფრულ დამუშავებაში

მეორე თავში განხილულია პარამეტრების ვერიფიკაციის თეორიული და პრაქტიკული მიდგომები, ელექტრონული წრედების ვერიფიკაციის არსი, სიმულაციაზე დაფუძნებული ვერიფიკაციის ალგორითმები; ვერიფიკაციის ანალიტიკური და სტატისტიკური მეთოდები; სტატისტიკური და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მეთოდები. ხაზგასმულია ფიზიკური თანხვედრის სამი კრიტერიუმის (კაუზალობა, პასიურობა, შექცევადობა) მნიშვნელობა და IEEE P370-ის სტანდარტის როლი. შემოთავაზებულია პრაქტიკული მოსაზრებები და გამოწვევები.

ძირითადი ოპერაციები ციფრულ სიგნალთა დამუშავებაში, როგორცაა ნიმუშარება, ინტერპოლაცია, დისკრეტული და სწრაფი ფურიეს გარდაქმნები (DFT, FFT), ჰილბერტის გარდაქმნა და სხვა აღნიშნული ტექნოლოგიები განიხილება როგორც აუცილებელი კომპონენტები კაუზალობისა და პასიურობის შეფასებისთვის.

მესამე თავში სიგნალის მთლიანობის შემოწმების სხვადასხვა ალგორითმებია წარმოდგენილი: კაუზალობის შეფასება (ჰილბერტის ანალიზით), DC ექსტრაპოლაცია, პასიურობის უზრუნველყოფა. განხილულია ნეირონულ ქსელებში ინტეგრირებული CEL და PEL ფენების როლი. ხაზგასმულია გადაცემის არხის DC ქცევის მნიშვნელობა მოდელირების პრაქტიკულ პროცესში.

მეოთხე თავში წარმოდგენილია ოთხი დამოუკიდებელი კვლევა, რომელთა მიზანია წარმოდგენილი ალგორითმების პრაქტიკული გამოყენებადობის დადასტურება. განხილულია თვალის დიაგრამით შემოწმება, ჰილბერტზე დაფუძნებული კაუზალობის შეფასება, პასიურობის უზრუნველყოფა ნაშთური მატრიცის საკუთარ მნიშვნელობებზე ზემოქმედებით და მოდელის მდგრადობის ანალიზი არხში ხმაურის არსებობისას.

მეხუთხე თავში აღწერილია პროგრამები რომლებიც გამოიყენება კვლევის დროს.

და ბოლოს, დასკვნა ქმნის დისერტაციის მრავალსაფეხურიან ჩარჩოს, რომელიც აერთიანებს თეორიულ მოდელირებას, ფიზიკური მახასიათებლების ალგორითმულ უზრუნველყოფასა და სიმულაციაზე დაფუძნებულ ვალიდაციას ინდუსტრიულ სტანდარტებთან თანხვედრაში; ტრადიციული მიდგომების სინთეზი თანამედროვე, ნეირონულ ქსელებზე დაფუძნებულ მოდელებთან (მაგ. PINN), ქმნის სტაბილური და ინტერპრეტირებადი მოდელირების საფუძველს. შედეგები შესაძლოა გამოყენებულ იქნას როგორც აკადემიურ კვლევებში, ისე პრაქტიკულ სქემურ დიზაინში, სიგნალის მთლიანობის ანალიზში და მაღალი სიჩქარის სისტემების შეფასებისთვის. მოცემულია სამომავლო კვლევის ძირითადი მიმართულებები.

თავი 1. თეორიული საფუძვლები და კვლევის კონტექსტი

1.1 სიგნალები და სისტემები

სიგნალებისა და სისტემების ცნებები მრავალფეროვან სფეროებში გვხვდება და ამ ცნებებთან დაკავშირებული იდეები და მეთოდები მნიშვნელოვან როლს თამაშობს მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების ისეთ მრავალფეროვან დარგებში, როგორც კომუნიკაციები, აერონავტიკა და ასტრონავტიკა, ელექტრული სქემების დაპროექტება, აკუსტიკა, სეისმოლოგია, ბიოსამედიცინო ინჟინერია, ენერჯის წარმოებისა და განაწილების სისტემები, ქიმიური პროცესების კონტროლი და მეტყველების დამუშავება. მიუხედავად იმისა, რომ ამ სხვადასხვა დისციპლინებში წარმოქმნილი სიგნალებისა და სისტემების ფიზიკური ბუნება შეიძლება მკვეთრად განსხვავდებოდეს, მათ ყველას ორი ძირითადი საერთო მახასიათებელი აქვთ. სიგნალები, რომლებიც ერთი ან მეტი დამოუკიდებელი ცვლადის ფუნქციებია, შეიცავს ინფორმაციას რაიმე ფენომენის ქცევის ან ბუნების შესახებ, ხოლო სისტემები რეაგირებენ კონკრეტულ სიგნალებზე სხვა სიგნალების წარმოქმნით ან სასურველი ქცევით. ძაბა და დენი, როგორც დროის ფუნქცია ელექტრულ წრედში, სიგნალების მაგალითებია, ხოლო წრე თავად სისტემის მაგალითია, რომელიც ამ შემთხვევაში რეაგირებს გამოყენებულ ძაბვაზე და დენზე. მაგალითად: როდესაც ავტომობილის მძღოლი ფეხს აჭერს ამაჩქარებლის პედალს, ავტომობილი რეაგირებს ავტომობილის სიჩქარის გაზრდით. ამ შემთხვევაში, სისტემა არის ავტომობილი, ამაჩქარებლის პედალზე ზეწოლა სისტემაში ინფორმაციის შეყვანა, ხოლო ავტომობილის სიჩქარე - პასუხი. ელექტროკარდიოგრამების ავტომატური დიაგნოსტიკის კომპიუტერული პროგრამა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც სისტემა, რომელსაც საწყის ინფორმაციად აქვს ციფრული ელექტროკარდიოგრამა და რომელიც გამოსავალ ინფორმაციად უზრუნველყოფ პარამეტრების შეფასებებს, როგორცაა გულისცემის სიხშირე. კამერა არის სისტემა, რომელიც იღებს სინათლეს სხვადასხვა წყაროდან და ასახულ ობიექტებიდან და ქმნის ფოტოსურათს. რობოტის მკლავი არის სისტემა, რომლის მოძრაობები საკონტროლო შეყვანების პასუხია.

სიგნალებისა და სისტემების ანალიზის პრობლემებში, არსებული სისტემების ანალიზის ნაცვლად, ჩვენი ინტერესი ორიენტირებულია სისტემების დაპროექტებაზე, რათა სიგნალები კონკრეტული გზებით დამუშავდეს. ერთი ძალიან გავრცელებული კონტექსტი, რომელშიც ასეთი პრობლემები წარმოიქმნება, არის სისტემების დაპროექტება, რათა გაუმჯობესდეს ან აღდგეს გარკვეული გზით დეგრადირებული სიგნალები. მაგალითად, როდესაც პილოტი ურთიერთობს საჰაერო მოძრაობის კონტროლის კოშკთან, კომუნიკაცია შეიძლება გაუარესდეს კაბინაში ფონური ხმაურის მაღალი დონით. ამ და ბევრ მსგავს შემთხვევაში, საჭიროა სისტემების დაპროექტება, რომლებიც სასურველ სიგნალს შეინარჩუნებენ, ამ შემთხვევაში პილოტის ხმას, და უარყოფენ (ყოველ შემთხვევაში, მიახლოებით) არასასურველ სიგნალს, ანუ ხმაურს. მზგავსი შემთხვევები ასევე გვხვდება გამოსახულების აღდგენისა და გამოსახულების გაუმჯობესების ზოგად სფეროში. მაგალითად, ღრმა კოსმოსური ზონებიდან ან დედამიწის სადამკვირვებლო თანამგზავრებიდან მიღებული სურათები, როგორც წესი, წარმოადგენს გადაღებული სცენების დეგრადირებულ ვერსიებს გადაღების აღჭურვილობის შეზღუდვების, ატმოსფერული ეფექტების და დედამიწაზე სურათების დაბრუნებისას სიგნალის გადაცემის შეცდომების გამო. შესაბამისად, კოსმოსიდან დაბრუნებული სურათები რეგულარულად მუშავდება სისტემებით, რათა კომპენსირდეს ამ დეგრადაციების ნაწილი.

სიგნალი: სიგნალი წარმოადგენს ინფორმაციისა ფიზიკურ ან მათემატიკურ წარმომადგენლობას რომელიც დამოკიდებულია ერთ ან რამდენიმე დამოუკიდებელ ცვლადზე, – ჩვეულებრივ, დროისა ან სივრცის მიხედვით. სიგნალი ფუნქციურად აღწერს რაიმე ფენომენის ცვლილებას და შეიძლება იყოს:

- დისკრეტული ან უწყვეტი, დროისა თუ სივრცის მიმართ;
- დეტერმინირებული ან სტოქასტიკური (შემთხვევითი ხასიათის);
- ანალოგური ან ციფრული, წარმოდგენის ფორმის მიხედვით.

მაგალითები:

- ელექტრული ძაბვა, როგორც დროის ფუნქცია;
- აუდიო სიგნალი — მიკროფონით ჩაწერილი ხმა;
- გამოსახულება — ორმაგი სივრცითი ცვლადის მქონე ფუნქცია;

- ტემპერატურის ცვლილება კონკრეტულ წერტილში დროში.

სიგნალი შეიძლება შეიცავდეს სასარგებლო ინფორმაციას, რომელიც ექვემდებარება ანალიზსა და დამუშავებას, რათა მისი შინაარსი, თვისებები ან გამომწვევი მიზეზები განისაზღვროს.

სისტემა. სისტემა განისაზღვრება, როგორც **მათემატიკური ან ფიზიკური მექანიზმი**, რომელიც მიღებულ სიგნალს სხვა სიგნალად გარდაქმნის. იგი შეიძლება იყოს ბუნებრივი, ტექნოლოგიური ან აბსტრაქტული და ახორციელებდეს ოპერაციებს, როგორცაა ფილტრაცია, გაძლიერება, შეფერხება ან კონვერსია.

სისტემის მაგალითები:

- ელექტრული წრე, რომელიც გარდაქმნის სიგნალს სხვადასხვა კომპონენტების გავლით;
- აუდიო გამაძლიერებელი, რომელიც ზრდის ხმის ამპლიტუდას;
- ციფრული ფილტრი, რომელიც შლის ხმაურს სიგნალიდან;
- კომპიუტერული ალგორითმი, რომელიც გარდაქმნის გამოსახულებას (მაგ., მკაფიოობაში);
- ადამიანის ყური და ტვინი, როგორც ბიოლოგიური სისტემა, რომელიც იდენტიფიცირებს ხმოვან ინფორმაციას.

აქვე განვიხილოთ როგორ გამოიყენება ეს კონცეფცია სხვადასხვა სფეროში:

სიგნალების დამუშავება და სისტემების ანალიზი წარმოადგენს ფართოდ გავრცელებულ ინსტრუმენტულ ჩარჩოს, რომელიც გამოიყენება ტექნიკისა და მეცნიერების მრავალ დარგში. ამ მეთოდების მთავარი მიზანია ინფორმაცია შეიგნოს, გარდაქმნას და გააუმჯობესოს სხვადასხვა ტიპის სიგნალებში. ქვემოთ წარმოდგენილია ძირითადი სფეროები, სადაც აღნიშნული მიდგომები კრიტიკულ როლს ასრულებს:

1. კომუნიკაციათა ტექნოლოგიები

სიგნალის დამუშავება გამოიყენება:

- ინფორმაციის საიმედო გადაცემისა და მიღების უზრუნველსაყოფად;
- ციფრული მოდულაციის, დემოდულაციის, კოდირების და დეკოდირების პროცესებში;

- ხმისა და გამოსახულების კომპრესიისა და აღდგენის სისტემებში;
- ინტერნეტისა და მობილური კავშირის სტანდარტების (მაგ., 5G)

რეალიზებაში;

- გადაცემისას წარმოქმნილი ხმაურის, დაბრკოლებებისა და დამახინჯებების ეფექტურად ჩახშობისთვის.

2. საავიაციო და კოსმოსური სისტემები

სიგნალთა ანალიზი კრიტიკულია:

- თვითმფრინავებისა და დრონების მართვის სისტემებისთვის, სადაც საჭიროა სენსორებიდან მიღებული ინფორმაციის დამუშავება რეალურ დროში;
- ინერციული და GPS ნავიგაციის ინტეგრაციისთვის;
- კოსმოსური ხომალდების მდგომარეობის კონტროლის, სტაბილიზაციისა და წყვეტის გარეშე საკომუნიკაციო არხის შენარჩუნებისთვის.

3. ელექტრული და ელექტრონული წრედების ინჟინერია

სიგნალების თეორია გამოიყენება:

- ანალოგური და ციფრული წრედების მოდელირებისთვის და ანალიზისთვის;
- ფილტრების პროექტირებისთვის, რომლებიც გამოყოფენ სასურველ სიხშირეებს;
- ჩასატარებელი ოპერაციების შეფასებისა და ოპტიმიზაციის მიზნით ელექტრული კომპონენტების დონეზე;
- წრედის პარამეტრების კორექტულობისა და ფიზიკური თანხვედრის შეფასებისთვის (მაგ., S-პარამეტრების კაუზალობა და პასიურობა).

4. ბიოსამედიცინო ინჟინერია

სიგნალთა დამუშავების ტექნოლოგიები გამოიყენება:

- ბიოსიგნალების, როგორცაა ECG (ელექტროკარდიოგრამა), EEG (ელექტროენცეფალოგრამა) და EMG (ელექტრომიოგრამა), ანალიზისთვის;
- სამედიცინო გამოსახულების გაუმჯობესებისა და აღდგენის ტექნიკებში (მაგ., MRI, CT, ულტრაბგერა);
- პაციენტის ჯანმრთელობის რეალურ დროში მონიტორინგის სისტემებში;

- ავტომატიზირებული დიაგნოსტიკის ალგორითმების შექმნაში.

5. სისტემების ანალიზი. ამ ეტაპზე ყურადღება გამახვილებულია უკვე არსებული სისტემის ქცევის შეფასებაზე:

- ითვლება სისტემის რეაქცია სხვადასხვა ტიპის სიგნალებზე;
- ტესტირდება სისტემის სტაბილურობა, პასიურობა, კაუზალობა;
- გამოიყენება მოდელირების, სიმულაციისა და ექსპერიმენტული ვერიფიკაციის მეთოდები;
- გულისხმობს არსებული მოდელის სიზუსტის შემოწმებას რეალურ პირობებთან მიმართებაში.

6. სისტემის დაპროექტება. მიზნად ისახავს ისეთი სისტემის შექმნას, რომელიც ეფექტურად მართავს ან გარდაქმნის კონკრეტულ სიგნალს:

- ქმნია ფილტრებს კონკრეტული სიხშირის კომპონენტების გამოსაკლებად ან გასაძლიერებლად;
- ფორმირდება დამამუშავებელი სტრუქტურა, რომელიც მინიმუმამდე ამცირებს ხმაურს ან მაქსიმალურად ინარჩუნებს სასარგებლო ინფორმაციას;
- ხშირად გამოიყენება საინჟინრო CAD (Computer-Aided Design) სისტემებში, DSP პროცესორებში, MATLAB-ის ან Python-ის პლატფორმებზე.

მარტივად რომ ვთქვათ, სიგნალები არის ინფორმაცია, ხოლო სისტემები არის ის, რაც ამ ინფორმაციას ამუშავებს. ამ კონცეფციის ცოდნა მნიშვნელოვანია მრავალი ტექნიკური და სამეცნიერო პრობლემის გადასაჭრელად.

სისტემის გაუმჯობესებისა და აღდგენის გარდა, ხშირ შემთხვევაში სჭირია მისი დაპროექტება რომ შესაძლებელი იყოს სიგნალებიდან კონკრეტული ინფორმაციის მიღება. ამ დროს, აქცენტი შეიძლება იყოს კონკრეტული თვისებების მქონე სიგნალების დიზაინზე. კონკრეტულად, საკომუნიკაციო სისტემებში დიდი ყურადღება ექცევა სიგნალების დაპროექტებას წარმატებულ გადაცემას შეზღუდვებისა და მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად. მაგალითად, ატმოსფეროში დიდ მანძილზე კომუნიკაცია მოითხოვს ელექტრომაგნიტური სპექტრის კონკრეტულ ნაწილში გარკვეული სიხშირის მქონე სიგნალების გამოყენებას. საკომუნიკაციო სიგნალების დაპროექტება, როგორც ატმოსფეროში გადაცემის გამო დამახინჯების,

ასევე სხვა მომხმარებლების მიერ ერთდროულად გადაცემული სხვა სიგნალების ჩარევის არსებობისას, საიმედო მიღების საჭიროებას უნდა ითვალისწინებდეს.

კიდევ ერთი ძალიან მნიშვნელოვანი კლასი აპლიკაციებისა, რომლებშიც სიგნალებისა და სისტემების ანალიზის ცნებები და მეთოდები გვხვდება, არის ის შემთხვევები, როდესაც ჩვენ გვსურს შევცვალოთ ან ვაკონტროლოთ მოცემული სისტემის მახასიათებლები, შესაძლოა კონკრეტული შემავალი სიგნალების არჩევით ან სისტემის სხვა სისტემებთან კომბინაციით. მნიშვნელოვან როლს თამაშობს კონცეფცია, რომელიც ცნობილია როგორც უკუკავშირი, რადგან გაზომილი სიგნალები ბრუნდება და გამოიყენება სისტემის რეაგირების მახასიათებლების დასარეგულირებლად.

ზემოთ მხოლოდ რამდენიმე ავლნიშნეთ სიგნალებისა და სისტემების ცნებების გამოყენების საოცრად ფართო სპექტრიდან. ამ ცნებების მნიშვნელობა გამომდინარეობს არა მხოლოდ იმ ფენომენებისა და პროცესების მრავალფეროვნებიდან, რომლებშიც ისინი გვხვდება, არამედ იდეების, ანალიტიკური მეთოდების და მეთოდოლოგიების ერთობლიობიდან, რომლებიც შეიქმნა და გამოიყენება სიგნალებთან და სისტემებთან დაკავშირებული პრობლემების გადასაჭრელად. ამ ნაშრომში ჩვენ ძირითადად ამ იდეებიდან განვიხილავთ და გამოვიყენებთ ფურიეს ანალიზის ინსტრუმენტებს, რომლებიც ქმნიან სიგნალებისა და სისტემების სიხშირის დომენის ანალიზის საფუძველს (OPPENHEIM and WILLSKYALAN 2023, 38-55).

სიგნალის დამუშავება: ხდება სიგნალის გაუმჯობესება, აღდგენა ან ინფორმაციის მიღება. მაგალითად, სურათის გაწმენდა, ხმაურის ჩახშობა, ეკონომიკური მონაცემების ანალიზი.

• **სიგნალის დაპროექტება:** სიგნალის შექმნა კონკრეტული თვისებებით, რაც მნიშვნელოვანია, მაგალითად, კომუნიკაციისთვის.

• **სისტემის მართვა და კონტროლი:** სისტემის მახასიათებლების შეცვლა ან კონტროლი, ხშირად უკუკავშირის გამოყენებით.

ძირითადი იდეები, როგორცაა ფურიეს ანალიზი, ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა სფეროში. ფურიეს ანალიზი საშუალებას იძლევა, სიგნალი

წარმოვადგინოთ, როგორც სხვადასხვა სიხშირის სინუსოიდების ჯამი, რაც მნიშვნელოვანია სიგნალის თვისებების შესასწავლად და დასამუშავებლად.

ზოგიერთი სიგნალები დროში უწყვეტად იცვლება, ზოგ შემთხვევაში კი მათი ევოლუცია აღწერილია მხოლოდ დროის დისკრეტულ წერტილებში. მაგალითად, ელექტრული სქემების და მექანიკური სისტემების ანალიზისას ჩვენ გვინტერესებს სიგნალები, რომლებიც უწყვეტად იცვლება. არსებობს სიგნალი, რომელიც დროის დისკრეტულ წერტილებში ვითარდება მაშასადამე, უწყვეტი ცვლადის ფუნქციის სახით მრუდის ნაცვლად, რომელიც დაკავშირებულია დროის დისკრეტულ მომენტებთან, როდესაც ის არის მითითებული. სიგნალების და ამ სიგნალებზე რეაგირების ან მათი დამუშავების სისტემების ევოლუციის ძირითად აღწერაში ეს განსხვავება ბუნებრივად მიგვიყვანს სიგნალებისა და სისტემების ანალიზის ორ პარალელურ ჩარჩომდე, ერთი ფენომენებისა და პროცესებისთვის, რომლებიც აღწერილია უწყვეტ დროში, და მეორე მათთვის, რომლებიც აღწერილია დისკრეტულ დროში.

როგორც უწყვეტი დროის სიგნალებთან და სისტემებთან, ასევე დისკრეტული დროის სიგნალებთან და სისტემებთან დაკავშირებულ კონცეფციებსა და ტექნიკას აქვს მდიდარი ისტორია და კონცეპტუალურად მჭიდროდ არის დაკავშირებული. ისტორიულად, თუმცა, რადგან მათი გამოყენება წარსულში საკმარისად განსხვავებული იყო, ისინი ძირითადად ცალ-ცალკე იქნა შესწავლილი და განვითარებული. უწყვეტი დროის სიგნალებსა და სისტემებს ძალიან ძლიერი ფესვები აქვთ ფიზიკასთან დაკავშირებულ პრობლემებში და, უფრო ახლო წარსულში, ელექტრულ წრედებსა და კომუნიკაციებთან.

დისკრეტული დროის სიგნალებისა და სისტემების ტექნიკას ძლიერი ფესვები აქვს რიცხვით ანალიზში, სტატისტიკასა და დროის სერიების ანალიზში, რომლებიც დაკავშირებულია ისეთ გამოყენებასთან, როგორცაა ეკონომიკური და დემოგრაფიული მონაცემების ანალიზი. თუმცა, ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში, უწყვეტი და დისკრეტული დროის სიგნალებისა და სისტემების დისციპლინები სულ უფრო მეტად გადახლართული გახდა და გამოყენება მჭიდროდ ურთიერთდაკავშირებული გახდა. ამის მთავარი იმპულსი მომდინარეობს სისტემების

დანერგვისა და სიგნალების გენერირების ტექნოლოგიის მიღწევებიდან. კერძოდ, მაღალსიჩქარიანი ციფრული კომპიუტერების, ინტეგრირებული სქემების და მაღალი სიმკვრივის დახვეწილი მოწყობილობების დამზადების ტექნიკის უწყვეტმა განვითარებამ სულ უფრო ხელსაყრელი გახადა უწყვეტი დროის სიგნალების დამუშავების განხილვა მათი დროის ნიმუშებით წარმოდგენით (ანუ მათი დისკრეტულ დროის სიგნალებად გადაქცევით). ერთ-ერთი მაგალითის სახით, თანამედროვე, მაღალი ხარისხის თვითმფრინავის კომპიუტერული მართვის სისტემა ახდენს სენსორების მიერ მიღებულ სიგნალების, ციფრულ ფორმატში გადამუშავებას, რათა წარმოქმნას შერჩევითი გაზომვების თანმიმდევრობა, რომელსაც შემდეგ მართვის სისტემა ამუშავებს.

როგორც აქამდე აღვწერეთ, სიგნალებისა და სისტემების ცნებები ძალიან ზოგადი ცნებებია. ამ დონის ზოგადობაში, თუმცა, მხოლოდ ყველაზე ფართო განცხადებების გაკეთებაა შესაძლებელი სიგნალების და სისტემების ბუნების შესახებ და მათი თვისებების განხილვა შესაძლებელია მხოლოდ ყველაზე ელემენტარულ ტერმინებში. მეორე მხრივ, მნიშვნელოვანი და ფუნდამენტური ცნება სიგნალებთან და სისტემებთან მუშაობისას არის ის, რომ თითოეულიდან კონკრეტული თვისებების მქონე ქვეკლასების ყურადღებით აირჩეს, რომლებიც შემდეგ შეიძლება სიგნალებისა და სისტემების ღრმად გასაანალიზებლად და დასახასიათებლად იქნას გამოყენებული.

რამდენადაც სიგნალებსა და სისტემებს გამოყენების ძალიან ფართო სფეროები აქვთ ამიტომ მათი ანალიზი მუდმივად ვითარდება და ვითარდება ახალ პრობლემებზე, მეთოდებზე და შესაძლებლობებზე საპასუხოდ. ვიმედოვნებთ, რომ ეს განვითარება აჩქარდება, რადგან გაუმჯობესებული ტექნოლოგია სულ უფრო რთული სისტემების და სიგნალების დამუშავების ტექნიკის განხორციელებას ხდის შესაძლებელს.

უწყვეტი და დისკრეტული დროის სისტემები. ფიზიკური სისტემები ფართო გაგებით წარმოადგენს კომპონენტების, მოწყობილობების ან ქვესისტემების ურთიერთკავშირს. სიგნალების დამუშავებიდან და კომუნიკაციებიდან დაწყებული ელექტრომექანიკური ძრავებით, ავტომობილებით და ქიმიური გადამამუშავებელი ქარხნებით დამთავრებული, სისტემა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც პროცესი,

რომელშიც შემავალი სიგნალები გარდაიქმნება სისტემის მიერ ან იწვევს სისტემის გარკვეულ რეაგირებას, რის შედეგადაც წარმოიქმნება სხვა სიგნალები, როგორც გამომავალი. მაგალითად, მაღალი ხარისხის აუდიო სისტემა იღებს ჩაწერილ აუდიო სიგნალს და ქმნის ამ სიგნალის რეპროდუქციას (OPPENHEIM და WILLSKYALAN 2023, 200-230).

უწყვეტი დროის სისტემა (Continuous-Time System):

უწყვეტი დროის სისტემა წარმოადგენს ისეთ სისტემას, რომლის შესავალი და გამოსავალი სიგნალები განსაზღვრულია დროის უწყვეტი ცვლადის ყველა მნიშვნელობაზე. ანუ, სიგნალი შეიძლება ნებისმიერ მომენტში მიიღოს კონკრეტული მნიშვნელობა, დროის განსაზღვრულ ინტერვალში. მაგალითად:

- ელექტრული წრედში ძაბვის ან დენის ცვლილება დროის ფუნქციად ($v(t)$, $i(t)$);
- გულის ელექტროფიზიოლოგიური აქტივობა (ელექტროკარდიოგრამა უწყვეტ რეჟიმში);
- ხმის ტალღების გავრცელება ჰაერში, როგორც აკუსტიკური სიგნალი.

დისკრეტული დროის სისტემა (Discrete-Time System):

დისკრეტული დროის სისტემა არის ისეთი სისტემა, რომლის შესავალი და გამოსავალი სიგნალები აღწერილია მხოლოდ დროის დისკრეტულ მომენტებში. ამ შემთხვევაში, სიგნალი წარმოდგენილია როგორც რიცხვითი თანმიმდევრობა, რომელიც ასახავს გარკვეული უწყვეტი პროცესის ნიმუშებს (samples). მაგალითად:

- ყოველდღიური ტემპერატურის გაზომვები, რომლებიც აღირიცხება მხოლოდ დღეში ერთხელ ($T[n]$);
- ციფრული სურათი, რომელიც წარმოადგენს დისკრეტულ წერტილთა მატრიცას (პიქსელები);
- აუდიო სიგნალის ციფრული ჩანაწერი, რომელიც მიიღება ნიმუშების აღებით გარკვეული სიხშირით (მაგალითად, 44.1 kHz CD ფორმატში).

სისტემის ძირითადი თვისებები სიგნალებისა და სისტემების ანალიზში მნიშვნელოვანია სისტემების ისეთი ზოგადი თვისებების განსაზღვრა, რომლებიც გამოიყენება მათი ქცევის მოდელირებისა და შეფასებისთვის. აღნიშნული თვისებები

საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ სხვადასხვა ფიზიკური, ტექნოლოგიური და მათემატიკური პროცესების შედარება ერთიანი ენით.

მეხსიერების მქონე და მეხსიერების გარეშე სისტემები

- მეხსიერების გარეშე სისტემა (Memoryless System):

ასეთ სისტემაში ნებისმიერ მომენტში გამოსავალი დამოკიდებულია მხოლოდ იმავე მომენტის შესავალზე და არა წარსულ ან მომავალ მნიშვნელობებზე. მაგალითად, რეზისტორი, რომლის შემთხვევაში $y(t) = R \cdot x(t)$.

მეხსიერების გარეშე სისტემები მარტივი ანალიზის ობიექტებია, რადგან მათში არ არსებობს დაგროვილი ისტორიული ეფექტები.

- მეხსიერების მქონე სისტემა (System with Memory):

ასეთ სისტემაში გამოსავალი დამოკიდებულია შესავალ სიგნალის წარსულ მნიშვნელობებზე. მაგალითია **აკუმულატორი**, სადაც:

$$y[n] = \sum x[k]$$

ამ შემთხვევაში სისტემა "იმახსოვრებს" წარსულ მონაცემებს და აყალიბებს გამოსავალს დაგროვებული ინფორმაციის საფუძველზე.

ინვერტირებადობა და ინვერსული სისტემები

სისტემა -ინვერტირებადია, თუ განსხვავებული შესავალი სიგნალები ყოველთვის იწვევს განსხვავებულ გამოსავალს. ასეთ შემთხვევაში არსებობს - ინვერსული სისტემა, რომელიც თავდაპირველ შესავალს აღადგენს.

$$y(t) = 2x(t) \rightarrow w(t) = 1/2 y(t)$$

აქ $w(t)$ წარმოადგენს ინვერსულ სისტემას, რომელიც აღადგენს შესავალს.

ინვერტირებადობა მნიშვნელოვანია კომუნიკაციებში, შიფრაციასა და სიგნალების აღდგენის ამოცანებში.

სისტემა -წრფივია, თუ მასში მოქმედებს სუპერპოზიციის პრინციპი:

- დამატებითობა:

თუ $x_1(t) \rightarrow y_1(t)$ და $x_2(t) \rightarrow y_2(t)$, მაშინ

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$$

- ჰომოგენურობა (მასშტაბირება):*

თუ $x(t) \rightarrow y(t)$, მაშინ

$$a \cdot x(t) \rightarrow a \cdot y(t), \text{ სადაც } a \in \mathbb{C}$$

წრფივი სისტემები ანალიზისათვის განსაკუთრებულად ხელსაყრელია, რადგან მათზე შეიძლება Fourier-ისა და Laplace-ის გარდაქმნების გამოყენება.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი.

რადგან - წრფივი, დროითი ინვარიანტული სისტემები ხასიათდებიან ორი მნიშვნელოვანი თვისებით:

1. **წრფივობა:** თუ თქვენ სისტემას მიაწვდით რამდენიმე სიგნალის ჯამს, გამომავალი იქნება თითოეული სიგნალის ინდივიდუალური რეაქციის ჯამი.

2. **დროითი ინვარიანტულობა:** თუ თქვენ შეყვანილ სიგნალს გადაადგილებთ დროში, გამომავალი სიგნალიც იგივენაირად გადაადგილდება დროში (OPPENHEIM and WILLSKYALAN 2023, 74-137).

ამ ორი თვისების წყალობით, თუ ჩვენ ვიცით, როგორ რეაგირებს სისტემა ერთეულ იმპულსზე (ამას ერთეული იმპულსური რეაქცია ჰქვია), მაშინ ჩვენ შეგვიძლია გამოვიყენოთ ზემოთ აღწერილი წარმოდგენა და გამოვთვალოთ სისტემის რეაქცია ნებისმიერ სხვა შემავალ სიგნალზე.

კონვოლუცია არის მათემატიკური ოპერაცია, რომელიც ორ ფუნქციას აერთიანებს მესამე ფუნქციაში. ეს ოპერაცია ხშირად გამოიყენება სიგნალების დამუშავებაში, სურათების ანალიზში, მანქანურ სწავლებაში, ფიზიკაში და სხვა მრავალ სფეროში. კონვოლუცია საშუალებას იძლევა, ერთი ფუნქციის საშუალებით შევცვალოთ ან "გადავატაროთ" მეორე ფუნქცია და მივიღოთ ახალი შედეგი. ფიზიკაში, კონვოლუცია გამოიყენება ისეთ პროცესებში, როგორებიცაა სისტემის რეაქციის გამოთვლა, იმპულსური რეაქციის გამოყენებით. თუ სისტემის იმპულსური რეაქცია ცნობილია, კონვოლუციის საშუალებით შეიძლება მისი პასუხის განსაზღვრა ნებისმიერი შეყვანილი სიგნალისთვის. ინჟინერიაში — აუდიოს დამუშავება, გამოსახულების ფილტრაცია, რადარის სიგნალების ანალიზი და კიდევ მრავალი სხვა.

ეს ზუსტად არის ის, რასაც კონვოლუციის ჯამი აკეთებს. ის "აერთიანებს" ერთეულ იმპულსურ რეაქციას და შემავალ სიგნალს, რათა მიიღოს გამომავალი სიგნალი. კონვოლუციის ჯამი არის მათემატიკური ფორმულა, რომელიც აღწერს, თუ როგორ ხდება ეს "აწყობა".

მარტივად რომ ვთქვათ: კონვოლუციის ჯამი არის "რეცეპტი", რომელიც გვეუბნება, თუ როგორ "ავურიოთ" ერთეული იმპულსური რეაქცია და შემავალი სიგნალი, რათა მივიღოთ გამომავალი სიგნალი. მოკლედ:

- ნებისმიერი დისკრეტული სიგნალი შეიძლება წარმოდგინდეს, როგორც გადაადგილებული იმპულსების ჯამი.
- წრფივი სისტემის რეაქცია ნებისმიერ სიგნალზე არის რეაქციების ჯამი ცალკეულ იმპულსებზე.
- დროით ინვარიანტული სისტემისთვის, რეაქცია გადაადგილებულ იმპულსზე არის ძირითადი რეაქციის (ერთეული იმპულსური რეაქციის) გადაადგილებული ვერსია.
- კონვოლუციის ჯამი გვადლევს საშუალებას, გამოვთვალოთ წრფივი, დროითი ინვარიანტული სისტემის (წდს) გამომავალი, თუ ვიცით მისი ერთეული იმპულსური რეაქცია და შეყვანის სიგნალი.

კონვოლუციის ჯამი არის ძალიან მნიშვნელოვანი კონცეფცია სიგნალების და სისტემების შესწავლისას. ის საშუალებას გვადლევს დავახასიათოთ და გავანალიზოთ წდს სისტემები და გამოვიყენოთ ისინი პრაქტიკულად (OPPENHEIM and WILLSKYALAN 2023, 77-90).

1.2 სიგნალის ციფრული დამუშავების ძირითადი მექანიზმები

როდესაც სიგნალი მიეწოდება ქსელის შესასვლელს მოხდება ზუსტად იგივე რაც ობიექტივის შემთხვევაში, სიგნალის ნაწილი გავრცელდება ქსელში, ნაწილი შთაინთქმება და გარდაიქმნება სითბურ ენერგიაში, ნაწილი აირეკლება და გაიბნება უკან შემავალ პორტისკენ. ჩვენ გვინტერესებს რა ხდება ორ პორტიან ქსელში, რა იწვევს სიგნალის გაბნევას. უნდა ავლნიშნოთ, რომ „სიგნალი“ წარმოადგენს ელექტრომაგნიტურ ტალღას რომელიც ვრცელდება ქსელში.

პასუხი გვაქვს მათემატიკურ კონსტრუქციაში, რომელსაც ეწოდება გაბნევის მატრიცა (ანუ S - მატრიცა), რომელიც რაოდენობრივად განსაზღვრავს როგორ ვრცელდება ენერგია მრავალპორტიან ქსელში. S - მატრიცა საშუალებას იძლევა ზუსტად აღვწეროთ წარმოუდგენლად რთული ქსელის მახასიათებლები, როგორც

უბრალოდ „შავი ყუთი“. S - მატრიცა N პორტიანი ქსელისთვის შეიცავს N^2 რაოდენობის კოეფიციენტს (S - პარამეტრებს), რომელთაგან თითოეული წარმოადგენს შეტანა-გამოტანის შესაძლო გზას. „მრავალპორტიანი ქსელის“ ქვეშ შეიძლება იგულისხმებოდეს სადენი ანუ მიკროზოლიანი ხაზი.

S - პარამეტრები - აღწერს ქსელის ელექტრული ქცევას „სიხშირული არეში“ . ისინი არიან კომპლექსური რიცხვები და გამოისახებიან როგორც ამპლიტუდით ასევე ფაზით. ეს დაკავშირებულია ქსელში შემავლი სიგნალის ცვლილებასთან დანაკარგების გამო, არეკვლის და გავრცელების დროს იცვლება ამპლიტუდაც და ფაზაც. ამპლიტუდის ზრდაც და შემცირებაც ორივე ერთნაირად მნიშვნელოვანია ქსელის ანალიზისთვის, მაგრამ ფაზური ინფორმაცია ძალიან საჭიროა და არ შეიძლება მისი იგნორირება. S - პარამეტრები იცვლება სიხშირის ცვლილებასთან ერთად ნებისმიერი რეალური ქსელისთვის.

ძირითადი შინაარსით, S - პარამეტრები წარმოადგენს გამომავალი ძაბვის შეფარდებას შემავალ ძაბვასთან. S - პარამეტრები შედის მატრიცაში, რომლის სვეტების და სტრიქონების რიცხვი ტოლია პორტების რაოდენობის. S პარამეტრების ინდექსისთვის „ ij “, j - არის შემავალი პორტი, ხოლო i - გამომავალი, ამრიგად S_{11} დამოკიდებულია სიხშირეზე და ეკუთვნის იმ სიგნალს რომელიც გამოდის პირველი გამომავალი პორტიდან პირველ შემავალ პორტზე სიგნალის მიწოდების დროს. S პარამეტრებს S მატრიცის დიაგონალზე ეწოდებათ არეკვლის კოეფიციენტები, რამდენადაც ისინი ასახავენ მხოლოდ იმას რაც ხდება მხოლოდ ერთ პორტზე, როცა არადიაგონალურ S პარამეტრებს ეწოდებათ გადაცემის კოეფიციენტები, რამდენადაც ისინი ასახავენ იმას თუ რა ხდება ერთი პორტიდან მეორეში. ნახ. 1-ზე მოცემული ორი პორტიანი ქსელი სადაც a_1 არის შემავალ პორტზე მოქმედი იმპულსი, a_2 არის გამომავალი პორტიდან არეკლილი იმპულსი, b_2 გამომავალ პორტზე მიღებული იმპულსი და b_1 - შემავალი იმპულსიდან არეკლილი იმპულსი, ამათგან შესაბამისად გამოითვლება S - პარამეტრები და შედგება S - მატრიცა (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019).



ნახ. 1. 2 პორტიანი ქსელში შემავალი და გამომავალი იმპულსები.

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2$$

(1.1) მოცემული განტოლებები ასახავს დამოკიდებულებას ქსელის ყოველ პორტზე არეკლილ და მიწოდებულ იმპულსების სიმძლავრეებს შორის, ქსელის ინდივიდუალური S - პარამეტრების თვალსაზრისით

S_{11} - შეტანის პორტის ძაბვის არეკვლის კოეფიციენტი $S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$:

S_{12} - საპირისპირო ძაბვის გაძლიერების კოეფიციენტი $S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$:

S_{21} - პირდაპირი ძაბვის გაზნვის კოეფიციენტი, გადაცემის ფუნქცია $S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$:

S_{22} - გამომავალი ძაბვის არეკვლის კოეფიციენტი $S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$:

როგორ იზომება ქსელის პარამეტრები: ქსელის პარამეტრების გაზომვა ხდება დროით და სიხშირულ არეში. დროით არეში გაზომვისას (TDR- Time Domain Reflectometry) მოწყობილობაში (DUT- Device Under Test) იგზავნება სწრაფად მზარდი ბიჯის სიგნალი, და იზომება არეკლილი სიგნალი. სიგნალი რომელიც მიეწოდება სატესტო მოწყობილობას შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც სინუსოიდებისაგან შემდგარი ტალღა, რომელთაგან თითოეულს აქვს სხვადასხვა სიხშირე, ამპლიტუდა და ფაზა. სინუსოიდური ტალღის ყოველი კომპონენტი დამოუკიდებლად მოქმედებს,

სინუსოიდური ტალღის არეკვლისას მოწყობილობიდან ამპლიტუდა და ფაზა შეიძლება შეიცვალოს სხვა სიდიდით ყოველი სიხშირისთვის.

ანალოგიურად, გადაცემული სიგნალის ყველა სიხშირულ მდგენელს ექნება სხვადასხვა ამპლიტუდა და ფაზა. საინფორმაციო თვალსაზრისით არანაირი განსხვავება არ არის წარმოდგენილი დროით დომენსა და სიხშირულ დომენს შორის. ფურიეს გარდაქმნის მეთოდის გამოყენების პასუხი დროით არეში იქნება მათემატიკური გარდაქმნა სიხშირულ არის საპასუხოდ და პირიქით რაიმე ინფორმაციის ყოველგვარი ცვლილებების ან რაიმე დანაკარგების გარეშე. ორივე ეს მეთოდი ერთი და იგივე სიგნალს ასახავს და ისინი ხაზს უსვამენ მხარეს (სიხშირული და დროითი დომენი). დასმული კითხვის შინაარსის მიხედვით პასუხი შეიძლება ერთი არიდან უფრო სწრაფად მივიღოთ ვიდრე მეორედან. თუ კითხვა მთლიანი ხაზის იმპედანსის ეხება, მაშინ დროით არეში ასახული ინფორმაცია ურო სწრაფად გვიპასუხებს, ხოლო თუ გატარების ზოლის უნარზეა ლაპარაკი მაშინ სიხშირული არე უფრო მალე გვიპასუხებს (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019).

სიგნალების ციფრული დამუშავებისას ძირითადად ერთ და იგივე ოპერაციები გამოიყენება: კონვოლუცია, კორელაცია, ფილტრაცია, გარდაქმნა და მოდულაცია.

უნდა აღინიშნოს, რომ სიგნალების ციფრული დამუშავებისას ამ ძირითადი ოპერაციების გამოყენებას სჭირდება მხოლოდ მარტივი არითმეტიკული მოქმედებები – გამრავლება, შეკრება, გამოკლება და ძვრის ოპერატორი. მოკლედ განვიხილოთ ეს ოპერაციები (ყუბანიეშვილი 2013).

კონვოლუცია. სიგნალების ციფრული დამუშავებისას კონვოლუცია ყველაზე უფრო გამოყენებად ოპერაციაა. კონვოლუცია წარმოადგენს ციფრული ფილტრაციის ძირითად ოპერაციას და ის არის პროცესი როდესაც ხდება ორი N_1 და N_2 სიგრძის $x(n)$ და $h(n)$ მიმდევრობიდან ახალი თანმიმდევრობის მიღება. კონვოლუცია განისაზღვრება როგორც

$$Y(n)=h(n) \otimes x(n)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} h(n)x(n-k) = \sum_{k=0}^{\infty} h(n)x(n-k), n=0,1,2,3,\dots N-1 \quad (1.2)$$

(ყუბანიეშვილი 2013, 8)

სადაც,

\otimes სიმბოლო გამოიყენება კონვოლუციას აღნიშვნისათვის, $N=N_1+N_2-1$

$x(n)$ წარმოადგენს შემავალ სიგნალს,
 $h(n)$ – სისტემის იმპულსურ რეაქციას,
ხოლო $y(n)$ – გამომავალ სიგნალს.

კონვოლუცია გამოხატავს სისტემის პასუხს ნებისმიერ შემავალ სიგნალზე, აღრიცხავს დროსა და სიგნალის ფორმას, რაც არის საფუძველი წრფივი დროით ინვარიანტური (LTI) სისტემების ანალიზისა.

ტექნიკური და ფიზიკური მნიშვნელობა მდგომარეობს იმაში, რომ კონვოლუციის საშუალებას აძლევს წინასწარ განსაზღვროს სიგნალის ფორმის ცვლილება სისტემაში, რაც აუცილებელია სიგნალის დამუშავებაში, სიგნალის მთლიანობის ანალიზისა და ელექტრონულ წრედებში სიმულაციების დროს

კორელაცია. კორელაციური ანალიზი სიგნალების თეორიაში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს, განსაკუთრებით სპექტრული ანალიზის პროცესებთან ერთად. აღნიშნულ მიდგომაში განიხილება კორელაციის ორი ძირითადი ტიპი: ავტოკორელაცია და ურთიერთკორელაცია. ურთიერთკორელაციური ფუნქცია გამოიყენება ორ სხვადასხვა სიგნალს შორის სტრუქტურული მსგავსებისა და თანხვედრილი მახასიათებლების განსასაზღვრად, რაც მათი ერთობლივი დინამიკის შეფასების საშუალებას იძლევა.

ავტოკორელაცია კი წარმოადგენს განსაკუთრებულ შემთხვევას, როდესაც ანალიზი მხოლოდ ერთ სიგნალზე ხორციელდება. ის ასახავს სიგნალის თვითშედარებას სხვადასხვა დროით წანაცვლებაზე და ამ გზით იძლევა დეტალურ ინფორმაციას სიგნალის შიდა სტრუქტურისა და დროითი ქცევის შესახებ.

კორელაციური ფუნქციები ფართოდ გამოიყენება ისეთი ამოცანების გადასაჭრელად, როგორცაა: სპექტრული მახასიათებლების შეფასება, სიგნალის ამოღება მაღალი ხმაურის პირობებში, დამალული პერიოდულობის იდენტიფიკაცია და გამოყენების სხვა სფეროები, რაც მათ აუცილებელ კომპონენტად აქცევს თანამედროვე სიგნალის დამუშავების ტექნიკებში.

ციფრული ფილტრები. ციფრული სიგნალის დამუშავების ერთ-ერთი ფუნდამენტური ოპერაციაა **წრფივი ციფრული ფილტრაცია** (*Digital Linear Filtering*), რომელიც უზრუნველყოფს შემავალი სიგნალის მოდიფიცირებას წინასწარ

განსაზღვრული ფილტრის მახასიათებლების შესაბამისად. ეს პროცესი აღწერილია შემდეგი მათემატიკური გამოსახულებით:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \cdot x(n - k) \quad (1.3)$$

სადაც:

- $x(n)$ — ფილტრის შემავალი სიგნალია,
- $y(n)$ — გამავალი (გაფილტრული) სიგნალი,
- $h(k)$ — ფილტრის იმპულსური რეაქციის კოეფიციენტებია,
- N — ფილტრის სიგრძე ანუ იმპულსური რეაქციის ხანგრძლივობა.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ზემოაღნიშნული გამოსახულება წარმოადგენს დროში კონვოლუციას (convolution) ოპერაციას, რომლის ფარგლებშიც ფილტრი შემავალი სიგნალის წონად შეფასებას ახდენს თითოეული წარსული მნიშვნელობისთვის — იმპულსური რეაქციის ფუნქციის შესაბამისად.

აღნიშნული ოპერაციის ძირითადი დანიშნულებაა:

- ხმაურის ამოშლა ან შემცირება სასარგებლო სიგნალისგან,
- სპექტრული შინაარსის კონტროლი,
- სიხშირეზე დაფუძნებული სიგნალის ფორმირება,
- კონკრეტული სიხშირის კომპონენტების ჩახშობა ან გაძლიერება.

ფილტრაცია ხშირად გამოიყენება პრაქტიკაში ისეთ სიტუაციებში, როგორცაა:

- საკომუნიკაციო სისტემებში მონაცემთა აღდგენა,
- აუდიო და ვიდეო სიგნალების დამუშავება,
- სენსორული მონაცემების ფილტრაცია ინდუსტრიულ სისტემებში.

ამრიგად, წრფივი ციფრული ფილტრაცია წარმოადგენს მნიშვნელოვან ბირთვულ ოპერაციას ციფრული სიგნალის დამუშავების სისტემებში, რაც ქმნის ტექნიკურ საფუძველს მრავალი საინჟინრო სფეროსთვის.

რაც შეეხება გარდაქმნას სიგნალების დამუშავებაში გამოიყენება დისკრეტული გარდაქმნები: ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა რომელსაც სიგნალი გადაჰყავს დროითი არიდან სიხშირულ არეში და ფურიეს უკუ გარდაქმნა რომელსაც სიგნალი სიხშირული არიდან დროით არეში გადაჰყავს. აგრეთვე არსებობს Z გარდაქმნა რომელიც უფრო ხშირად ციფრული ფილტრების ალგორითმებში გამოიყენება.

მოდულაცია. საინჟინრო და საკომუნიკაციო სისტემებში ციფრული სიგნალის გადაცემა ხშირად საჭიროებს შორ მანძილზე მონაცემთა სიზუსტითა და ეფექტიანობით ტრანსპორტირებას. ამ პროცესისთვის კრიტიკულია სიგნალის ისეთი სახით მოდულირება, რომ მისი **სიხშირული მახასიათებლები ჰარმონიულად თანხვდებოდეს გადაცემის ან შენახვის არხის მახასიათებლებს.** მოდულაციის მიზანია საწყისი სიგნალის გარდაქმნა გადამზიდ სიხშირეზე, რომელიც უკეთესად გადადის კონკრეტულ ფიზიკურ არხში (მაგალითად, კაბელი, ბოჭკო, ეთერი და სხვ.).

ციფრული მოდულაციის გავრცელებული სქემებია:

- **ამპლიტუდური მოდულაცია (ASK – Amplitude Shift Keying):** გადამცემი სიგნალის ამპლიტუდა იცვლება შეტყობინების მნიშვნელობის შესაბამისად.
- **ფაზური მოდულაცია (PSK – Phase Shift Keying):** ფაზა გამოიყენება მონაცემის წარმოდგენისთვის — მაგალითად, ორ ფაზას შეესაბამება 0 და 1.
- **სიხშირული მოდულაცია (FSK – Frequency Shift Keying):** მონაცემის ერთეულები გადაცემულია სხვადასხვა სიხშირის ტალღებით.

მოცემული სქემების არჩევა დამოკიდებულია სისტემის ტექნიკურ შესაძლებლობებსა და გარემო პირობებზე, როგორცაა ჩარევა (ინტერფერენცია), შორსგადაცემა, გამტარუნარიანობა და ენერგოეფექტურობა.

სიგნალის ციფრული დამუშავების პროცესორები (DSP – Digital Signal Processors). სიგნალის ციფრული დამუშავების სისტემებს ხშირად მოეთხოვებათ ოპერაციების შესრულება რეალურ დროში. ეს გულისხმობს მაღალი სიჩქარით მონაცემთა მიღებას, დამუშავებას და დაბრუნებას, რაც არადადამაკმაყოფილებელ ამოცანას წარმოადგენს სტანდარტული მიკროპროცესორების არქიტექტურისთვის. სწორედ ამ საჭიროებამ გამოიწვია სპეციალიზებული ციფრული პროცესორების – DSP ჩიპების – გამოჩენა, რომლებიც ოპტიმიზირებულია სიგნალის დამუშავების სპეციფიური ამოცანებისთვის.

DSP პროცესორების ძირითადი თავისებურებებია:

- ჩაშენებული მამრავლებლების არსებობა: მულტიპლიკატორები, რომლებიც ასრულებენ სწრაფ გამრავლების ოპერაციებს, რაც უმნიშვნელოვანესია ნაკვეცებისა (convolutions), მატრიცული ოპერაციებისა და ფილტრაციისთვის.

- გამიჯნული მეხსიერება პროგრამებისა და მონაცემებისთვის: უზრუნველყოფს პარალელურ წვდომას და ოპერაციების სიჩქარის ზრდას.

- ბრძანებების ნაკრები ციკლების ოპტიმიზაციისთვის: მხარდაჭერილია ეფექტიანი განშტოებები, მარყუჟები და ოპტიმიზებული ინსტრუქციები, რაც ამცირებს ოპერაციულ დროებს.

- მაღალი ტაქტური სიხშირე: მაგალითად, Texas Instruments-ის TMS320C25 პროცესორს გააჩნია 40 MHz ტაქტური სიხშირე, რაც 100 ნანოწამიან ციკლებს ნიშნავს.

- კონვეინერული არქიტექტურა (Pipelining): ბრძანებების პარალელური დამუშავება სხვადასხვა საფეხურზე დროში გადანაწილებულად — ზრდის მონაცემების გამტარობას და ეფექტიანობას.

თანამედროვე DSP პროცესორები მოიცავენ მრავალწვრილ დეტალსა და ფუნქციონალს, როგორცაა: მცოცავი მძიმის (floating-point) არითმეტიკა; მრავალდონიანი წყვეტის სისტემა; ტაიმერების ინტეგრაცია; ჩამენებული პერიფერიული არხები კომუნიკაციისთვის; დიდი ზომის გაფართოებადი მეხსიერება.

DSP პროცესორები ფართოდ გამოიყენება აუდიო და ვიდეო დამუშავებაში, სამედიცინო დიაგნოსტიკაში (მაგ., ეეგ/ეკგ), რადარებსა და სონარებში, საკომუნიკაციო მოდელებში, მობილურ მოწყობილობებში და ინტელექტუალურ ავტომატიზაციაში (ყუბანიშვილი 2013, 8-11).

ციფრული მოდულაცია და სპეციალიზებული პროცესორების გამოყენება წარმოადგენს თანამედროვე საინჟინრო სისტემების ორ მნიშვნელოვან კომპონენტს. ისინი მონაცემთა საიმედო გადაცემასა და დამუშავებას უზრუნველყოფენ იმ სიჩქარითა და ხარისხით, რაც აუცილებელია რეალურ დროში რეაგირებისთვის — იქნება ეს მობილური ქსელები, სამრეწველო ავტომატიზაცია თუ მაღალი სიზუსტის სამედიცინო ხელსაწყოები.

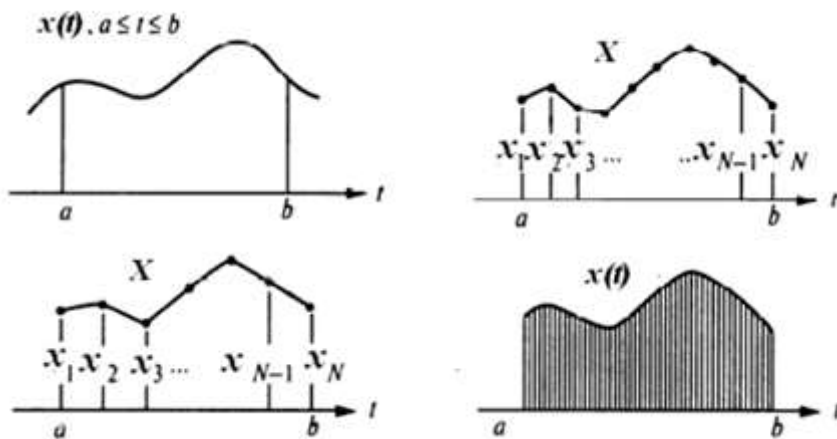
1.3 ციფრული სიგნალის დამუშავების მათემატიკური აპარატი

1.3.1 სიგნალის მათემატიკური წარმოდგენა

სიგნალის მათემატიკური წარმოდგენისთვის ანალოგური სიგნალი გარდაიქნება დისკრეტულ სიგნალად, სადაც ანათვლები წარმოდგენილია ციფრულ

ფორმატში. თუ დროის რაიმე $[a, b]$ ინტერვალში $x(t)$ ანალოგურ სიგნალს წარმოვადგენთ დისკრეტულ ფორმაში $x(\Delta tn)$, $n=1,2,3,\dots,N$ და მას ჩავწერთ $X=(x_1, x_2, \dots, x_N)$ ვექტორის სახით, მაშინ x_1, x_2, \dots, x_N დისკრეტული ანათვლები $x(t)$ სიგნალის კომპონენტები იქნებიან.

საწყისი სიგნალის აღდგენა დამოკიდებულია N სიდიდეზე ანუ დისკრეტიზაციის Δt ინტერვალზე. რაც უფრო შევამცირებთ Δt -ს, მით უფრო გაიზრდება N და მით უფრო კარგად წარმოვადგენთ საწყის სიგნალს. თუ $N \rightarrow \infty$, მაშინ X ვექტორი გადაიქცევა $x(t)$ სიგნალად (ნახ. 2).



ნახ. 2. საწყისი სიგნალის აღდგენა დამოკიდებულია N სიდიდეზე ანუ დისკრეტიზაციის Δt ინტერვალზე (ყუბანიშვილი 2013, 11)

ზოგადად ანალოგური სიგნალის ანუ შემავალი სიგნალის დისკრეტულად გარდაქმნას ემსახურება ანალოგურ ციფრული გარდამქმნელი (აცგ) და პირიქით გამომავალ სიგნალს დისკრეტულიდან ანალოგურში გარდაქმნის ციფრულ ანალოგური გარდამქმნელი (ცაგ) მოწყობილობები (ყუბანიშვილი 2013, 10-20).

1.3.2 ელექტრონული წრედების მოდელირება

ელექტრონული წრედების მოდელირება წარმოადგენს პროცესს, რომლის მიზანია ფიზიკური სისტემის მათემატიკური ან კომპიუტერული ანალოგის შექმნა, რათა შესაძლებელი გახდეს მისი სიღრმისეული ანალიზი, სიმულაცია და ოპტიმიზაცია სხვადასხვა პირობებში. ეს პროცესი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი ხდება მიკროელექტრონულ, რადიოფრეკვენციულ (RF) და მაღალსიხშირიან

სისტემებში, სადაც შეყვანასა და გამოტანას შორის არსებული ურთიერთობები რთულადაა აღსაქმელი მხოლოდ ანალიტიკური მიდგომით.

მოდელირებას ციფრული სიგნალის დამუშავების დიდი როლი აქვს. ელექტრონული წრედების მოდელირების თეორიული ბაზისი მყარად ეყრდნობა ციფრული სიგნალის დამუშავების (DSP – Digital Signal Processing) მეთოდოლოგიას. სიგნალის დამუშავების მეთოდები, როგორცაა დისკრეტიზაცია, ფურიეს გარდაქმნები, ჰილბერტის ანალიზი, კონვოლუცია და ფილტრაცია, გვამღებს საშუალებას წრედის რეაგირება განვიხილოთ როგორც სიხშირის დომენში წარმოდგენილი სისტემური პასუხი.

ამ მიდგომით, მოდელირების მთავარი ერთეულები – S-პარამეტრები (Scattering Parameters) – განიხილება არა მხოლოდ როგორც ლაბორატორიულად გაზომილი მონაცემთა კომპლექტი, არამედ როგორც დისკრეტული სიგნალის ფორმით წარმოდგენილი ფუნქციონალური რეაგირება, რაც ეფუძნება წრედის სიხშირით სპეციფიკურ ქცევას.

მოდელირებისას კრიტიკულად მნიშვნელოვანია ფიზიკური თანხვედრის პრინციპების დაცვა, რაც გულისხმობს მოდელის შესაბამისობას ისეთ მახასიათებლებთან, როგორცაა: კაუზალობა, პასიურობა და შექცევადობა.

ეს თვისებები არა მხოლოდ უზრუნველყოფს მოდელის რეალობასთან შესაბამისობას, არამედ განსაზღვრავს მოდელის სტაბილურობასა და სანდოობას სიმულაციური და ექსპერიმენტული ტესტებისას.

სიმულაციური და ალგორითმული მიდგომები

თანამედროვე ელექტრონული მოდელირება თითქმის მთლიანად ხორციელდება მრავალმხრივი სიმულაციური გარემოების (მაგ. LTSpice, ADS, HFSS) და ალგორითმული ინსტრუმენტების საშუალებით. MATLAB, Python და მსგავსი პლატფორმები საშუალებას იძლევა ჩავატაროთ:

- სიხშირის დომენში ანალიზი (მაგ. ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა – FFT);
- დროის დომენში სიმულაცია (მაგ. TDR ანალიზი);
- ფიზიკური პარამეტრების შეფასება დისკრეტულ მოდელზე დაყრდნობით;

- ალგორითმული კორექტირება, როგორცაა Vector Fitting ან Residue Matrix Enforcement, რათა მოდელი გახდეს ფიზიკურად სრულად შესაბამისი.

ქვემოთ განვიხილავთ კვლევაში გამოყენებულ ძირითად მათემატიკურ და ალგორითმულ კომპონენტებს.

1.3.3 ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა (DFT) და ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა (FFT)

ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა წარმოადგენს მათემატიკურ მეთოდს, რომელიც ციფრულ სიგნალებს ან მონაცემთა რიგებს სიხშირეების ნაკრებად გარდაქმნის. მოკლედ რომ ვთქვათ, DFT საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ, რომელი სიხშირეები შედის მოცემულ ციფრულ სიგნალში და რა წილი უჭირავს თითოეულ სიხშირეს. მაგალითად, თუ გვაქვს აუდიო ჩანაწერი, ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნით შეგვიძლია დავინახოთ, რა ბგერები (ტონები) შედის მასში. DFT სიგნალს შლის მცირე, ელემენტარულ სინუსიდურ ტალღებად, რომელთაგან თითოეულს საკუთარი ამპლიტუდა და ფაზა აქვს. ამ გზით, ნებისმიერი კომპლექსური ციფრული სიგნალი შეიძლება აღვწეროთ როგორც სხვადასხვა სიხშირის ტალღების კომბინაცია. DFT ხშირად გამოიყენება: აუდიო ან ვიდეო სიგნალების ანალიზში გამოსახულების დამუშავებაში რადიოკავშირის ტექნოლოგიებში სპექტრალური ანალიზის დროს პრაქტიკული მაგალითი — როცა მუსიკალურ ფაილში ვიკვლევთ, რომელ ბგერებს შეიცავს იგი კონკრეტულ მომენტში, სწორედ ფურიეს გარდაქმნა გვაწვდის ამ ინფორმაციას.

ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა (FFT) ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა არ არის ახალი ტიპის გარდაქმნა — ეს არის განსაკუთრებული ალგორითმი, რომელიც მნიშვნელოვნად აჩქარებს ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის გამოთვლას. ფაქტობრივად, როცა ვამბობთ FFT-ს, ვგულისხმობთ ოპტიმიზირებულ მეთოდს DFT-ს დასაანგარიშებლად. მისი გამოყენებით შეიძლება სიგნალის ან მონაცემების გარდაქმნა ბევრად უფრო სწრაფად, ვიდრე ჩვეულებრივი DFT-ით. FFT-მ დიდი როლი ითამაშა თანამედროვე ციფრულ ტექნოლოგიებში, რადგან მან შესაძლებელი გახადა ისეთი ოპერაციები, როგორცაა რეალური დროის სიგნალების დამუშავება,

სპექტრალური ანალიზი, აუდიოფილტრაცია, მონაცემთა შეკუმშვა და სხვა. სად გამოიყენება FFT: ციფრულ აუდიო და ვიდეო ტექნოლოგიებში მობილური კომუნიკაციაში რადარებისა და სონარების სისტემებში ბიომედიცინაში (მაგალითად, გულისცემის ან ტვინის ტალღების ანალიზი) სამრეწველო ავტომატიზაციაში DFT და FFT შორის განსხვავება DFT — თეორიული და საბაზისო გარდაქმნა, რომელიც სიხშირეების გამოვლენისთვის გამოიყენება. მისი გამოთვლა ხდება შედარებით ნელა დიდი მოცულობის მონაცემებისთვის. FFT — სწრაფი და ოპტიმიზებული ალგორითმი, რომელიც იმავე შედეგს იძლევა, მაგრამ გაცილებით ნაკლები გამოთვლითი რესურსით. მაგალითად, თუ DFT-ის გამოთვლას დიდი დრო სჭირდება, FFT-ის გამოყენებით იგივე გარდაქმნა შეიძლება განხორციელდეს წამებში. ეს ძალზე მნიშვნელოვანია მაღალი ზომის მონაცემთა ნაკრებთან მუშაობისას, როგორცაა მულტიპორტიანი S-მატრიცები. IEEE P370 სტანდარტი FFT-ის გამოყენებას მკაცრად მოითხოვს TDR და FDR ანალიზისთვის (IEEE Standard for Electrical 2021, 100).

1.3.4 სინგულარული მნიშვნელობების დაშლა (SVD)

სინგულარული მნიშვნელობების დაშლა (Singular Value Decomposition, SVD) წარმოადგენს წრფივი ალგებრის ერთ-ერთ ფუნდამენტურ ინსტრუმენტს, რომელიც ფართოდ გამოიყენება როგორც სიგნალის დამუშავებაში, ისე ელექტრონული წრედების პარამეტრების ვერიფიკაციის პროცესში. ნებისმიერი $m \times n$ ზომის მატრიცა შეიძლება დაიშალოს შემდეგნაირად:

$$S = UDV^* \tag{1.4}$$

სადაც U და V არიან ვექტორული მატრიცები, ხოლო D წარმოადგენს დიაგონალურ მატრიცას, რომლის დიაგონალზე განლაგებულია არანაკლებ ნულოვანი სინგულარული მნიშვნელობები ($\sigma_i \geq 0$) (Golub and Van Loan 2013). აღნიშნული დაშლა უნივერსალურია, რადგან იგი შესაძლებელია როგორც კვადრატული, ისე მართკუთხა მატრიცებისთვის, განსხვავებით თვითმნიშვნელობების დაშლისაგან (Eigenvalue Decomposition).

გამოყენება სიგნალის დამუშავებასა და ქსელის ვერიფიკაციაში. SVD-ს მნიშვნელობა განსაკუთრებით თვალსაჩინოა იმ შემთხვევაში, როდესაც საქმე გვაქვს S-

პარამეტრებით აღწერილ სისტემებთან. ფიზიკური თანხვედრის ერთ-ერთი ძირითადი პირობაა პასიურობა: სისტემამ არ უნდა წარმოქმნას ენერგია. მათემატიკურად ეს ნიშნავს, რომ ნებისმიერი სიხშირისათვის S-მატრიცის სინგულარული მნიშვნელობები უნდა აკმაყოფილებდნენ პირობას:

$$\sigma_i(\omega) \leq 1, \forall \omega \in \mathbb{R}.$$

თუ რომელიმე სინგულარული მნიშვნელობა ერთზე მეტია, სისტემა არღვევს პასიურობის პრინციპს, რაც იწვევს მოდელის არასტაბილურობასა და არასწორ სიმულაციებს (Gustavsen 2010). ამ დროს SVD გამოიყენება დარღვევების იდენტიფიცირებისა და ლოკალური კორექციისათვის: მხოლოდ იმ სიხშირეებში, სადაც დარღვევაა, სინგულარული მნიშვნელობები მცირდება ერთამდე, ისე რომ მინიმალური ზემოქმედება მოხდეს მოდელის მთლიანობაზე.

SVD საშუალებას იძლევა შეამციროს მოდელის რიგი მცირე სინგულარული მნიშვნელობების განულებით. ეს მეთოდი მნიშვნელოვან უპირატესობას იძლევა სიმულაციებისას, რადგან ამცირებს გამოთვლით სირთულეს და აჩქარებს მოდელირების პროცესს. Model Order Reduction (MOR)-ის თანამედროვე სტრატეგიები ხშირად ეფუძნება სწორედ SVD-ს, რომელიც ინარჩუნებს სისტემის ძირითად ენერგეტიკულ ქცევას და გამორიცხავს ხმაურით განპირობებულ მეორეხარისხოვან კომპონენტებს (Antoulas and Sorensen 2022).

თანამედროვე კვლევებში SVD იშვიათად გამოიყენება იზოლირებულად. იგი ხშირად ინტეგრირდება სხვა ალგორითმებთან:

- Vector Fitting–თან კომბინაციაში, რაც საშუალებას იძლევა პასიურობის დარღვევის მონიტორინგი და კორექცია განხორციელდეს მაღალი სიზუსტით (Choupanzadeh and Zadehgol 2024).

- Convex Optimization–თან, სადაც SVD-ის მიერ იდენტიფიცირებული კრიტიკული წერტილები ქმნის საწყის პირობებს ოპტიმიზაციის ამოცანებისთვის.

- Physics-Informed Neural Networks (PINNs)–ში, სადაც SVD გამოიყენება ნეირონული ქსელის მიერ გენერირებული S-პარამეტრების post-processing-ისათვის, მათი ფიზიკური სისწორის დასაზუსტებლად (Torun, Aygün, and Swaminathan 2020).

დადებითი და უარყოფითი მხარეები: SVD-ის დადებითი მხარე მოიცავს: უნივერსალურობას (ვრცელდება ყველა მატრიცაზე), სტაბილურობას (შეცდომების მიმართ მდგრადია), ფიზიკური კრიტერიუმების დარღვევის ადვილ იდენტიფიკაციას, მოდელის რიგის ეფექტურ შემცირებას.

მის მთავარ ნაკლად რჩება მისი მაღალი გამოთვლითი სირთულე დიდი მასშტაბის სისტემებისთვის, აგრეთვე ფიზიკური დეტალების დაკარგვის რისკი მაშინ, როდესაც მცირე სინგულარული მნიშვნელობები იგნორირდება.

და ბოლოს SVD წარმოადგენს ცენტრალურ მეთოდს ელექტრონული წრედების მოდელირებისა და პარამეტრების ვერიფიკაციისთვის. მისი გამოყენება უზრუნველყოფს პასიურობის დარღვევის აღმოჩენას და კორექციას, ამცირებს მოდელის რიგს და ზრდის სიმულაციის ეფექტურობას. IEEE P370-ის სტანდარტის კონტექსტში, SVD-დაფუძნებული მიდგომები უკვე ინდუსტრიულ ნორმად ითვლება მაღალი სიჩქარის (>20 GHz) სისტემებში, ხოლო თანამედროვე კვლევები მის ინტეგრაციას AI- და ოპტიმიზაციაზე დაფუძნებულ სტრატეგიებთან მიმართავენ (Beckers and Colombo 2025).

1.3.5 ჰილბერტის დისკრეტული გარდაქმნა (DHT)

DHT წარმოადგენს კაუზალობის შეფასებისა და განხორციელების ეფექტურ ალგორითმს. იგი განსაზღვრავს სიგნალის წარმოსახვით ნაწილს მისი რეალური ნაწილის საფუძველზე.

$$H(\omega') = -\frac{1}{j\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(\omega)}{\omega - \omega'} d\omega. \quad (1.5)$$

პრაქტიკაში რეალიზებულია მისი დისკრეტული ვერსია, რომელიც გამოიყენება S - პარამეტრების რეალურ და წარმოსახვით კომპონენტებს შორის თანხვედრის შესაფასებლად. DHT განხორციელების მეთოდი მოიცავს ფრონტალურ დაყოვნებასა და კრამერს-კრონინგის ტოლობის ანალიზს. აღნიშნული მეთოდოლოგია წარმატებით გამოიყენეს მ. წიკლაურმა და სხვებმა 2020 წელს IEEE DesignCon-ზე წარმოდგენილ ნაშრომში (Tsiklauri, Dikhaminjia და al. 2020, 78).

1.3.6 S -პარამეტრების ხარისხის შემოწმება ფიზიკურ ერთეულებში

არხის მახასიათებელი მონაცემების ძირითადი წყარო არის გაზომვა, სრულტალღოვანი მოდელირება და ანალიტიკური მოდელირება, მაგრამ არცერთი მათგანი არ იძლევა იდეალურ მონაცემებს. გაზომვას ყოველთვის ახლავს ხმაური სხვადასხვა წყაროდან, მონაცემების გატარების ზოლი შეზღუდულია და შეიძლება მიღებულ იქნას მხოლოდ სასრული დისკრეტული წერტილების სიმრავლე. ანალიტიკური მოდელი იყენებს მათემატიკურ აპროქსიმაციას, ამარტივებს რეალობას და არ შეიცავს სისტემის ყველა შესაძლებელ კომპონენტს. ამას გარდა არსებობს მცირე რაოდენობა გეომეტრიებისა რომელითაც შესაძლებელია ზუსტად იყოს ასახული ანალიტიკური მეთოდით. სრულტალღოვანი მოდელი - აგრეთვე იყენებს მათემატიკურ მსჯელობას (ვარაუდს), მაგრამ ამის გარდა, შეზღუდულია თავისი სიზუსტით რიცხვითი ცდომილებების გამო რაც გამომდინარეობს კომპიუტერული მოდელირების ბუნებიდან, ამიტომ ნებისმიერი მონაცემები რომლებიც აღწერენ ფიზიკურ სისტემას მთლად ზუსტი არ არის და ვერ აღწერს მას ყოველმხრივ. საჭიროა არსებობდეს არსებული მონაცემების ხარისხის შეფასების შესაძლებლობა, მის საფუძველზე მიღებული შედეგების და დასკვნების საიმედოობის მისაღწევად. მოდელირების პროცედურები, რომლებიც გამოიყენება სიგნალის მთლიანობის შესაფასებლად მოცემული სისტემებისთვის, ძალიან მგრძობიარეა მათში გამოყენებულ მონაცემებთან მიმართებაში. თუ მონაცემები არღვევენ რეალური სისტემების მნიშვნელოვან ფიზიკურ თვისებებს მაშინ შედეგები იქნება მცდარი, რაც ზეგავლენას პროდუქტის დიზაინზე მოახდენს გავლენას. S-პარამეტრები უნდა აკმაყოფილებდნენ სამ ძირითად თვისებას.

- **კაუზალობა**-ფიზიკურად გამართული ქსელის პარამეტრების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი თვისებაა, რომელიც მიზეზისა და შედეგის ინტუიტიურ ცნებას ასახავს, კერძოდ, მონაცემების შეყვანამდე გამოსასვლელზე არანაირი სიგნალი არ შეიმჩნევა.

- **პასიურობა** - ნიშნავს, რომ სისტემა არ აგენერირებს ენერგიას. პასიური ქსელის შესაბამის S - პარამეტრებს უნდა ჰქონდეთ ნორმა 1-ზე ნაკლები. ნორმას იღებენ როგორც მაქსიმალურ ერთეულოვან (სინგულარულ) მნიშვნელობას.

- **შექცევადობა** - პასიური ქსელი, რომელიც შეიცავს შექცევად მონაცემებს არის შექცევადი. შექცევადი სისტემებისთვის S-პარამეტრების მატრიცა უდრის მის ტრანსპონირებულ მატრიცას.

S - პარამეტრები ყველაზე გავრცელებული ხერხია წრფივი ელექტრონული ქსელების ელექტრონული ქცევის აღწერისათვის, თუმცა ნებისმიერი S-პარამეტრები, სრულყოფილად ვერ აღწერს ფიზიკურ სისტემას. შესაბამისად აუცილებელია გვექონდეს საშუალება - შევაფასოთ არსებული მონაცემების ხარისხი, იმისათვის რომ მათ საფუძველზე მიღებული შედეგების და დასკვნების საიმედოობის უზრუნველყოფა შევძლოთ. ჩვენ აღვწეთ S-პარამეტრების შეფასების მეთოდს, ფიზიკურ ერთეულებში. აღნიშნული მედოდი ეფუძნება კაუზალობის, შექცევადობის და პასიურობის მახასიათებლს.

კაუზალობის, შექცევადობის და პასიურობის თვალსაზრისით ფიზიკურ ერთეულებში S-პარამეტრების საიმედოობის ხარისხის შეფასების იდეა მდგომარეობს შემდეგში:

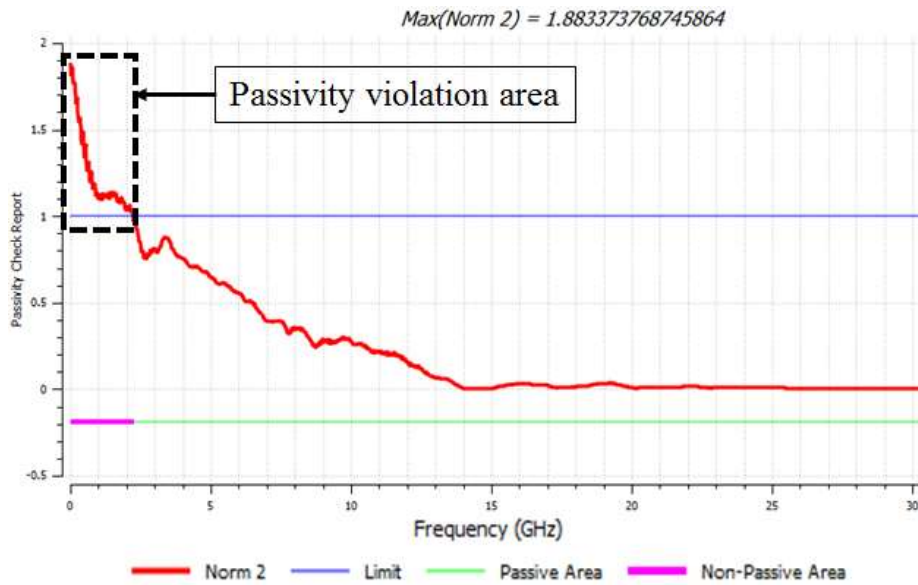
პირველ რიგში საწყისი მონაცემების საფუძველზე იქმნება კაუზალური, შექცეული და პასიური S-პარამეტრები; დროით არეში ფიზიკურ ერთეულებში განისაზღვრება S-პარამეტრების მსგავსების ზომა, და ბოლოს აღნიშნული მსგავსების ზომა გამოიყენება საწყის და პასიურ, კაუზალურ და შექცევად მატრიცებს შორის გასხვავების შესაფასებლად. დაუშვათ რომ საწყისი S პარამეტრების მატრიცა არის $S_{original}$ აქედან მიიღება $S_{passive}$, S_{causal} , $S_{reciprocal}$ მატრიცები. მსგავსების ზომა დროით არეში გამოყენებულ იქნება S-პარამეტრების შემდეგი სხვაობების შესაფასებლად:

$$\begin{aligned} \Delta S_{passive} &= S - S_{passive}, \\ \Delta S_{causal} &= S - S_{causal}, \\ \Delta S_{reciprocal} &= S - S_{reciprocal}. \end{aligned}$$

განვიხილოთ პასიური, კაუზალური და შექცევადი პარამეტრების შექმნის ალგორითმები

პასიურობა. პასიური სისტემა არ აგენერირებს ენერგიას. პასიური ქსელის შესაბამის S-პარამეტრებს უნდა ჰქონდეთ ნორმა 1-ზე ნაკლები. ნორმად განისაზღვრება ინდუცირებული მატრიცული ნორმა.

$$\|S\| = \sqrt{\lambda_{\max}(SS^*)} \leq 1 \quad (1.6)$$



ნახ. 3. S-პარამეტრების პასიურობის განმარტება (IEEE Standard for Electrical 2021, 97)

აღწეროთ პასიური მატრიცის შემნა საწყის S-პარამეტრების საფუძველზე: უნდა შევქმნათ პასიური მატრიცა რომელიც მაქსიმალურად ახლოს იქნება საწყის S-პარამეტრებთან. უნდა ვიპოვოთ მინიმალური ΔS მატრიცა რომლის შემფოთება გამოიწვევს საწყისი პარამეტრების მატრიცის პასიურობას. $(S + \Delta S)$ არის პასიური, რომელსაც მათემატიკურად გამოვსახავთ ასე:

$$\min_{\|S+\Delta S\| \leq 1} \|\Delta S\| \quad (1.7)$$

როგორც (1.6) ფორმულიდან ჩანს S-პარამეტრების მატრიცის არა პასიურობა დაკავშირებულია მატრიცის საკუთრივ მნიშვნელობებთან, რომელთა აბსოლუტური მნიშვნელობა მეტია ერთზე. პასიური S-პარამეტრების მატრიცი შეიქმნება საწყისი S-პარამეტრების მხოლოდ იმ მნიშვნელობების მოდიფიკაციით რომლებიც არღვევენ პასიურობას.

ქვემოთ უფრო დაწვრლებით აღწეროთ პასიური S-პარამეტრების მატრიცის შექმნის ალგორითმს.

კაუზალობა: - განვიხილოთ საწყისი S-პარამეტრების საფუძველზე კაუზალური S-პარამეტრების მოდელის შექმნის ალგორითმი. ალგორითმი ეფუძნება S-პარამეტრების თითოეული კომპონენტის ფაზის რეკონსტრუქციას მაგნიტუდის

საშუალებით. კაუზალური ფუნქცია უნდა აკმაყოფილებდეს *კრამერს-კრონინგის* ცნობილ ტოლობას:

$$V(\omega) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U(\omega')}{\omega - \omega'} d\omega',$$

$$U(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V(\omega')}{\omega - \omega'} d\omega'. \quad (1.8)$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ კაუზალური გადაცემის ფუნქციის ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილები არ არიან დამოკიდებული და შესაძლებელია მათი ერთმანეთით აღდგენა. კრამერს-კრონინგის ტოლობა შეიძლება დადგინდეს გადაცემის ფუნქციის ამპლიტუდასა და ფაზას შორის (Bechhoefer 2011, 1053-1059).

დაუშვათ, რომ

$$H(\omega) = e^{-A(\omega) - j\varphi(\omega)}, \quad (1.9)$$

მაშინ $\varphi(\omega)$ ფაზა შეიძლება ცალსახად განისაზღვროს ამპლიტუდისგან $A(\omega)$.

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{A(\omega')}{\omega - \omega'} d\omega' \quad (1.10)$$

წიკლაური და მისი თანავტორები განიხილავენ ჰილბერტის დისკრეტული გარდაქმნის საფუძველზე შექმნილი კაუზალურ მოდელს რომელიც დამყარებულია (1.8) ფორმულაზე. ეს მეთოდი აღადგენს კაუზალურ ფაზას მაგნიტუდისგან შემდეგი ფორმულის გამოყენებით (Tsiklauri, and Zvonkin, და სხვ. 2016, 921-926).

$$\varphi_{causal}(\omega) = \frac{j}{2\pi} F\left(F^{-1}(A(\omega)) \text{sign}(t)\right). \quad (1.11)$$

ამ ალგორითმის უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ ის არ გამოიყენებს რიცხვით გამოთვლებს რომელიც შემოსაზღვრულია ინტეგრალის დიაპაზონით და შესაბამისად არ აქვს სინგულარობის პრობლემა მაქსიმალურ სიხშირესთან ახლოს. აგეთვე ადვილია მისი რეალიზება, რამდენადაც *ფურიეს სწრაფი გარდაქმნის* ფუნქცია ადვილად განსახორციელებელია თანამედროვე პროგრამირების ენებით. ამას გარდა კრამერს-კრონინგის ტოლობის გამოთვლის ოპერაციათა რიცხვი N^2 -ის პროპორციულია, ხოლო ოპერაციათა რაოდენობა რომელიც საჭიროა *ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა* (ფსგ) გამოსათვლელად პროპორციულია $N \log N$, სადაც N - არსებული მონაცემების ნიმუშების რაოდენობაა. და ბოლოს თუ გადაცემის ფუნქციის კაუზალური მოდელი მიღებული იქნება მოცემული მეთოდით, მისგან მიღებული

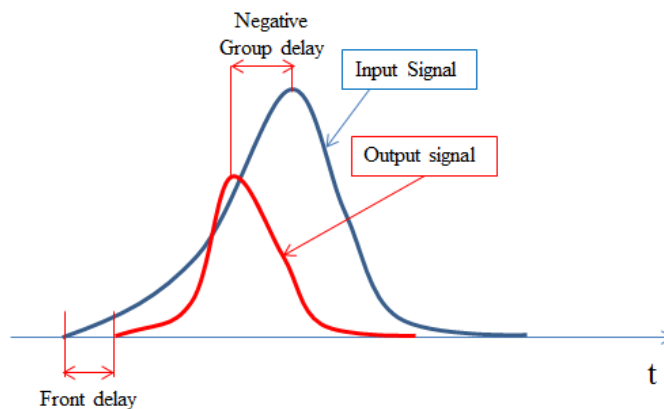
იმპულსური მახასიათებელი, ფურიეს სწრაფი უკუ გარდაქმნის გამოყენებით (IFFT), იქნება სრულად კაუზალური შესაბამის დროით არეში.

მითითებული მეთოდი აღადგენს ფაზის არაწრფივ ნაწილს, იმისათვის რომ მივიღოთ სრული ფაზა, საჭიროა დავმატოვოთ ფაზის წრფივი ნაწილი - რაც შესაბამეობა სისტემის დაყოვნებას, ფიზიკური სისტემის გადაცემის ფუნქცია შეიძლება დახასიათდეს სამი განსხვავებული სახის: ჯგუფური დაყოვნება, ფაზური დაყოვნება და ფრონტალური დაყოვნება (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019, 81-87).

$$\tau_{ph}(\omega) = \frac{\varphi(\omega)}{\omega}, \quad \tau_{gr}(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}, \quad \tau_{fr} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\varphi(\omega)}{\omega}. \quad (1.12)$$

წყარო: (Tsiklauri, Dikhaminjia and Fan, et al. 2016, 870-872)

ჯგუფური დაყოვნება არის არხში გამავალი სიგნალის შემადგენელი ყოველი სინუსოიდალური კომპონენტის ამპლიტუდის დროით დაყოვნება. ფაზური დაყოვნება დაკავშირებულია სხვადასხვა სიხშირული კომპონენტის გავრცელების სიჩქარესთან. ფაზური და ჯგუფური დაყოვნებები დამოკიდებულია სიხშირეზე. ჯგუფურ დაყოვნებას შეიძლება ჰქონდეს უარყოფითი მნიშვნელობაც, ამის მაგალითი მოყვანილია ნახ.4-ზე. ფრონტალური დაყოვნება არ არის დამოკიდებული სიხშირეზე და შეესაბამება დროს როდესაც სიგნალის ფრონტი ჩნდება. აქედან გამომდინარე ფრონტალური დაყოვნება დაყოვნების კაუზალობის შეფასებაში ან მიზეზ-შედეგობრივი (კაუზალური) დაყოვნების მოდელის შექმნაში უნდა იქნას გამოყენებული. (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019, 81-87).



ნახ. 4. უარყოფითი ჯგუფური დაყოვნების მაგალითი (M. D. Tsiklauri 2016, 871)

მ. წიკლაურს აღწერილი აქვს ფრონტალური დაყოვნების რამდენიმე მეთდი. ფრონტალური დაყოვნების გამოთვლის შემდეგ საბოლოოდ კაუზალური ფუნქცია აღდგება შემდეგი ფორმულით:

$$H_{causal}(\omega) = e^{-A(\omega) - (\varphi_{causal}(\omega) + \tau_{fr})} \quad (1.13)$$

სადაც $\varphi_{causal}(\omega)$ არის (1.11) ფორმულით აღდგენილი ფაზის კაუზალური არაწრფივი ნაწილი. τ_{fr} - გადაცემის ფუნქციის ფრონტალური დაყოვნება. (1.12) ფორმულა გამოიყენება მოცემული S პარამეტრების ყოველი კომპონენტისთვის კაუზალური S პარამეტრების შესაქმნელად. მსგავსების ზომა გამოიყენება დროით არეში კაუზალობის ფიზიკურ ერთეულებში შესაფასებლად (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019, 81-87).

1.3.7 AWGN არხის როლი S-პარამეტრების ხარისხის შეფასებაში

საკომუნიკაციო სისტემების ანალიზისა და სიმულაციისას, დამატებითი თეთრი გაუსიანი ხმაური (AWGN) წარმოადგენს ერთ-ერთ ძირითად მოდელს, რომელიც არხში არსებული შიდა ელექტრონული ხმაურის ეფექტის გასაანალიზებლად გამოიყენება. აღნიშნული მოდელი იდეალურად შეესაბამება იმ პირობებს, როდესაც არხი არ შეიცავს არალინიერ, მულტიმიმართულებიან ან ფადინგის ეფექტებს და ემსახურება სისტემის მაქსიმალურად ოპტიმალური პირობების იმიტაციას.

AWGN მოდელი ხშირად გამოიყენება ისეთ სისტემებში, სადაც აუცილებელია გავითვალისწინოთ მხოლოდ თერმული ხმაურის კომპონენტები, ხოლო სხვა დამახინჯებები იგნორირებულ იქნას. შესაბამისად, იგი იდეალურია **S-პარამეტრების ხარისხის შეფასების** საწყის ეტაპზე, როდესაც მიზანია მოდელირებულ ან გაზომილ მონაცემებზე დაფუძნებით დადგინდეს ქსელის კაუზალობის, პასიურობისა და შექცევადობის შენარჩუნება.

S-პარამეტრები აღწერს სისტემის წრფივ პასუხს სიხშირული ფუნქციის სახით და მნიშვნელოვანია, რომ ეს პარამეტრები შეესაბამებოდეს ფიზიკურად რეალიზებადი

სისტემის თვისებებს. AWGN არხის პირობებში, სადაც არ არსებობს დამატებითი არაწრფივი ან პარაზიტული ზემოქმედება, შეგვიძლია მკაფიოდ დავაკვირდეთ იმ განსხვავებებს, რომლებიც ისეთ შემთხვევებში წარმოიშობა, როდესაც S-პარამეტრები არღვევენ ერთ ან რამდენიმე ფუნდამენტურ თვისებას.

მაგალითად, თუ სიგნალის რეაქცია S-პარამეტრების საფუძველზე მოდელირებულ სისტემაში მნიშვნელოვნად განსხვავდება AWGN არხის პირობებში მიღებული რეაქციისგან, ეს შეიძლება მიუთითებდეს კაუზალობის დარღვევაზე, რაც ნიშანდობლივია იმპულსური რეაქციის წინასწარი აქტივობისას. ანალოგიურად, პასიურობის დარღვევა შეიძლება გამოვლინდეს როგორც გამომავალი ენერჯის მატება ან სიგნალის გამამლიერებელი მოქმედება, რაც AWGN-ის იდეალურ გარემოში არ არის დასაშვები. შესაბამისად, **AWGN არხი შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც ეტალონური გარემო**, რომელშიც S-პარამეტრების მოდელის „გაწმედა“ ანუ მათი დამოწმება ხდება ფიზიკურ კანონებთან შესაბამისობაში. აღნიშნული მიდგომა არა მხოლოდ ხელს უწყობს მოდელის სანდოობის დადგენას, არამედ ქვედა ზღვარს ქმნის რეალური სისტემის ბიტური შეცდომის მაჩვენებლის (BER) შეფასებისთვის (AWGN Function., MathWorks 2025).

საერთო ჯამში, AWGN არხის ჩართვა S-პარამეტრების შეფასების ალგორითმებში ანალიზის სიმარტივეს, გაზრდილ სიზუსტეს და სწორი დიაგნოსტიკის შესაძლებლობას უზრუნველყოფს, რაც მაღალი სიხშირის ელექტრონული ქსელების სანდო მუშაობისთვის აუცილებელია.

სიგნალის დამუშავების თეორიაში, გაუსის ტიპის ხმაური განიხილება როგორც შემთხვევითი პროცესი, რომელიც ნორმალური განაწილების ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციით (Probability Density Function – PDF) მოდელირდება. ეს ტიპი ხმაურისა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმით, რომ იგი აღწერს მრავალ რანდომულ ფიზიკურ პროცესს, განსაკუთრებით თერმულ ხმაურს რადიოელექტრონულ სისტემებში. სხვა სიტყვებით, ხმაურის მიერ მიღებული ამპლიტუდური მნიშვნელობები განაწილებულია გაუსის კანონით.

ნორმალური განაწილების PDF ფუნქცია ჩამოყალიბებულია შემდეგნაირად:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.14)$$

სადაც:

- x — ხმაურის შესაძლო მნიშვნელობა,
- μ — საშუალო მნიშვნელობა (mean),
- σ^2 — დისპერსია (variance),
- σ — სტანდარტული გადახრა (standard deviation),
- e — ნეპერის მუდმივა.

ამ ფორმულით აღწერილი სიმკვრივის ფუნქცია აჩვენებს, რომ ხმაურის მნიშვნელობები ყველაზე ხშირად კონცენტრირებულია საშუალო გარშემო და შანსი მათი მნიშვნელოვნად გადახრისა მცირდება ექსპონენციალურად. ამგვარი სტრუქტურა განაპირობებს გაუსის ხმაურის სიმარტივეს მოდელირებისა და მათემატიკური დამუშავების თვალსაზრისით, რაც მას ხშირად გამოყენებადს ხდის როგორც თეორიულ, ისე პრაქტიკულ სისტემებში — მათ შორის **AWGN არხის მოდელებში**.

ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია p გაუსის შემთხვევითი ცვლადის z მოცემულია:

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(z-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (1.15)$$

სადაც z წარმოადგენს ნაცრისფერ დონეს, μ ნაცრისფერი სასაშუალო მნიშვნელობა და მისი σ სტანდარტული გადახრა .

თეთრი გაუსის ხმაურის (AWGN) მოდელი და მისი როლი საკომუნიკაციო არხების ტესტირებაში

გაუსის ტიპის ხმაურის განსაკუთრებულ სახეს წარმოადგენს **თეთრი გაუსის ხმაური**, რომელიც ხასიათდება იმით, რომ მისი მნიშვნელობები დროის ნებისმიერ წყვილ მომენტში თანაბრად განაწილებულია და სტატისტიკურად ერთმანეთთან დამოუკიდებელია. ასეთმა შემთხვევით პროცესს არ აქვს დროითი კორელაცია და

შესაბამისად, ითვლება არაკორელირებულად. ეს თვისება განსაკუთრებულად მნიშვნელოვანია იმ დროს, როდესაც სისტემების შეფასება იდეალურ ან ეტალონურ პირობებში ხდება.

საკომუნიკაციო სისტემების ტესტირებისა და მოდელირებისას თეთრი გაუსის ხმაური ხშირად გამოიყენება როგორც ძირითადი დამატებითი შემთხვევითი კომპონენტი. მისი დამატებით სიგნალზე შემოქმედებით მოდელირდება **დამატებითი თეთრი გაუსის ხმაური** (Additive White Gaussian Noise – AWGN), რომელიც ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ არხის მოდელს წარმოადგენს ციფრული კომუნიკაციების ანალიზში (Proakis 2008).

AWGN მოდელის გამოყენება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საკომუნიკაციო სისტემებში, რადგან იგი აღწერს იმ პირობებს, როდესაც სიგნალზე მოქმედი ერთადერთი დამახინჯება არის თერმული წარმოშობის შემთხვევითი ხმაური. მსგავსი ტიპის ფართოხოლოვანი გაუსის ხმაური შესაძლებელია წარმოიშვას ბუნებრივი წყაროებიდან, როგორცაა:

- ატომების თერმული ვიბრაცია გამტარ მასალებში (ცნობილია როგორც თერმული ხმაური ან ჯონსონ-ნიკვისტის ხმაური),
- გასროლის (shot) ხმაური, რომელიც გამოწვეულია დისკრეტული ელექტრონების გადაადგილებით,
- შავი სხეულის ამოსხივება, რომელიც მოდის დედამიწიდან, სხვა თბილი ობიექტებიდან და ასტროფიზიკური წყაროებიდან, მათ შორის მზიდან.

AWGN-ის მოდელირება, სწორედ ამ ბუნებრივ წყაროებზე დაფუძნებით, შესაძლებლობას იძლევა შეფასდეს საკომუნიკაციო არხის სტაბილურობა და სიგნალის დამახინჯების მიმართ მდგრადობა, რაც განსაკუთრებით აქტუალურია მაღალი სიზუსტის მქონე ციფრული და მიკროსიხშირული სისტემებისთვის.

1.3.8. MATLAB-ის როლი სიგნალის დამუშავებაში

თანამედროვე საინჟინრო მეცნიერებაში MATLAB წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე ფართოდ გამოყენებულ პროგრამულ პლატფორმას, რომელიც აერთიანებს რიცხვით ანალიზს, მოდელირებას, ალგორითმების შემუშავებასა და ვიზუალიზაციას

ერთიან, ინტეგრირებულ გარემოში. MATLAB-ის მნიშვნელობა განსაკუთრებით მაღალია ციფრული სიგნალის დამუშავების (Digital Signal Processing – DSP) მიმართულებაში, სადაც იგი გამოიყენება როგორც კვლევითი, ასევე სასწავლო და ინდუსტრიული ამოცანების გადაწყვეტისთვის.

MATLAB წარმოადგენს მაღალი დონის სამეცნიერო გამოთვლებისა და ალგორითმული პროტოტიპირების პლატფორმას, რომელიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სიგნალის დამუშავების პროცესებში. მისი ძირითადი უპირატესობა მდგომარეობს მატრიცულ ოპერაციებზე დაფუძნებულ არქიტექტურაში, რაც საშუალებას იძლევა ეფექტიანად განხორციელდეს როგორც თეორიული ანალიზი, ასევე პრაქტიკული ექსპერიმენტები [Oppenheim და Schaffer, 2010]. MATLAB-ის ეკოსისტემა მოიცავს მრავალ სპეციალიზებულ ხელსაწყოს, მათ შორის **Signal Processing Toolbox** და **DSP System Toolbox**, რომლებიც უზრუნველყოფენ ფილტრის პროექტირებას, სპექტრული ანალიზის განხორციელებას, დრო-სიხშირის გარდაქმნებს, მოდულაციისა და დეკოდაციის ალგორითმებს. ეს ხელსაწყოები განკუთვნილია როგორც სინთეზირებული, ასევე გაზომილი მონაცემების დამუშავებისა და შედარებისთვის [Proakis და Manolakis, 2006].

MATLAB (Matrix Laboratory) არის მატრიცებზე დაფუძნებული გამოთვლითი სისტემა, რომელიც განკუთვნილია რიცხვითი გამოთვლების სწრაფად შესასრულებლად. მისი არქიტექტურა ოპტიმიზებულია ხაზოვანი ალგებრის ოპერაციებისათვის, რაც სიგნალის დამუშავების პროცესში სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანია. პლატფორმის სიმარტივე და მოქნილობა უზრუნველყოფს რთული მათემატიკური მოდელების იმპლემენტაციას რამდენიმე ხაზით, რაც მას მნიშვნელოვან ხელსაწყოდ აქცევს როგორც მკვლევარებისთვის, ასევე პრაქტიკოსი ინჟინრებისთვის.

MATLAB-ის წარმატების ერთ-ერთი მთავარი მიზეზი არის მისი მოდულური სტრუქტურა, რომელიც ეფუძნება „ტულბოქსების“ (პროგრამული ხელსაწყოების ნაკრები) (**Toolbox**) სისტემას. განსაკუთრებით პოპულარულია **Signal Processing Toolbox**, რომელიც უზრუნველყოფს ფართო ფუნქციონალს სიგნალის ფილტრაციის,

სპექტრული ანალიზის, სიგნალის აღდგენის, კორელაციისა და მოდელირების ამოცანებისთვის.

MATLAB-ის მნიშვნელოვან კომპონენტს წარმოადგენს **Simulink**, რომელიც ვიზუალურ დონეზე ბლოკ-სქემური მოდელირებისა და დინამიკური სისტემების სიმულაციის საშუალებას იძლევა. მისი მეშვეობით შესაძლებელია როგორც უწყვეტი, ასევე დისკრეტული სიგნალების დამუშავების პროცესების იმიტაცია, ფილტრაციის ჯაჭვების აგება და მართვის ალგორითმების ტესტირება. Simulink-ის სოლვერები უზრუნველყოფენ როგორც მაღალი სიზუსტის, ასევე რეალურ დროზე ორიენტირებულ სიმულაციებს, რაც მას უნივერსალურ ინსტრუმენტად აქცევს კვლევისა და განვითარების პროცესში (MathWorks 2024)

MATLAB/Simulink განსაკუთრებით ეფექტიანია სიხშირის დომენში მონაცემების დამუშავებისთვის. მაგალითად, Touchstone ფორმატის (*.s2p, .sNp) ფაილების იმპორტი და მათი შემდგომი ანალიზი იძლევა S-პარამეტრების დამუშავებისა და ფიზიკური თანმიმდევრულობის კონტროლის საშუალებას. აღნიშნული პროცედურები მოიცავს პასიურობისა და კაუხალობის შემოწმებას, მონაცემთა ინტერპოლაციასა და ექსტრაპოლაციას, ასევე დროით დომენში რეაქციების კვლევას. **RF Toolbox** და **RF Blockset** კი ავსებს ამ შესაძლებლობებს, რაც MATLAB-ს აქცევს ფართოზოლოვანი ინტერკონექტებისა და მიკროზოლოვანი ხაზების კვლევისა და მოდელირების შეუცვლელ პლატფორმად (Torun, Hakki, და სხვ. 2019)

კომპიუტერული მოდელირება და სიმულაცია, რომელსაც MATLAB/Simulink უზრუნველყოფს, თანამედროვე საინჟინრო მეცნიერებაში განიხილება როგორც ერთ-ერთი ძირითადი მეთოდი, რომელიც აკავშირებს თეორიასა და პრაქტიკას. მისი გამოყენება იძლევა მათემატიკური მოდელების ვალიდაციასა და ვერიფიკაციას პრაქტიკულ სცენარებში, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სიგნალის დამუშავების სფეროში, სადაც ალგორითმული სიზუსტე ხშირად საჭიროებს დამატებით დამოწმებას (A. S. Antoulas 2022)

მოდელირების კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი ასპექტია რესურსების და დროის ოპტიმიზაცია. ფიზიკური ექსპერიმენტების დიდი ნაწილი შეიძლება ჩანაცვლდეს

ციფრული სიმულაციებით, რაც ამცირებს ფინანსურ და დროულ დანახარჯებს და პარალელურად ზრდის კვლევისა და განვითარების ეფექტიანობას (MathWorks 2024). გარდა ამისა, სიმულაცია ამცირებს რისკებს, რადგან შესაძლებელი ხდება პოტენციური ხარვეზების ადრეული აღმოჩენა და მათი აღმოფხვრა სისტემის რეალური დანერგვამდე.

კომპიუტერული მოდელირება ასევე აჩქარებს ინოვაციურ პროცესებს. MATLAB/Simulink-ის გარემოში შესაძლებელია ახალი ალგორითმების ოპტიმიზაცია, სხვადასხვა პარამეტრის ცვლილების ტესტირება და მხოლოდ ამის შემდეგ — ფიზიკური რეალიზაცია. შედეგად, კვლევის ციკლი უფრო მოქნილი და ეფექტიანი ხდება, ხოლო ინჟინერს ეძლევა როგორც ლოკალური კომპონენტების, ასევე მთლიანი სისტემის ქცევის ერთდროული ანალიზის შესაძლებლობა (MathWorks 2024).

ამრიგად, MATLAB პლატფორმის როლი სიგნალის დამუშავებაში მოიცავს არა მხოლოდ თეორიული მოდელების ანალიზს, არამედ კომპიუტერული მოდელირებისა და სიმულაციის ინტეგრირებულ შესაძლებლობებს, რომლებიც უზრუნველყოფს შედეგების სანდოობას, ხარჯებისა და დროის დაზოგვას, რისკების შემცირებას და ინოვაციური პროცესების დაჩქარებას.

RF Toolbox-ის მეშვეობით შესაძლებელია TDR/FDR სიმულაცია, პასიურობის დიაგნოსტიკა და დროში/სიხშირეში გარდაქმნები. Signal Processing Toolbox უზრუნველყოფს FIR/IIR ფილტრების სინთეზს, სპექტრალურ ანალიზსა და Z-გარდაქმნის მოდელირებას. MATLAB-ში SVD ან DHT გამოყენება მარტივად ხორციელდება ჩაშენებული ფუნქციებით, რაც კვლევის პროცესს საგრძნობლად აჩქარებს.

MATLAB-ის მოქნილობა და მხარდაჭერა IEEE სტანდარტებთან შესაბამისობაში უპირატესობას ამ პლატფორმას ანიჭებს, განსაკუთრებით იმ შემთხვევებში, როდესაც საჭიროა ინტეგრირებული ანალიზი Python და SPICE გარემოსთან (MathWorks 2024).

ციფრული სიგნალის დამუშავება მოიცავს სხვადასხვა ოპერაციას, როგორცაა სიგნალის ფილტრაცია, სპექტრული გარდაქმნები, ხმაურის მოცილება, ანალიზი დროითა და სიხშირულ დომენებში. MATLAB ამ ამოცანებს ახორციელებს თავისი ძლიერი მათემატიკური ბიბლიოთეკების საშუალებით.

მაგალითად, დისკრეტული ფურიეს გარდაქმნა (DFT) და მისი ეფექტური ალგორითმი – სწრაფი ფურიეს გარდაქმნა (FFT) – MATLAB-ში შესაძლებელია ერთბაშად განხორციელდეს მარტივი ბრძანებით:

$$Y = \text{fft}(x);$$

სადაც x წარმოადგენს სიგნალის ნიმუშებს, ხოლო Y — მის სპექტრულ გამოსახულებას.

ასეთი გამარტივებული სინტაქსი იძლევა საშუალებას კვლევითი ამოცანები სწრაფად გადაიქცეს მოდელირებად შედეგად და შემდგომ ეტაპზე განხორციელდეს ვიზუალიზაცია, შედარება ან შემდგომი დამუშავება.

MATLAB-ში სიგნალის დამუშავების ერთ-ერთი ძირითადი ამოცანაა ფილტრაცია, რომელიც საშუალებას გვაძლევს სიგნალი გავწმინდოთ ხმაურიდან— ანუ სასარგებლო სიგნალის გამოყოფა ხმაურიანი მონაცემებიდან ან პირიქით კვლევისთვის საჭირო შემთხვევაში სიგნალს დავამატოთ ხმაური (მაგ. გაუსის თეტირიდიტური ხმაური).

ასეთი სიმარტივე MATLAB-ს აქცევს უნივერსალურ ხელსაწყოდ ექსპერიმენტული სიგნალების დასამუშავებლად, განსაკუთრებით იმ შემთხვევებში, როდესაც საჭიროა მაღალი სიზუსტე და სწრაფი ვიზუალური კონტროლი.

MATLAB-ის გამოყენება სიგნალის მთლიანობისა და პასიურობის შეფასებაში: სიგნალის მთლიანობა (Signal Integrity) და სისტემის პასიურობა თანამედროვე ელექტრონულ კომუნიკაციებში წარმოადგენს კრიტიკულ ასპექტს. MATLAB-ის ხელსაწყოებში, განსაკუთრებით **RF Toolbox** და **DSP System Toolbox**, იძლევა საშუალებას ჩატარდეს S-პარამეტრების ანალიზი, ფურიეს გარდაქმნებზე დაფუძნებული მოდელირება და ჰილბერტის გარდაქმნის საშუალებით კაუზალობის შემოწმება.

მაგალითად, S21 პარამეტრის რეალურ და ნამდვილ კომპონენტებზე ჰილბერტის გარდაქმნის გამოყენებით შესაძლებელია კაუზალობის ტესტის შესრულება:

$$\text{hil} = \text{hilbert}(\text{imag}(S21));$$

$$\text{real_part_est} = \text{real}(\text{hil});$$

ასეთი მიდგომა MATLAB-ს აქცევს მნიშვნელოვან კვლევით პლატფორმად ელექტრონული წრედების მოდელირებისა და ვერიფიკაციისთვის.

MATLAB-ის უპირატესობები DSP-ში:

- **სისწრაფე და მოქნილობა** – MATLAB იყენებს ოპტიმიზებულ მათემატიკურ ბიბლიოთეკებს, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს გამოთვლით დროს.

- **ინტუიციური ვიზუალიზაცია** – ნებისმიერ შედეგს შეიძლება დაუყოვნებლივ დაემატოს გრაფიკული ანალიზი (მაგ., plot, spectrogram, surf).

- **ინტეგრაცია სხვა სისტემებთან** – MATLAB ადვილად უკავშირდება Python-ს, Simulink-სა და C/C++ გარემოებს.

- **Simulink ინტეგრაცია** – MATLAB-ს ერთვის Simulink მოდელირების პლატფორმა, რომელიც საშუალებას იძლევა დინამიკური სისტემების ბლოკ-სქემური სიმულაცია განხორციელდეს.

- **პლატფორმის სტაბილურობა** – პროგრამა ინარჩუნებს მაღალი სიზუსტის გამოთვლებს და გამჭვირვალე დოკუმენტაციას, რაც აუცილებელია მეცნიერული მუშაობისთვის.

და ბოლოს MATLAB-ის გამოყენება ციფრული სიგნალის დამუშავებაში საშუალებას იძლევა შეიქმნას ზუსტი, სწრაფი და გამჭვირვალე მოდელები, რომლებიც ფუნდამენტურ სისტემის ინტეგრაცია სხვადასხვა მოდულთან — მათ შორის Simulink, Signal Processing Toolbox და RF Toolbox — MATLAB-ს აქცევს ერთ-ერთ მთავარ ტექნოლოგიურ პლატფორმად თანამედროვე სიგნალის დამუშავების კვლევისთვის.

1.3.9 თვალის დიაგრამების ანალიზი

მაღალსიხშირის ციფრული არხების დასახასიათებლად მრავალი გზა არსებობს, რომელთა მიზანია არხის შესაბამისობის ამსახველი კონკრეტული სიგნალის მთლიანობის მეტრიკის გადამოწმება. სასარგებლოა ისეთი ფაქტორები, როგორცაა S-პარამეტრები და წინაღობა, ციფრული ბიტური ნაკადით შესაფასებელი ერთი მნიშვნელოვანი საზომი: თვალის დიაგრამა.

თვალის დიაგრამა სასარგებლო გაზომვა ან სიმულაციაა არხის შესაბამისობის დასადგენად. გაზომვა აჩვენებს მრავალ სხვადასხვა ფაქტორს, რომლებსაც შეუძლიათ ერთდროულად იმოქმედონ სიგნალის ქცევაზე, რაც საბოლოო ჯამში საშუალებას იძლევა არხში შეცდომებისა და დანაკარგების კვალიფიკაციის დასადგენად.

ციფრულ სისტემებში არხის დიზაინის შესაფასებლად გამოყენებული ერთ-ერთი ფუნდამენტური საზომი არის თვალის დიაგრამა. ეს გულისხმობს ბიტ ნაკადის აღმავალი და დაღმავალი კიდეების გადაფარვას დროის დომენის შერჩევის კვალში, მაგალითად, ოსცილოსკოპის გამოყენებით. სიგნალის მთლიანობის სიმულატორს შეუძლია შეასრულოს სიგნალის დონეების იგივე ტიპის სუპერპოზიცია. აღმავალი და დაღმავალი კიდეების გადაფარვით, ადვილია სიგნალის ქცევის ვარიაციის დონის ვიზუალიზაცია.

ამ გაზომვის შედეგად განსაზღვრული ძირითადი სიდიდეებია ვარიაციები, რომლებმაც შეიძლება ბიტური შეცდომის სიხშირე გამოიწვიოს. გადაფარებული სიგნალის კვალის გამოყენებით, შესაძლებელია სტატისტიკის აღება დროის დომენის გაზომვების სხვადასხვა წერტილში.

თვალის დიაგრამა გვეხმარება ერთი გაზომვიდან ინფორმაციის სიმრავლის რაოდენობრივად განსაზღვრაში. თვალის დიაგრამის გაზომვიდან პირდაპირ შეგიძლიათ შემდეგი ინფორმაციის ამოღება:

- **დროის რხევა:** აღმავალი/დაღმავალი ინიციაციის ვარიაცია პირდაპირ თვალის დიაგრამიდან ჩანს, როდესაც გადართვის დროს სიგნალის გადაკვეთებს უყურებთ. ეს ხსნის როგორც შემთხვევით ხმაურს, ასევე დროის გადახრას დიფერენციალურ წყვილში.
- **სიგნალის დონის ვარიაცია:** ჩვენ ადვილად დავინახავთ, თუ როგორ იცვლება სიგნალის დონე. ზოგადად, ეს დროის რხევისა და სხვა შემთხვევითი ხმაურის გარკვეული ფუნქციაა. სიგნალის დონეები ასევე შეიძლება განსხვავდებოდეს წინააღმდეგობის შეუსაბამობის მიხედვით.
- **საშუალო აწევა/დაწევის დრო:** ეს უდრის დროს სიგნალის საშუალო 90%-იან და სიგნალის საშუალო 10%-იან დონეს შორის. ეს როგორც არხის რეაქციასთან, ასევე სისტემაში არსებულ ხმაურთან არის დაკავშირებული. თუ არის ძლიერი არეკვლა, ხმაური ან ISI, აწევა/დაწევის დრო შეიძლება არ იყოს გლუვი და შეიძლება გამოვლინდეს პლატოები ან ძლიერი ვარიაცია.
- **სიმბოლოს საშუალო ხანგრძლივობა:** ეს არის დრო სიგნალის თანმიმდევრული გადაკვეთების შუა წერტილებს შორის.

- **ბიტური შეცდომის სიხშირე (BER):** ლოგიკური ზღურბლების თვალის დიაგრამაზე მიღებულ ბიტებთან შედარებით, შესაძლებელია ბიტური შეცდომის სიხშირის დადგენა. ეს მნიშვნელობა დამოკიდებული იქნება რამდენიმე ფაქტორზე, მაგრამ სასურველი მნიშვნელობა შეიძლება იყოს 10-12 ან უფრო დაბალი. ისეთი ტექნიკები, როგორცაა გათანაბრება და წინასწარი ხაზგასმა, BER მნიშვნელობების შემცირების ორი გზაა. მაგალითად, დინამიური უკუკავშირის გათანაბრება (DFE) გამოიყენება 400G-სთვის PAM-4-ით (Zachariah 2022).

როგორ აიგება თვალის დიაგრამა:

- *სიგნალის მიღება:* ციფრული სიგნალი გადაიცემა ოსცილოგრაფზე.
- *სინქრონიზაცია:* ოსცილოგრაფი სინქრონიზდება სიგნალის ტაქტურ სიხშირესთან.
- *გაზომვების დაფარვა:* ოსცილოგრაფი ასახავს სიგნალის მრავალჯერად გაზომვებს, რომლებიც გადაფარება ხდება ერთმანეთზე.
- *დიაგრამის ფორმირება:* გადაფარვის შედეგად მიიღება დამახასიათებელი ფიგურა, რომელიც ჰგავს თვალს.

თვალის დიაგრამის აგება

თვალის დიაგრამები იყენებენ ციფრული სიგნალის პერიოდულ სტრუქტურას. გარე სინქრონიზაციის წყალობით, ტალღის ფრონტისგან გაზომვის ერთეულ ბიჯად აღებული პერიოდის განმავლობაში მიღებული ოსცილოგრამების ერთმანეთზე დადება ხდება.

აზომვების დაგროვების შედეგად მიიღება თვალის დიაგრამა, რომლის ორდინატთა ღერძზე იდება სიგნალების ამპლიტუდა, ხოლო აბსცისის ღერძზე - დრო.

თვალის დიაგრამის ფორმირების მაგალითი პირდაპირ წყაროს გამოსავალზე და ხაზოვანი ტრაქტის გამოსავალზე. რეალური სიგნალის ოსცილოგრამა იჭრება სიმბოლოებად სინქრონიზაციის გენერატორის ტაქტური იმპულსების შესაბამისად, შემდეგ კი თვალის დიაგრამა "იკრიბება" მიღებული ნაწილებისგან. იდეალურ შემთხვევაში, ფილტრაციის არარსებობისას, ასეთი დამატების შედეგად მიიღება

კვადრატი ("კვადრატული თვალი"). თუმცა, რეალური სიგნალის თვალის დიაგრამა მნიშვნელოვნად განსხვავდება კვადრატისგან, რადგან შეიცავს სიგნალის ფრონტის აწევის და დაცემის კომპონენტებს, მართკუთხა იმპულსი კი ზარის ფორმას იღებს, შედეგად მიიღება დიაგრამა, რომელიც უფრო ჰგავს თვალს. თვალის დიაგრამების შესწავლა საშუალებას იძლევა ჩატარდეს ციფრული სიგნალის დეტალური ანალიზი პარამეტრების მიხედვით, რომლებიც პირდაპირ კავშირშია ტალღის ფრონტის ფორმასთან: სიმბოლთაშორისი ინტერფერენციის (ISI) პარამეტრი, მონაცემთა გადაცემის ჯიტერი, სინქრონიზაციის ჯიტერი და სხვა მახასიათებლები.

რას გვეუბნება თვალის დიაგრამა:

- **ხმაური:** თუ "თვალი" ძალიან გაბუნებულია, ეს ნიშნავს, რომ სიგნალში ბევრი ხმაურია.
- **სიმბოლთაშორისი ჩარევა:** თუ "თვალის" შიგნით არის სხვა სიგნალების კვალი, ეს ნიშნავს, რომ მეზობელი სიმბოლოები ერთმანეთს ერევა.
- **დეფორმაცია:** თუ "თვალის" ფორმა მნიშვნელოვნად განსხვავდება იდეალურიდან, ეს ნიშნავს, რომ სიგნალი დეფორმირებულია გადაცემის დროს.

რატომ არის მნიშვნელოვანი თვალის დიაგრამა:

- **სიგნალის ხარისხის შეფასება:** თვალის დიაგრამის მიხედვით შეგვიძლია განვსაზღვროთ, რამდენად კარგად გადაიცემა ციფრული სიგნალი.
- **პრობლემების იდენტიფიკაცია:** თუ თვალის დიაგრამა არ არის იდეალური, ეს ნიშნავს, რომ სისტემაში არის პრობლემები, რომლებიც უნდა გამოსწორდეს.
- **სისტემის ოპტიმიზაცია:** თვალის დიაგრამის ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია გავაუმჯობესოთ სისტემის პარამეტრები და გავზარდოთ სიგნალის ხარისხი.

თავი 2. პარამეტრების ვერიფიკაციის თეორიული და პრაქტიკული მიდგომები

2.1 ელექტრონული წრედის პარამეტრების ვერიფიკაციის არსი

ელექტრონული წრედების დიზაინისა და წარმოების სფეროში, „პარამეტრის“ კონცეფცია მოიცავს რაოდენობრივად განსაზღვრადი ატრიბუტების ფართო სპექტრს, რომლებიც განსაზღვრავენ წრედის ელექტრულ ქცევას. ეს პარამეტრები მოიცავს კომპონენტების ფუნდამენტურ მახასიათებლებს, როგორცაა წინაღობა, ტევადობა და ინდუქციურობა პასიურ ელემენტებში, აქტიური მოწყობილობების უფრო რთულ თვისებებამდე, როგორცაა ტრანზისტორები, მათ შორის ზღურბლის ძაბვა და დენის მომატება. გარდა ამისა, პარამეტრების კატეგორიზაცია შესაძლებელია მათი ბუნების მიხედვით, განასხვავებენ პასიურ და აქტიურ კომპონენტებს, ასევე სტატიკურ მნიშვნელობებს, რომლებიც მუდმივად რჩება კონკრეტულ პირობებში და დინამიურ პარამეტრებს, რომლებიც იცვლება დროსა და სიხშირეზე. ამ პარამეტრების მნიშვნელობების სიზუსტე უმნიშვნელოვანესია ნებისმიერი ელექტრონული წრედის განკუთვნილი ფუნქციონალურობისა და ოპტიმალური მუშაობის უზრუნველსაყოფად. შემუშავებული პარამეტრების მნიშვნელობებიდან გადახრებმა შეიძლება გამოიწვიოს არასასურველი შედეგების კასკადი, რაც საბოლოოდ გავლენას მოახდენს საბოლოო პროდუქტის საიმედოობასა და უსაფრთხოებაზე.

ელექტრონული წრედის პარამეტრების ვერიფიკაცია უმნიშვნელოვანესი ეტაპია, რომელიც მოიცავს წრედის მთელ სასიცოცხლო ციკლს, მისი საწყისი კონცეპტუალიზაციისგან მასობრივ წარმოებამდე და საბოლოო ტესტირებამდე. ეს პროცესი აუცილებელია რამდენიმე მიზეზის გამო. პირველ რიგში, არასწორმა პარამეტრებმა შეიძლება გამოიწვიოს წრედის გაუმართაობა, როდესაც წრედი ვერ ასრულებს დასახულ დავალებას. მაგალითად, ძაბვის გამყოფში რეზისტორის არასწორმა მნიშვნელობამ შეიძლება გამოიწვიოს გამომავალი ძაბვა შემდგომი კომპონენტებისთვის მისაღებ დიაპაზონს მიღმა. მეორეც, მაშინაც კი, თუ წრედი ფუნქციონირებს, მისი მუშაობა შეიძლება მნიშვნელოვნად გაუარესდეს. ფილტრის წრედში არასწორად შერჩეულმა კონდენსატორმა შეიძლება გამოიწვიოს სიგნალის არასაკმარისი შესუსტება ან დამახინჯება. მესამე, პარამეტრებში უზუსტობამ

შეიძლება ხელი შეუწყოს საიმედოობის პრობლემებს, რამაც შესაძლოა დროთა განმავლობაში გამოიწვიოს კომპონენტების ან მთელი სისტემის ნაადრევი უკმარისობა. ექსტრემალურ შემთხვევებში, განსაკუთრებით მაღალი სიმძლავრის ან უსაფრთხოებისთვის კრიტიკულ აპლიკაციებში, არასწორმა პარამეტრებმა შეიძლება საფრთხე შეუქმნას უსაფრთხოებას. პარამეტრების ვერიფიკაციის მნიშვნელობა აშკარაა ელექტრონული პროდუქტის შემუშავების ყველა ეტაპზე, მათ შორის საწყისი დიზაინის ფაზაში, სადაც სიმულაციები გამოიყენება წრედის ქცევის პროგნოზირებისთვის; პროექტირების ეტაპზე - აქ ფასდება ფიზიკური კომპონენტები, წარმოების პროცესში მთავარია თანმიმდევრულობა და საბოლოო ტესტირების ფაზა - სადაც აწყობილი პროდუქტი ვალიდირებულია მისი სპეციფიკაციების შესაბამისად.

პარამეტრების საფუძვლიანი შემოწმების საჭიროების დასაკმაყოფილებლად შემუშავდა ალგორითმებისა და ტექნიკის მრავალფეროვანი ნაკრები. ეს ალგორითმები შეიძლება დაიყოს რამდენიმე ძირითად მიდგომად. სიმულაციაზე დაფუძნებული მეთოდები იყენებს პროგრამულ ინსტრუმენტებს ელექტრონული სქემების ქცევის მოდელირებისთვის მათი კომპონენტის პარამეტრებისა და ურთიერთკავშირების საფუძველზე. ანალიტიკური ტექნიკა ეყრდნობა მათემატიკურ განტოლებებსა და სქემების თეორიის პრინციპებს პარამეტრებს შორის ურთიერთობების გამოსათვლელად ან გამოსატანად. სტატისტიკური მეთოდები აღიარებს კომპონენტების წარმოებისა და ექსპლუატაციის პირობებში თანდაყოლილ ცვალებადობას და იყენებს სტატისტიკურ ანალიზს პარამეტრების ვარიაციების სქემის მუშაობაზე გავლენის შესაფასებლად. და ბოლოს, მოწინავე მიდგომები, მათ შორის ხელოვნური ინტელექტისა და მანქანური სწავლების გამოყენებით, ძლიერ ინსტრუმენტებად იქცევა თანამედროვე ელექტრონული სქემების მზარდი სირთულის დასაძლევად. ალგორითმების თითოეული კატეგორია წარმოადგენს საკუთარ უპირატესობებსა და ნაკლოვანებებს, განსაკუთრებით სიზუსტესა და გამოთვლით ღირებულებას შორის კომპრომისთან დაკავშირებით, ასევე მათ შესაფერისობას სხვადასხვა ტიპის სქემებისა და პარამეტრებისთვის.

ნებისმიერი ელექტრონული წრედის ფუნდამენტური სისწორე და დანიშნულება პირდაპირ კავშირშია მისი შემადგენელი პარამეტრების სიზუსტესთან.

არასწორი პარამეტრები ყოველთვის იწვევს სასურველი წრედის ფუნქციონალურობიდან გადახრებს. ყველა ელექტრონული წრედი შექმნილია მისი კომპონენტების კონკრეტული მნიშვნელობების საფუძველზე. თუ ეს მნიშვნელობები არასწორია წარმოების ვარიაციების, დიზაინის შეცდომების ან გარემო ფაქტორების გამო, წრედი არ იმუშავებს ისე, როგორც მოსალოდნელი იყო. მაგალითად, ძაბვის გამყოფში რეზისტორის არასწორი მნიშვნელობა გამოიწვევს არასწორ გამომავალ ძაბვას, რაც პოტენციურად იმოქმედებს წრედის შემდგომ ეტაპებზე. გარდა ამისა, წრედის პარამეტრის ტიპი და ბუნება, იქნება ეს სტატიკური თუ დინამიური, პასიური თუ აქტიური, მნიშვნელოვნად მოქმედებს შესაბამისი დამოწმების ალგორითმების არჩევანზე. სტატიკური პარამეტრის, როგორცაა რეზისტორის წინააღმდეგობა, დამოწმება შეიძლება მარტივ გაზომვის ტექნიკას ან DC ანალიზს მოიცავდეს. თუმცა, დინამიური პარამეტრის, როგორცაა ტრანზისტორის გადართვის სიჩქარე, დამოწმება დროის დომენის ანალიზს მოითხოვს სიმულაციის ან სპეციალიზებული საზომი აღჭურვილობის გამოყენებით. ანალოგიურად, აქტიური კომპონენტის პარამეტრები ხშირად მოითხოვს უფრო რთულ მოდელირებისა და დამოწმების ტექნიკას პასიურ კომპონენტებთან შედარებით. ეფექტური პარამეტრის დამოწმება ელექტრონული პროდუქტის მთელი სასიცოცხლო ციკლის განმავლობაში კრიტიკული მეკარის როლს ასრულებს, რაც ხელს უშლის ძვირადღირებული შეცდომების შემდგომ ეტაპებზე გავრცელებას. არასწორი პარამეტრის იდენტიფიცირება დიზაინის ფაზაში სიმულაციის გზით გაცილებით ნაკლებად ძვირი და შრომატევადია, ვიდრე იგივე პრობლემის აღმოჩენა მასობრივი წარმოების შემდეგ. ადრეული ვერიფიკაცია ამცირებს გამოწვევების, პროდუქტის გაუმართაობის და რეპუტაციის დაზიანების რისკს. გარდა ამისა, თანამედროვე ელექტრონული სქემების მზარდი სირთულე და მინიატურიზაცია ფიზიკურ შემოწმებას და პარამეტრების ხელით შემოწმებას სულ უფრო ართულებს, რაც აუცილებელს ხდის დახვეწილ ავტომატიზირებულ ვერიფიკაციის ალგორითმებზე დაყრდნობას. მილიარდობით ტრანზისტორიანი ინტეგრირებული სქემების შემთხვევაში შეუძლებელია თითოეული კომპონენტის პარამეტრების ხელით შემოწმება. ავტომატიზირებული ალგორითმები და სიმულაციის ინსტრუმენტები აუცილებელია ამ რთული სისტემების სისწორის

დასადასტურებლად. პარამეტრის ვერიფიკაციის ალგორითმის არჩევანი წარმოადგენს კომპრომისს ისეთ ფაქტორებს შორის, როგორცაა სიზუსტე, გამოთვლითი რესურსები, სქემის სირთულე და შემოწმებული კონკრეტული პარამეტრები. მარტივ ანალოგურ სქემთან მომუშავე დიზაინერმა შეიძლება აირჩიოს ანალიტიკური მეთოდები მათი სიჩქარისა და უშუალოობის გამო. თუმცა, რთული ციფრული ინტეგრირებული სქემის დიზაინერი, სავარაუდოდ, საიმედოდ დაეყრდნობა სიმულაციაზე დაფუძნებულ ტექნიკას მრავალ კომპონენტს შორის რთული ურთიერთქმედების გამო. გამოთვლითი სიმძლავრისა და ალგორითმების შემუშავების უწყვეტი განვითარება იწვევს პარამეტრების ვერიფიკაციის უფრო დახვეწილ და ეფექტურ ტექნიკებს, რაც საშუალებას იძლევა სულ უფრო რთული და საიმედო ელექტრონული სისტემები შეიქმნას.

2.2. სიმულაციაზე დაფუძნებული ვერიფიკაციის ალგორითმები

სქემის სიმულაცია თანამედროვე ელექტრონული სქემების დიზაინის ქვაკუთხედს წარმოადგენს, რომელიც მძლავრ მეთოდოლოგიას უზრუნველყოფს სქემების ქცევის ანალიზისთვის მათი შემადგენელი კომპონენტებისა და მათი ურთიერთკავშირების მათემატიკური მოდელების შექმნით. ეს სიმულატორები რიცხვით მეთოდებს იყენებენ სქემის ელექტრული მახასიათებლების აღმწერი განტოლებების რთული ნაკრებების ამოსახსნელად, რაც ინჟინრებს საშუალებას აძლევს იწინასწარმეტყველონ და გააანალიზონ სქემის მუშაობა სხვადასხვა საოპერაციო პირობებში ფიზიკური პროტოტიპების საჭიროების გარეშე. არსებობს სქემების სიმულატორების მრავალფეროვანი სპექტრი, რომელთაგან თითოეული მორგებულია სქემებისა და ანალიზის კონკრეტულ ტიპებზე. SPICE (სიმულაციური პროგრამა ინტეგრირებული სქემების აქცენტით) და მისი მრავალი წარმოებული, როგორცაა PSpice და LTSpice, ფართოდ გამოიყენება ზოგადი დანიშნულების ანალოგური და შერეული სიგნალის სქემების სიმულაციისთვის. სპეციალიზებული სიმულატორები ასევე ხელმისაწვდომია კონკრეტული დომენებისთვის, მათ შორის RF სქემებისა და დენის ელექტრონიკისთვის, რაც ხშირად გვთავაზობს გაუმჯობესებულ სიზუსტეს და ეფექტურობას ამ კონკრეტული აპლიკაციებისთვის. ეს სიმულაციური

ინსტრუმენტები ვირტუალური პროტოტიპების როლს ასრულებს, რაც ინჟინრებს საშუალებას აძლევს შეამოწმონ და გადაამოწმონ სქემის პარამეტრები და ქცევა ფიზიკურ წარმოებაზე გადასვლამდე, რითაც მნიშვნელოვნად ამცირებენ განვითარების დროსა და ხარჯებს. სქემისა და მისი კომპონენტების მათემატიკური მოდელის შექმნით, სიმულატორები საშუალებას იძლევიან გააანალიზონ სხვადასხვა საოპერაციო პირობები და პარამეტრების ვარიაციები ფიზიკური დიზაინის რეალიზებამდე. ეს პროაქტიული მიდგომა პოტენციური პრობლემების ადრეული იდენტიფიცირებისა და გამოსწორების საშუალებას იძლევა, რაც საბოლოო ჯამში უფრო მტკიცე და საიმედო დიზაინამდე მიგვიყვანს.

სიმულაციაზე დაფუძნებული ვერიფიკაციის ფარგლებში, ანალიზის რამდენიმე განსხვავებული ტიპი ემსახურება სხვადასხვა პარამეტრის მახასიათებლებისა და წრედის ქცევის ვერიფიკაციას. DC ანალიზი, ასევე ცნობილი როგორც DC სამუშაო წერტილის ანალიზი, ფოკუსირებულია წრედში სტაციონარული ძაბვის და დენის განსაზღვრაზე მუდმივი DC შეყვანის პირობებში. ამ ტიპის სიმულაცია ფასდაუდებელია სტატიკური პარამეტრების ვერიფიკაციისთვის, როგორცაა გადახრის ძაბვა და დენი, რომლებიც ადგენენ აქტიური მოწყობილობების, როგორცაა ტრანზისტორები, მუშაობის პირობებს. DC ანალიზის შესრულებით, ინჟინრებს შეუძლიათ დაადგინონ, იწვევს თუ არა რეზისტორების არასწორი მნიშვნელობები ძაბვის ან დენის არასწორ გაყოფას, ან ტრანზისტორები სწორად თუ არიან გადახრილი მათი დასაშვები ცდომილების ფარგლებში. AC ანალიზი, ანუ AC მცირე სიგნალის ანალიზი, წრედის რეაქციას იკვლევს მცირე სინუსოიდურ სიგნალებზე სიხშირეების დიაპაზონში. ეს მეთოდი გადამწყვეტია სიხშირეზე დამოკიდებული პარამეტრების, როგორცაა სიმძლავრე, გამტარობა და წინაღობა, ვერიფიკაციისთვის. AC სიმულაცია საშუალებას აძლევს ინჟინრებს შეამოწმონ კონდენსატორის და ინდუქტორის მნიშვნელობების სისწორე და მათი გავლენა წრედის სიხშირულ რეაქციაზე, როგორცაა ფილტრების გათიშვის სიხშირეები ან მორგებული წრედების რეზონანსული სიხშირეები. გარდამავალი ანალიზი, მეორე მხრივ, იკვლევს წრედის ქცევას დროთა განმავლობაში დროში ცვალებადი შეყვანის სიგნალების, როგორცაა იმპულსები ან კვადრატული ტალღები, საპასუხოდ. ამ ტიპის სიმულაცია

აუცილებელია დინამიური პარამეტრების დასადასტურებლად, მათ შორის: ზრდის (rise time), ვარდნის (fall time), გავრცელების და დაყოვნების (delay) დროს (კრიტიკულად მნიშვნელოვანი ციფრული წრედებისთვის) და სიგნალის ტალღურ ფორმებში არასასურველი ეფექტების არსებობისთვის, როგორცაა გადაჭარბება ან დაცემა. გარდამავალი ანალიზი ციფრული წრედების დროის მახასიათებლების დასადასტურებლად განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გადართვის ან სხვა გარდამავალი მოვლენების დროს. მით უფრო იმ წრედების რომლებიც შეიცავენ ენერჯის შენახვის ელემენტებს, როგორცაა კონდენსატორები და ინდუქტორები, ქცევის გასაგებად .

კომპონენტების ტოლერანტობის ზღვრების სქემის მუშაობაზე გავლენის შესაფასებლად, მონტე კარლოს ანალიზი ძლიერ სტატისტიკურ მიდგომას უზრუნველყოფს. ეს ტექნიკა ერთი და იგივე სქემის მრავალჯერადი სიმულაციის ჩატარებას გულისხმობს, მაგრამ თითოეული კომპონენტის მნიშვნელობები შემთხვევით იცვლება მისი განსაზღვრული ტოლერანტობის დიაპაზონში. ამ სიმულაციების დიდი რაოდენობით შესრულებით, ინჟინრებს შეუძლიათ ძირითადი შესრულების მეტრიკის, როგორცაა გამომავალი ძაბვა ან ენერგომოხმარება, სტატისტიკური განაწილების გენერირება. ეს საშუალებას იძლევა ალბათური გაგებით გავიგოთ, თუ როგორ იმოქმედებს პარამეტრის მნიშვნელობების ვარიაციები, რეზისტორების, კონდენსატორების, ტრანზისტორების და ა.შ. წარმოების ტოლერანტობის გამო, სქემის საერთო მუშაობაზე. მონტე კარლოს ანალიზი ხელს უწყობს იმის შემოწმებას, საკმარისად მყარია თუ არა სქემის დიზაინი, რომ იმუშაოს მისაღებ ზღვრებში ამ გარდაუვალი ვარიაციების მიუხედავად. მონტე კარლოს ანალიზის დამატებაა ყველაზე ცუდი შემთხვევის ანალიზი, რომლის მიზანია პარამეტრის ვარიაციების გამო სქემის უკიდურესი შესრულების ზღვრების იდენტიფიცირება. კომპონენტების მნიშვნელობების შემთხვევითი ცვლილების ნაცვლად, ყველაზე ცუდი შემთხვევის ანალიზი გულისხმობს სქემის სიმულირებას კომპონენტების მნიშვნელობებით, რომლებიც განზრახ დაყენებულია მათ უკიდურეს ტოლერანტობის ზღვრებზე ისე, რომ მაქსიმალურად ან მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი საინტერესო კონკრეტული შესრულების მეტრიკა. S პარამეტრების

მნიშვნელობების კომბინაციის დადგენას უწყობს ხელს, რომელიც საუკეთესო და ყველაზე ცუდი შესრულების სცენარებს იწვევს, როგორცაა მაქსიმალური სიმძლავრის გაფრქვევა ან გამომავალი ძაბვის მინიმალური მომატება. ამ შესრულების საზღვრების დადგენით, ინჟინრებს შეუძლიათ უზრუნველყონ, რომ სქემამ გააგრძელოს თავისი სპეციფიკაციების დაკმაყოფილება კომპონენტების მნიშვნელობების ყველა შესაძლო კომბინაციის პირობებში მათი ტოლერანტობის დიაპაზონში.

სიმულაციური ანალიზის სხვადასხვა ტიპი გვთავაზობს წრედის ქცევის ურთიერთშემავსებელ ხედვას, რაც სხვადასხვა პარამეტრზე დამოკიდებული მახასიათებლების ყოვლისმომცველი გადამოწმების საშუალებას იძლევა. DC ანალიზი უზრუნველყოფს, რომ წრედი მუშაობს სწორ სტატიკურ წერტილში, AC ანალიზი ამოწმებს მის სიხშირულ რეაქციას, გარდამავალი ანალიზი ამოწმებს მის დინამიურ ქცევას, ხოლო მონტე კარლოს და უარესი შემთხვევის ანალიზი აფასებს მის მდგრადობას კომპონენტების ვარიაციების მიმართ. ანალიზის თითოეული ტიპი ეხება პარამეტრების სისწორის და წრედის საერთო ფუნქციონირების კონკრეტულ ასპექტებს. გარდა ამისა, მონტე კარლოს და ყველაზე ცუდი შემთხვევის ანალიზები გადამწყვეტია ელექტრონული წრედების წარმოებისა და საიმედოობის უზრუნველსაყოფად, კომპონენტის პარამეტრების თანდაყოლილი ცვალებადობის გათვალისწინებით. რეალურ კომპონენტებს არასდროს აქვთ ზუსტად მათი ნომინალური მნიშვნელობები; ისინი ყოველთვის ავლენენ გარკვეულ ტოლერანტობას. სტატისტიკური სიმულაციის მეთოდები ეხმარება დიზაინერებს გაიგონ წრედის მუშაობის პოტენციური დიაპაზონი ამ ვარიაციების გამო და შექმნან წრედები, რომლებიც საკმარისად მდგრადია მათ, რეალურ კომპონენტებს ნომინალური მნიშვნელობების, მიუხედავად სწორად ფუნქციონირებისთვის. კომპონენტების ცვალებადობის ეს პროაქტიული გათვალისწინება პირდაპირ გავლენას ახდენს წარმოებული პროდუქტის მოსავლიანობასა და გრძელვადიან საიმედოობაზე. სიმულაციაზე დაფუძნებული გადამოწმების ეფექტურობა დიდად არის დამოკიდებული სიმულატორში გამოყენებული კომპონენტების მოდელების სიზუსტეზე. თუ ეს მოდელები ზუსტად არ წარმოადგენენ რეალური კომპონენტების

ქცევას, სიმულაციის შედეგები გარდაუვლად არასანდო იქნება. ამიტომ, მნიშვნელოვანი და სანდო სიმულაციური შედეგების მისაღებად აუცილებელია კომპონენტის მოდელების ფრთხილად შერჩევა და ემპირიულ მონაცემებთან საფუძვლიანი ვალიდაცია. სიმულაციური პროგრამული უზრუნველყოფის განვითარება და მძლავრი გამოთვლითი აპარატურის მზარდი ხელმისაწვდომობა აფართოებს სიმულაციაზე დაფუძნებული ვერიფიკაციის შესაძლებლობებს, რაც საშუალებას იძლევა სულ უფრო რთული ელექტრონული სისტემების ანალიზი უფრო დიდი სიზუსტითა და ეფექტურობით განხორციელდეს. ეს ტენდენცია ამცირებს მვირადღირებულ და შრომატევად ფიზიკურ პროტოტიპებზე დამოკიდებულებას, მნიშვნელოვნად აჩქარებს დიზაინის ციკლს და ხელს უწყობს უფრო დახვეწილი ელექტრონული პროდუქტების შემუშავებას.

2.3 ანალიტიკური ვერიფიკაციის ტექნიკა

ანალიტიკური ვერიფიკაციის ტექნიკები ელექტრონული წრედის პარამეტრების სისწორის შესაფასებლად ალტერნატიულ მიდგომას გვთავაზობს, რომელიც წრედის თეორიისა და მათემატიკური განტოლებების ფუნდამენტურ პრინციპებსა და მათემატიკურ განტოლებებს ეყრდნობა. ეს მეთოდები ხშირად ზუსტ ან სიმბოლურ გადაწყვეტილებებს იძლევა, რაც წრედის პარამეტრებსა და წრედის საერთო ქცევას შორის ურთიერთკავშირის უფრო ღრმა გაგებას წარმოგვიდგენს. რიცხვით მიახლოებებზე დაყრდნობით სიმულაციაზე დაფუძნებული მეთოდებისგან განსხვავებით, ანალიტიკურ ტექნიკას ზუსტი შედეგების მოტანა შეუძლია, განსაკუთრებით უფრო მარტივი წრედებისთვის ან უფრო რთული დიზაინის კონკრეტული ასპექტებისთვის.

ანალიტიკური დადასტურების ერთ-ერთი ყველაზე ძირითადი ფორმაა პირდაპირი გამოთვლა და გაზომვა. ისეთი ფუნდამენტური კანონების გამოყენებით, როგორცაა ომის კანონი ($V=IR$), კირხოფის დენის კანონი ($KCL, \Sigma I=0$) და კირხოფის ძაბვის კანონი ($KVL, \Sigma V=0$), ინჟინრებს შეუძლიათ გამოთვალონ მოსალოდნელი პარამეტრების მნიშვნელობები წრედში არსებული სხვა ცნობილი პარამეტრების საფუძველზე. მაგალითად, თუ რეზისტორზე ძაბვა და მისი წინააღობა ცნობილია,

მასში გამავალი დენი შეიძლება პირდაპირ გამოითვალოს ოჰმის კანონის გამოყენებით. ანალოგიურად, ფიზიკურ წრედში, პარამეტრების დადასტურება შესაძლებელია პირდაპირი გაზომვით ისეთი ინსტრუმენტების გამოყენებით, როგორცაა მულტიმეტრები წინააღმდეგობის, ძაბვის და დენის დასადგენად, ოსცილოსკოპები ძაბვის ტალღური ფორმებისა და სიხშირის დასაკვირვებლად და წინაღობის ანალიზატორები ტევადობის, ინდუქციურობის და წინაღობის გასაზომად. მიუხედავად იმისა, რომ პირდაპირი გაზომვა უზრუნველყოფს წრედის პარამეტრების რეალურ სამყაროში ვალიდაციას, მას აქვს შეზღუდვები, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც საქმე ეხება ინტეგრირებული სქემების შიდა პარამეტრებს, რომლებიც ხშირად მიუწვდომელია, ან პარამეტრებს, რომლებიც დროთა განმავლობაში სწრაფად იცვლება, რაც მოითხოვს სპეციალიზებულ მაღალი გამტარობის ინსტრუმენტაციას.

სიმბოლური ანალიზი წარმოადგენს უფრო მოწინავე ანალიტიკურ ტექნიკას, რომელიც გულისხმობს წრედის ქცევის მათემატიკური გამოსახულებების მიღებას, როგორცაა გამომავალი ძაბვა ან გადაცემის ფუნქცია, სიმბოლური კომპონენტის პარამეტრების (მაგ., $R1$, $C2$, gm) თვალსაზრისით. ეს მიდგომა საშუალებას იძლევა შემოწმდეს წრედის მუშაობის ფუნქციური დამოკიდებულება კომპონენტების მნიშვნელობებზე რიცხვითი მნიშვნელობების ჩანაცვლების გარეშე. ამ სიმბოლური გამოსახულებების მანიპულირებით, ინჟინრებს შეუძლიათ გადაამოწმონ სხვადასხვა პარამეტრებს შორის დამოკიდებულებები და გაარკვიონ, შეესაბამება თუ არა ისინი დიზაინის სპეციფიკაციებს. მაგალითად, გამაძლიერებლის წრედში, სიმბოლურ ანალიზს შეუძლია გამოავლინოს, თუ როგორ არის გაძლიერებული დაკავშირებული ტრანზისტორის კონკრეტულ პარამეტრებთან და რეზისტორის მნიშვნელობებთან. რამდენიმე პროგრამული ინსტრუმენტი და მათემატიკური პლატფორმა, როგორცაა სპეციალიზებული სიმბოლური წრედის ანალიზის პროგრამული უზრუნველყოფა და ზოგადი დანიშნულების მათემატიკური პროგრამული უზრუნველყოფა, როგორცაა Mathematica ან Maple, მხარს უჭერს სიმბოლურ წრედის ანალიზს, ავტომატიზირდება ხშირად რთული ალგებრული მანიპულაციები. სიმბოლური ანალიზი უზრუნველყოფს ძლიერ გზას პარამეტრის ცვლილებების თვისებრივი გავლენის გასაგებად წრედის ქცევაზე და დიზაინის განტოლებების მისაღებად, რომლებიც

პირდაპირ აკავშირებს მუშაობას კომპონენტების მნიშვნელობებთან. გამაძლიერებლის გაძლიერების სიმბოლური გამოსახულების მიღებით, დიზაინერს შეუძლია პირდაპირ დაინახოს, თუ როგორ იმოქმედებს კონკრეტული რეზისტორის ან ტრანზისტორის პარამეტრის მნიშვნელობის შეცვლა გაძლიერების მაჩვენებელზე, მრავალი სიმულაციის ჩატარების გარეშე. ეს ხელს უწყობს დიზაინის ოპტიმიზაციას და წრედის მგრძობელობის უფრო ღრმა გაგებას.

მოდელზე დაფუძნებული პარამეტრების ამოღება კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი ანალიტიკური ტექნიკაა, რომელიც ფოკუსირებულია კომპონენტის მოდელის პარამეტრების მნიშვნელობების განსაზღვრაზე გაზომილი მონაცემების საფუძველზე. ეს პროცესი, როგორც წესი, მოიცავს კომპონენტების მათემატიკური მოდელების გამოყენებას, როგორცაა ტრანზისტორებისა და დიოდების SPICE მოდელები, და მოდელის განტოლებების ექსპერიმენტულ მონაცემებთან მორგებას, როგორცაა გაზომილი დენის და ძაბვის მახასიათებლები, სხვადასხვა ტექნიკა, მათ შორის ოპტიმიზაციის ალგორითმები და მრუდის მორგების მეთოდები, გამოიყენება იმ პარამეტრის მნიშვნელობების მოსაძებნად, რომლებიც საუკეთესოდ შეესაბამება მოდელის პროგნოზებსა და გაზომილ შედეგებს. მოდელზე დაფუძნებული პარამეტრების ამოღება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ინდივიდუალურად შემუშავებული კომპონენტების დასახასიათებლად ან წარმოებულ მოწყობილობებში პარამეტრების ვარიაციების იდენტიფიცირებისთვის. მაგალითად, მისი გამოყენება შესაძლებელია ტრანზისტორის ფაქტობრივი ზღურბლის ძაბვის დასადგენად დამზადების შემდეგ, რომელიც შეიძლება განსხვავდებოდეს მონაცემთა ცხრილებში მოცემული ტიპური მნიშვნელობებისგან. ეს ტექნიკა ავსებს უფსკრულს თეორიულ მოდელებსა და დამზადებული კომპონენტების რეალურ ქცევას შორის, რაც უფრო ზუსტი სიმულაციისა და ანალიზის გამოყენების საშუალებას იძლევა, რომლებიც ასახავს წარმოებული მოწყობილობების სპეციფიკურ მახასიათებლებს.

და ბოლოს, ფორმალური ვერიფიკაციის მეთოდები იყენებს მათემატიკურ ლოგიკას და ავტომატიზირებულ მსჯელობას, რათა უზრუნველყოს მკაცრი მიდგომა წრედის ქცევის სისწორის ფორმალური სპეციფიკაციის მიმართ. ეს ტექნიკა განსაკუთრებით გამოიყენება ციფრულ წრედებში, სადაც სავარაუდო ქცევა შეიძლება

ზუსტად იქნას აღწერილი მათემატიკური ლოგიკის გამოყენებით. ფორმალური ვერიფიკაციის გამოყენება შესაძლებელია ციფრულ წრედებში კრიტიკული პარამეტრების, როგორცაა დროის შეზღუდვები და ლოგიკური სისწორე, დასადასტურებლად და დიზაინის წესების დაცვის უზრუნველსაყოფად, როგორცაა ფლიპ-ფლოპების დაყენების და დაყოვნების დრო. ფორმალური ვერიფიკაციის ინსტრუმენტებისა და მეთოდოლოგიების მაგალითებია მოდელის შემოწმება და თეორემების დამტკიცება. ფორმალური ვერიფიკაცია ციფრული წრედის პარამეტრებისა და ქცევის სისწორის მაღალ ხარისხს უზრუნველყოფს მათემატიკური მტკიცებულებების მიწოდებით, ნაცვლად სიმულაციაზე დაფუძნებული ტესტირებისა. სიმულაციისგან განსხვავებით, რომელსაც შეუძლია მხოლოდ შეზღუდული რაოდენობის სცენარების შემოწმება, ფორმალურ ვერიფიკაციას შეუძლია ამომწურავად გააანალიზოს ციფრული წრედის ყველა შესაძლო მდგომარეობა და გადასვლა, რაც უზრუნველყოფს სპეციფიკაციების დაკმაყოფილებას ყველა თავის პირობებში. სიზუსტის ეს დონე განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კრიტიკული აპლიკაციების უსაფრთხოებისთვის, სადაც ნებისმიერ გაუმართაობას შეიძლება სერიოზული შედეგები მოჰყვეს.

ანალიტიკური მეთოდები მათემატიკური ურთიერთობების მეშვეობით იძლევა იმის ფუნდამენტურ გაგებას, თუ როგორ მოქმედებს წრედის პარამეტრები წრედის ქცევაზე. სქემის პარამეტრების შესრულების მეტრიკასთან დამაკავშირებელი განტოლებების გამოყვანით, დიზაინერებს შეუძლიათ მიიღონ პირდაპირი წარმოდგენა წრედის მუშაობის ძირითადი პრინციპების შესახებ და იმის შესახებ, თუ როგორ მოქმედებს ერთი პარამეტრის ცვლილებები სხვებზე. მიუხედავად იმისა, რომ პირდაპირი გაზომვა უზრუნველყოფს წრედის პარამეტრების რეალურ სამყაროში დადასტურებას, ის შემოიფარგლება საზომი ინსტრუმენტების სიზუსტით და წრედში არსებული პარამეტრების ხელმისაწვდომობით. მიუხედავად იმისა, რომ მულტიმეტრს შეუძლია ზუსტად გაზომოს დისკრეტული რეზისტორის წინააღმდეგობა, მას არ შეუძლია პირდაპირ გაზომოს ტრანზისტორის არხის წინააღმდეგობა ინტეგრირებულ წრედში. ანალოგიურად, სწრაფად ცვალებადი

პარამეტრების გაზომვას სჭირდება სპეციალიზებული მაღალი გამტარუნარიანობის ინსტრუმენტები.

2.4. სტატისტიკური მეთოდები ვერიფიკაციისთვის

ელექტრონული სქემების დიზაინისა და წარმოებისას უმნიშვნელოვანესია კომპონენტის პარამეტრებში არსებული თანდაყოლილი ცვალებადობის აღიარება. ეს ცვალებადობა წარმოიშობა წარმოების პროცესებიდან, რომლებიც კომპონენტების მითითებულ მნიშვნელობებში ტოლერანტობას აწესებს, და სამუშაო პირობების ვარიაციებიდან, როგორცაა ტემპერატურა და ძაბვის რყევები. შესაბამისად, ვერიფიკაციისთვის მხოლოდ ნომინალურ პარამეტრულ მნიშვნელობებზე დაყრდნობამ შეიძლება გამოიწვიოს წრედის მუშაობის არაზუსტი პროგნოზები რეალურ სცენარებში. სტატისტიკური მეთოდები ძლიერ ჩარჩოს უზრუნველყოფს ამ გამოწვევის გადასაჭრელად, პარამეტრების სტატისტიკური განაწილების გათვალისწინებით და არა მხოლოდ მათი იდეალური მნიშვნელობების გათვალისწინებით.

ტოლერანტობის ანალიზი არის ძირითადი სტატისტიკური მეთოდი, რომელიც გამოიყენება კომპონენტების ტოლერანტობის გავლენის შესაფასებლად სქემის საერთო მუშაობაზე. ეს გულისხმობს ანალიზს, თუ როგორ ვრცელდება ცალკეული კომპონენტის პარამეტრების ცვალებადობა წრედში, რომელიც ჩვეულებრივ განისაზღვრება მათი ნომინალური მნიშვნელობების გარშემო ტოლერანტობის დიაპაზონით, წრედში და როგორ მოქმედებს კრიტიკულ შესრულების მეტრიკაზე. ისეთი ტექნიკა, როგორცაა კვადრატული ჯამის (RSS) მეთოდი, გამოიყენება კომპონენტების ცალკეული ტოლერანტობის სტატისტიკურად გაერთიანებისთვის, შესრულების პარამეტრის საერთო ტოლერანტობის შესაფასებლად, იმ ვარაუდით, რომ სხვადასხვა კომპონენტში ვარიაციები სტატისტიკურად დამოუკიდებელია. ყველაზე ცუდი შემთხვევის ანალიზს ასევე შეიძლება მივუდგეთ სტატისტიკური პერსპექტივიდან, ყველა კომპონენტის ტოლერანტობის დიაპაზონის უკიდურესი ბოლოების ერთდროულად გათვალისწინებით, სქემის მუშაობის საზღვრების დასადგენად. სიმულაციებსა და ანალიტიკურ გამოთვლებში პარამეტრის ვარიაციების

ზუსტი მოდელირებისთვის, ხშირად გამოიყენება სტატისტიკური განაწილება. კომპონენტებისთვის, რომელთა ვარიაციები მიჰყვება ზარის ფორმის მრუდს, ჩვეულებრივ გამოიყენება გაუსის (ან ნორმალური) განაწილება. იმ შემთხვევებში, როდესაც პარამეტრის მნიშვნელობა თანაბრად სავარაუდოა, რომ მოხვდეს კონკრეტულ დიაპაზონში, ერთგვაროვანი განაწილება შეიძლება უფრო მიზანშეწონილი იყოს. ტოლერანტობის ანალიზი ხელს უწყობს სქემის მუშაობის მოსალოდნელი დიაპაზონის დადგენას კომპონენტების ვარიაციების გამო, რაც საშუალებას აძლევს დიზაინერებს უზრუნველყონ, რომ სქემა აკმაყოფილებდეს თავის სპეციფიკაციებს ამ გარდაუვალი ვარიაციების მიუხედავად. სქემის მუშაობის სიმულირებით ან ანალიტიკური გამოთვლით კომპონენტების მნიშვნელობების სხვადასხვა კომბინაციის პირობებში მათი ტოლერანტობის ფარგლებში, დიზაინერებს შეუძლიათ პოტენციური უკმარისობის წერტილების იდენტიფიცირება და დიზაინის შეცვლა მისი მდგრადობის გასაუმჯობესებლად.

მგრძნობელობის ანალიზი კიდევ ერთი ღირებული სტატისტიკური მეთოდია, რომელიც ფოკუსირებულია იმის რაოდენობრივ განსაზღვრაზე, თუ რამდენად მოქმედებს წრედის მუშაობაზე ინდივიდუალური პარამეტრების მნიშვნელობების ცვლილებები. მგრძნობელობის კოეფიციენტების გამოთვლით, ინჟინრებს შეუძლიათ განსაზღვრონ, რომელ პარამეტრებს აქვთ ყველაზე მნიშვნელოვანი გავლენა კონკრეტულ მაჩვენებლებზე, როგორცაა გამომავალი ძაბვა ან გაძლიერება. ამ კრიტიკული პარამეტრების იდენტიფიცირება კრიტიკულად მნიშვნელოვანია, რადგან ის საშუალებას აძლევს დიზაინერებს, პრიორიტეტი მიანიჭონ იმ კომპონენტებს, რომლებიც საჭიროებენ უფრო მკაცრ კონტროლს წარმოების დროს და უფრო ფრთხილად შერჩევას დიზაინის ფაზაში. მაგალითად, თუ წრედის მუშაობა ძალიან მგრძნობიარეა კონკრეტული რეზისტორის მნიშვნელობის მიმართ, დიზაინერმა შეიძლება აირჩიოს რეზისტორი უფრო მკაცრი ტოლერანტობით ან ხელახლა დააპროექტოს წრედი ისე, რომ ნაკლებად იყოს დამოკიდებული ამ კონკრეტულ მნიშვნელობაზე. მგრძნობელობის ანალიზი ღირებულ ინფორმაციას იძლევა დიზაინის სისუსტეების შესახებ იმ პარამეტრების გამოყოფით, რომლებსაც

ყველაზე მეტი გავლენა აქვთ მუშაობაზე, რითაც ხელმძღვანელობს ოპტიმიზაციაზე ძალისხმევას.

ელექტრონული სქემებისა და კომპონენტების წარმოების პროცესში, სტატისტიკური პროცესის კონტროლი (SPC) სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვან როლს ასრულებს თანმიმდევრული ხარისხის უზრუნველყოფაში. SPC გულისხმობს სტატისტიკური მეთოდების გამოყენებას წარმოების პროცესის მონიტორინგისა და კონტროლისთვის, რაც პარამეტრების მნიშვნელობების გადახრების აღმოჩენას და თავიდან აცილებას მიზნად ისახავს, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს დეფექტური პროდუქტები. საკონტროლო დიაგრამები არის SPC-ის საერთო ინსტრუმენტი, რომელიც გამოიყენება დროთა განმავლობაში პროცესის ვარიაციების თვალყურის დევნებისთვის, რაც საშუალებას აძლევს მწარმოებლებს დაადგინონ, როდის გამოდის პროცესი კონტროლიდან რომ მიიღონ მაკორექტირებელი ზომები. წარმოების პროცესის დროს ძირითადი პარამეტრების მუდმივი მონიტორინგით, SPC ხელს უწყობს იმის უზრუნველყოფას, რომ წარმოებული კომპონენტებისა და სქემების პარამეტრები დარჩეს დასაშვებ სტატისტიკურ ზღვრებში, რაც პროდუქტის თანმიმდევრულ ხარისხსა და საიმედოობას იწვევს. SPC ხელს უწყობს სამიზნე მნიშვნელობებიდან ნებისმიერი გადახრის იდენტიფიცირებას და გამოსწორებას, სანამ ისინი დეფექტური პროდუქტების მნიშვნელოვან რაოდენობას გამოიწვევენ.

ექსპერიმენტების დიზაინი (DOE) არის ძლიერი მეთოდოლოგია, რომელიც იყენებს სტატისტიკურ პრინციპებს მრავალი პარამეტრის სქემის მუშაობაზე გავლენის სისტემატურად შესასწავლად. იმ მეთოდებისგან განსხვავებით, რომლებიც ერთდროულად ცვლიან ერთ პარამეტრს, DOE გულისხმობს ექსპერიმენტების დაგეგმვასა და ჩატარებას, სადაც მრავალი შეყვანის პარამეტრი ერთდროულად იცვლება სტრუქტურირებული გზით, რათა დადგინდეს მათი ინდივიდუალური და კომბინირებული ეფექტები გამომავალზე. ეს მიდგომა საშუალებას აძლევს ინჟინრებს დაადგინონ ოპტიმალური პარამეტრები და გაიგონ პარამეტრებს შორის პოტენციური ურთიერთქმედება, სადაც ერთი პარამეტრის ეფექტი შეიძლება დამოკიდებული იყოს მეორის მნიშვნელობაზე. DOE-ს შეუძლია მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს სქემის მდგრადობა და შეამციროს ცვალებადობა პარამეტრების პოვნით, რომლებსაც

მინიმუმამდე დაჰყავს შესრულების მგრძობელობა კომპონენტის მნიშვნელობების ვარიაციების მიმართ. ექსპერიმენტების დიზაინი უზრუნველყოფს სტრუქტურირებულ მიდგომას, მრავალ სქემის პარამეტრს შორის რთული ურთიერთობების და მათ შორი გავლენის გაგების შესრულებაზე, რაც ოპტიმიზებულ და საიმედო დიზაინს უზრუნველყოფს. ერთდროულად ერთი პარამეტრის ცვალებადობის ნაცვლად, DOE საშუალებას აძლევს დიზაინერებს ეფექტურად შეისწავლონ დიზაინის სივრცე და დაადგინონ პარამეტრის მნიშვნელობების ოპტიმალური კომბინაცია, რომელიც აკმაყოფილებს შესრულების მოთხოვნებს, ვარიაციების გავლენის მინიმიზაციისას.

სქემის პარამეტრებში სტატისტიკური ვარიაციების ამოცნობა და რაოდენობრივი განსაზღვრა აუცილებელია ზუსტი და საიმედო ელექტრონული სისტემების შესაქმნელად, რომლებიც თანმიმდევრულად მუშაობენ წარმოების ტოლერანტობისა და გარემო ცვლილებების მიუხედავად. სქემის მხოლოდ ნომინალურ კომპონენტების მნიშვნელობებზე დაყრდნობით დაპროექტებამ შეიძლება გამოიწვიოს წარმოების ჩავარდნები, თუ კომპონენტების ფაქტობრივი მნიშვნელობები მნიშვნელოვნად გადახრილია მათი ნომინალური მნიშვნელობებისგან. სტატისტიკური ანალიზი ხელს უწყობს ამ პრობლემების პროგნოზირებას და შემცირებას. მგრძობელობის ანალიზი ხელს უწყობს იმ პარამეტრების პრიორიტეტულობის განსაზღვრას, რომლებიც საჭიროებენ უფრო მკაცრ კონტროლს წარმოების დროს ან უფრო ფრთხილად შერჩევას დიზაინის დროს. ყველაზე მგრძობიარე პარამეტრების იდენტიფიცირებით, ინჟინრებს შეუძლიათ თავიანთი ძალისხმევა მათი ცვალებადობის მინიმიზაციაზე ან კომპონენტების უფრო მაღალი სიზუსტით შერჩევაზე გაამახვილონ. SPC გადამწყვეტ როლს ასრულებს იმის უზრუნველყოფაში, რომ წარმოებული კომპონენტებისა და სქემების პარამეტრები დარჩეს დასაშვებ სტატისტიკურ ზღვრებში, რაც პროდუქტის თანმიმდევრულ ხარისხსა და საიმედოობას იწვევს. წარმოების პროცესში ძირითადი პარამეტრების მუდმივი მონიტორინგით, SPC ხელს უწყობს სამიზნე მნიშვნელობებიდან ნებისმიერი გადახრის იდენტიფიცირებას და გამოსწორებას, სანამ ისინი მნიშვნელოვან რაოდენობის დეფექტურ პროდუქტებამდე მიგვიყვანს.

2.5. ინოვაციური ალგორითმები და ახალი ტენდენციები

ელექტრონული წრედების პარამეტრების ვერიფიკაციის სფერო მუდმივად ვითარდება, რაც განპირობებულია წრედების მზარდი სირთულით და უფრო მაღალი ხარისხისა და საიმედოობის მოთხოვნით. ამ კრიტიკული სფეროს მომავალს რამდენიმე მოწინავე ალგორითმი და ახალი ტენდენცია განსაზღვრავს.

თუმცა ტრადიციული ტექნიკები ძირითადად ორიენტირებულია მხოლოდ სიზუსტის გაუმჯობესებაზე, მაგრამ სრულად ვერ უზრუნველყოფს ფიზიკური თანხვედრის აუცილებელ კრიტერიუმებს, როგორცაა კაუზალობა და პასიურობა. ამ შეზღუდვების დასაძლევად Torun და მისი ჯგუფი (2019) გვთავაზობენ ახალ მიდგომას, სადაც ნეირონულ ქსელებში ინტეგრირდება კაუზალობისა და პასიურობის Enforcement ფენები. აღნიშნული მეთოდი მნიშვნელოვნად ამცირებს შემდგომი კორექციის საჭიროებას და უფრო სტაბილურ შედეგებს იძლევა. შედარებით, Vector Fitting და SVD-ზე დაფუძნებული ალგორითმები ეფექტიანია მხოლოდ მოდელირების შეცდომების მინიმიზაციის კუთხით, მაგრამ ვერ უზრუნველყოფენ სრულფასოვნად ფიზიკური კრიტერიუმების დაცვას. შესაბამისად, Torun-ის ჯგუფის მიდგომა წარმოადგენს თანამედროვე ალტერნატივას, რომელიც აერთიანებს ნეირონული ქსელების მოქნილობასა და ფიზიკური რეალობის დაცვას (Hakki M. Torun 2019).

ხელოვნური ინტელექტის (AI) და მანქანური სწავლების (ML) ტექნიკის გამოყენება მნიშვნელოვან პოპულარობას იძენს სქემის პარამეტრების ვერიფიკაციაში. მანქანური სწავლების მოდელების, როგორცაა ნეირონული ქსელები და დამხმარე ვექტორული მანქანები, მომზადება შესაძლებელია სიმულაციის შედეგების ან გაზომილი მონაცემების დიდ მონაცემთა ნაკრებებზე, რათა შეისწავლონ სქემის პარამეტრებსა და შესრულების მეტრიკებს შორის რთული ურთიერთობები. ტრენინგის შემდეგ, ამ მოდელებს პოტენციურად შეუძლიათ ახალი სქემების დიზაინის მუშაობის პროგნოზირება ბევრად უფრო სწრაფად, ვიდრე ტრადიციული სიმულაციის მეთოდები, განსაკუთრებით მაღალი სირთულის სქემებისთვის. გარდა ამისა, ხელოვნური ინტელექტით მართული ანომალიების აღმოჩენის ალგორითმები შეიძლება გამოყენებულ იქნას გაუმართავი კომპონენტების ან არასწორი პარამეტრების იდენტიფიცირებისთვის გაზომილი მონაცემების ან სიმულაციის

შედეგების საფუძველზე, რომლებიც მნიშვნელოვნად გადახრილია მოსალოდნელი ნიმუშებისგან. ასევე იზრდება პოტენციური სქემის პარამეტრების ხელოვნური ინტელექტით მართული ოპტიმიზაციისთვის კონკრეტული შესრულების მიზნების მისაღწევად და კომპონენტების მნიშვნელობების ავტომატურად რეგულირებით სასურველი მახასიათებლების მისაღწევად, რომელთა ხელით მიღწევა შეიძლება რთული ან შრომატევადი იყოს. ხელოვნური ინტელექტი და მანქანური სწავლება გვთავაზობს პოტენციალს, მნიშვნელოვნად დააჩქაროს და გააუმჯობესოს პარამეტრების ვერიფიკაცია სქემის ქცევაში რთული ურთიერთობებისა და ნიმუშების შესწავლით, რომელთა ანალიტიკურად ან ტრადიციული სიმულაციის საშუალებით მოდელირება შეიძლება რთული იყოს. ხელოვნური ინტელექტის მოდელების სიმულაციის შედეგების ან გაზომილი მონაცემების დიდ მონაცემთა ნაკრებებზე ტრენინგით, შესაძლებელია ახალი სქემების დიზაინის მუშაობის სწრაფად პროგნოზირება ან პოტენციური პრობლემების იდენტიფიცირება ფართომასშტაბიანი სიმულაციების საჭიროების გარეშე. მსგავს მიდგომებს აღწერს Torun და თანამგზავრები, რომლებიც სქემის მოდელირებაში ნეირონულ ქსელებს პასიურობისა და კაუზალობის უზრუნველსაყოფად იყენებენ ; ასევე Beckers & Colombo სადაც განხილულია physics-informed learning-ის პოტენციური რთულ სისტემებში (Torun, Hakki, და სხვ. 2020, 1-3), (Beckers და Colombo 2025).

ოპტიმიზაციის ალგორითმები წარმოადგენს მოწინავე ტექნიკის კიდევ ერთ კლასს, რომელიც გამოიყენება წრედის პარამეტრებისთვის საუკეთესო შესაძლო მნიშვნელობების მოსაძებნად, რომლებიც აკმაყოფილებენ წინასწარ განსაზღვრულ დიზაინის შეზღუდვებსა და შესრულების მოთხოვნებს. ეს ალგორითმები სისტემატურად იკვლევენ პარამეტრულ სივრცეს, რათა გამოავლინონ ის მნიშვნელობები, რომლებიც ან მაქსიმალურად ან მინიმუმამდე დაიყვანება კონკრეტულ მიზნობრივ ფუნქციას, როგორცაა წრედის მუშაობა ან ენერგომოხმარება, გარკვეული შეზღუდვების დაცვით. ხშირად გამოყენებული ოპტიმიზაციის ალგორითმების მაგალითებია გენეტიკური ალგორითმები, რომლებიც შთაგონებულია ბიოლოგიური ევოლუციის პრინციპებით; ნაწილაკების გროვის ოპტიმიზაცია, რომელიც ბაძავს ფრინველთა გუნდების ან თევზების

გუნდურობის სოციალურ ქცევას; და გრადიენტზე დაფუძნებული მეთოდები, რომლებიც იტერაციულად არეგულირებენ პარამეტრებს შესრულების ფუნქციის გრადიენტის საფუძველზე. ეს ალგორითმები გამოიყენება პარამეტრების ვერიფიკაციის სხვადასხვა ასპექტში, მათ შორის წრედის ავტომატიზირებულ რეგულირებაში, სადაც კომპონენტების მნიშვნელობები ავტომატურად რეგულირდება სასურველი შესრულების მისაღწევად; პარამეტრების ამოღებაში, სადაც კომპონენტის მოდელისთვის საუკეთესოდ შესაფერისი პარამეტრები განისაზღვრება გაზომილი მონაცემების საფუძველზე; და დიზაინის სივრცის კვლევაში, სადაც ოპტიმალური წრედის ტოპოლოგიები და კომპონენტების მნიშვნელობები მოიძებნება. ოპტიმიზაციის ალგორითმებს შეუძლიათ მოცემული წრედის დიზაინისთვის საუკეთესო შესაძლო პარამეტრის მნიშვნელობების პოვნის პროცესის ავტომატიზირება, რაც მუშაობის გაუმჯობესებას და დიზაინის დროის შემცირებას გამოიწვევს. წრედის პარამეტრების ხელით რეგულირება შეიძლება იყოს დროის შრომატევადი და იტერაციული პროცესი. ოპტიმიზაციის ალგორითმებს შეუძლიათ სისტემატურად მოძებნონ პარამეტრების სივრცე, რათა ის მნიშვნელობები იპოვონ, რომლებიც შესრულებას მაქსიმალურად ზრდის ან დიზაინის კონკრეტულ მიზნებს აკმაყოფილებს (Antoulas და Sorensen, 2022).

მაღალი სირთულის სქემების, განსაკუთრებით ციფრული დიზაინის პარამეტრების ვერიფიკაციისთვის, აპარატურული დახმარებით ვერიფიკაციის ტექნიკა სულ უფრო მნიშვნელოვანი ხდება. ეს მეთოდები იყენებს სპეციალიზებულ აპარატურულ პლატფორმებს, როგორცაა Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs), ვერიფიცირებადი სქემის ემულაციის ან პროტოტიპის შესაქმნელად. აპარატურული ემულაცია გულისხმობს სპეციალური აპარატურის გამოყენებას სქემის ქცევის მაღალი სიჩქარით იმიტაციისთვის, რაც რთული დიზაინების რეალურ ან თითქმის რეალურ დროში ვერიფიკაციის საშუალებას იძლევა. FPGA-ებზე პროტოტიპის შექმნა გულისხმობს სქემის დიზაინის პირდაპირ პროგრამირებად აპარატურაზე დანერგვას, რაც საშუალებას იძლევა პარამეტრების ვერიფიკაციის რეალისტურ სამუშაო პირობებში. აპარატურული დახმარებით ვერიფიკაცია მნიშვნელოვან სიჩქარეს გვთავაზობს ტრადიციულ პროგრამულ სიმულაციასთან შედარებით, რაც

შესაძლებელს ხდის ძალიან დიდი და რთული სქემების ვერიფიკაციის განხორციელებას გონივრულ ვადებში. რთული ინტეგრირებული სქემების პროგრამულ უზრუნველყოფაში სიმულირებას შეიძლება საათები ან თუნდაც დღეები დასჭირდეს. აპარატურულ ემულაციას შეუძლია იგივე ვერიფიკაციის ამოცანების შესრულება ბევრად უფრო სწრაფად, რაც უფრო ყოვლისმომცველი ტესტირებისა და ვალიდაციის საშუალებას იძლევა.

ამ სფეროში ახალი ტენდენციაა ფორმალური მეთოდების სიმულაციასთან ინტეგრაცია. ეს მიდგომა მიზნად ისახავს ფორმალური შემოწმების სიზუსტის სიმულაციის პრაქტიკულობასთან და ფართო გამოყენებადობასთან შერწყმას, რომელიც მათემატიკურ ლოგიკას წრედის ქცევის სისწორის დასამტკიცებლად იყენებს. მაგალითად, ფორმალური მეთოდების გამოყენება შესაძლებელია სიმულაციისთვის სატესტო შემთხვევების გენერირებისთვის, რაც უზრუნველყოფს, რომ სიმულაცია მოიცავდეს ყველა კრიტიკულ სცენარს და სასაზღვრო პირობებს. პირიქითაც, სიმულაცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას ფორმალური მოდელების ვარაუდებისა და სისწორის დასადასტურებლად. ამ ინტეგრაციამ შეიძლება გამოიწვიოს პარამეტრების უფრო ყოვლისმომცველი და საიმედო შემოწმების მიღწევა. ფორმალური მეთოდების სიმულაციასთან ინტეგრაციამ შეიძლება უზრუნველყოს უფრო მყარი და საიმედო შემოწმების მიდგომა ორივე ტექნიკის ძლიერი მხარეების გამოყენებით. ფორმალურ მეთოდებს შეუძლიათ დაამტკიცონ წრედის გარკვეული კრიტიკული თვისებების სისწორე, ხოლო სიმულაცია გამოიყენება მისი ქცევის უფრო ფართო სპექტრის პირობებში შესასწავლად. ამ მიდგომების გაერთიანება გამოიწვევს შემოწმების უფრო ყოვლისმომცველ დაფარვას.

და ბოლოს, ღრუბელში მძლავრი გამოთვლითი რესურსების მზარდი ხელმისაწვდომობა ხელს უწყობს ღრუბელზე დაფუძნებული სიმულაციისა და ვერიფიკაციის ტენდენციას. ღრუბლოვანი პლატფორმები მოთხოვნისამებრ გვთავაზობენ წვდომას უზარმაზარ გამოთვლით რესურსებზე, რაც ინჟინრებს საშუალებას აძლევს შეასრულონ გამოთვლით ინტენსიური წრედის სიმულაციები და პარამეტრების ვერიფიკაციის ამოცანები მნიშვნელოვანი ადგილობრივი აპარატურული ინფრასტრუქტურის საჭიროების გარეშე. ეს მასშტაბირება და

ხელმისაწვდომობა განსაკუთრებით სასარგებლო იქნება მცირე და საშუალო საწარმოებისთვის ან პიკური ვერიფიკაციის მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად. ღრუბელზე დაფუძნებული პლატფორმები დემოკრატიულს ხდის მძლავრ გამოთვლით რესურსებზე წვდომას, რაც მცირე დიზაინის გუნდებსაც კისაშუალებას შეასრულონ რთული სიმულაციები და პარამეტრების ვერიფიკაციის ამოცანები, რომლებიც სხვა შემთხვევაში შეუძლებელი იქნებოდა. გამოთვლით ინტენსიური ამოცანების ღრუბელზე გადატანით, დიზაინერებს შეუძლიათ შეამცირონ ლოკალური აპარატურული მოთხოვნები და დააჩქარონ დიზაინის ციკლები. (Beckers J., Colombo A., 2025, 512-525).

2.6. პრაქტიკული მოსაზრებები და გამოწვევები

მიუხედავად იმისა, რომ ელექტრონული წრედის პარამეტრების სისწორის შესამოწმებლად ალგორითმების ფართო სპექტრი არსებობს, ამ ტექნიკის პრაქტიკული განხორციელება რამდენიმე მნიშვნელოვან მოსაზრებასა და გამოწვევას მოიცავს.

ერთ-ერთი მთავარი გასათვალისწინებელი ფაქტორი კონკრეტული ვერიფიკაციის ამოცანისთვის სწორი ალგორითმის შერჩევაა. შერჩევის პროცესი ყოველთვის მარტივი არ არის და მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული. მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სქემის სირთულე, რომელიც იზომება კომპონენტების რაოდენობით და მათი ურთიერთდაკავშირებით. უფრო რთული სქემები ხშირად სიმულაციაზე დაფუძნებული ან აპარატურული მეთოდების გამოყენებას საჭიროებენ კომპონენტებს შორის რთული ურთიერთქმედების გამო. სქემის ტიპი, იქნება ეს ანალოგური, ციფრული თუ შერეული სიგნალი, ასევე გავლენას ახდენს ალგორითმის არჩევანზე. მაგალითად, დროის ვერიფიკაცია კრიტიკულია ციფრული სქემებისთვის და შეიძლება მოითხოვდეს სპეციალიზებულ სიმულაციურ ტექნიკას ან ფორმალურ ვერიფიკაციას, ხოლო სიხშირული რეაქციის ანალიზი უფრო აქტუალურია ანალოგური სქემებისთვის. დამოწმებული კონკრეტული პარამეტრები ასევე განსაზღვრავს შესაბამის მეთოდს. სტატიკური პარამეტრები, როგორცაა გადახრის წერტილები, შეიძლება ეფექტურად შემოწმდეს DC ანალიზის გამოყენებით, ხოლო

დინამიური პარამეტრები, როგორცაა გადართვის სიჩქარე, მოითხოვს გარდამავალ ანალიზს. საჭირო სიზუსტე და სანდოობის დონე ასევე გადამწყვეტი ფაქტორებია. ფორმალური ვერიფიკაცია უზრუნველყოფს სანდოობის უმაღლეს დონეს, მაგრამ შეიძლება არ იყოს გამოყენებული ყველა ტიპის სქემისთვის ან პარამეტრისთვის. და ბოლოს, ხელმისაწვდომი გამოთვლითი რესურსები და დროის შეზღუდვები ხშირად აწესებს პრაქტიკულ შეზღუდვებს ალგორითმის არჩევანზე. კომპლექსური სიმულაციები შეიძლება იყოს გამოთვლითი თვალსაზრისით ინტენსიური და შრომატევადი, რაც მოითხოვს სიზუსტეს, სიჩქარესა და ღირებულებას შორის კომპრომისების დაწვრილებით განხილვას. პარამეტრის დადასტურების ალგორითმის შერჩევა იშვიათად არის უნივერსალური გადაწყვეტილება და ხშირად მოითხოვს პროექტის კონკრეტული მოთხოვნებისა და შეზღუდვების სწორად შეფასებას.

კიდევ ერთი კრიტიკული გასათვალისწინებელი ფაქტორია მოდელირების სიზუსტე და სანდოობა, განსაკუთრებით სიმულაციაზე დაფუძნებული ვერიფიკაციისთვის. სიმულაციის შედეგების სიზუსტე ფუნდამენტურად შეზღუდულია სიმულატორში გამოყენებული კომპონენტის მოდელების სიზუსტით. ეს მოდელები რეალური სამყაროს კომპონენტების ქცევის მათემატიკური წარმოდგენებია და თავისთავად გამარტივებულია. შესაძლოა, ისინი არ ასახავდნენ რეალური მოწყობილობების ყველა ნიუანსს და იდეალურ მახასიათებლებს, რამაც შეიძლება გავლენა მოახდინოს სიმულაციის შედეგების სანდოობაზე. ამიტომ, აუცილებელია კომპონენტის მოდელების ფრთხილად შერჩევა და საფუძვლიანი ვალიდაცია. ეს ხშირად გულისხმობს სიმულაციის შედეგების შედარებას ფიზიკური კომპონენტების ექსპერიმენტულ გაზომვებთან, რათა უზრუნველყოფილი იყოს, რომ მოდელები ზუსტად ასახავდეს მათ ქცევას შესაბამის საოპერაციო პირობებში. არაზუსტი მოდელების გამოყენებამ შეიძლება მოგვცეს შეცდომაში შემყვანი ვერიფიკაციის შედეგები.

გამოთვლითი რესურსები და დრო მნიშვნელოვან გამოწვევას წარმოადგენს პარამეტრების ვერიფიკაციისას, განსაკუთრებით დიდი და რთული სქემებისთვის. გარკვეული ვერიფიკაციის ალგორითმები, როგორცაა დიდი ციფრული

ინტეგრირებული სქემების გარდამავალი სიმულაცია ან ვრცელი მონტე კარლოს ანალიზები, შეიძლება ძალიან მომთხოვნი იყოს გამოთვლითი სიმძლავრისა და სიმულაციის დროის თვალსაზრისით. ეს მოითხოვს სიმულაციის დროისა და რესურსების გამოყენების ოპტიმიზაციის სტრატეგიებს, როგორცაა ეფექტური სიმულაციური ალგორითმების გამოყენება, დიდი სქემების დაშლა უფრო პატარა, უფრო მართვად ბლოკებად და პარალელური გამოთვლითი ტექნიკის გამოყენება. მაღალი ხარისხის გამოთვლითი პლატფორმები და ღრუბელზე დაფუძნებული რესურსები სულ უფრო მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ ამ გამოთვლით ინტენსიური ვერიფიკაციის ამოცანების გადაჭრაში. პარამეტრების ვერიფიკაციის გამოთვლითი ღირებულება მნიშვნელოვანი ფაქტორია განსაკუთრებით რთული დიზაინისთვის. ეფექტური ალგორითმები და საკმარისი გამოთვლითი რესურსები გადამწყვეტია დროული ვერიფიკაციისთვის.

პარამეტრების ვერიფიკაციისთვის ფიზიკურ გაზომვებზე დაყრდნობისას, მნიშვნელოვანია გავითვალისწინოთ გაზომვის შეზღუდვები და შეცდომები. ყველა საზომ ინსტრუმენტს აქვს გარკვეული შეზღუდვები სიზუსტესა და გარჩევადობასთან დაკავშირებით და თავად გაზომვებზე შეიძლება გავლენა იქონიოს სხვადასხვა ფაქტორმა, როგორცაა ზონდის ეფექტები და გარემოს ხმაური. ამიტომ, სათანადო კალიბრაცია და საზომი ინსტრუმენტების სიზუსტის სპეციფიკაციების გაგება კრიტიკულად მნიშვნელოვანია საიმედო მონაცემების მისაღებად. გარდა ამისა, გარემო ფაქტორებს, როგორცაა ტემპერატურა და ტენიანობა, შეუძლიათ გავლენა მოახდინონ გარკვეული წრედის პარამეტრების მნიშვნელობებზე და ეს ეფექტები გასათვალისწინებელია გაზომვის პროცესში. ფიზიკური გაზომვები, მიუხედავად იმისა, რომ აუცილებელია ვალიდაციისთვის, ექვემდებარება შეზღუდვებსა და შეცდომებს, რომლებიც ყურადღებით უნდა იქნას გათვალისწინებული შედეგების ინტერპრეტაციისას.

და ბოლოს, ვერიფიკაციის ალგორითმების ინტეგრაცია ელექტრონული დიზაინის ავტომატიზაციის (EDA) ინსტრუმენტებთან და დიზაინის ნაკადებთან უმნიშვნელოვანესია ეფექტური და შეუფერხებელი დიზაინის პროცესისთვის. სხვადასხვა პროგრამული პლატფორმებისა და მონაცემთა ფორმატების

ურთიერთთავსებადობა აუცილებელია იმისათვის, რომ ინჟინრებმა მარტივად ჩართონ სხვადასხვა ვერიფიკაციის ტექნიკა თავიანთ სამუშაო პროცესში. შეუფერხებელი ინტეგრაცია ხელს უწყობს დიზაინის მონაცემებისა და სიმულაციის შედეგების გაცვლას სხვადასხვა ინსტრუმენტებს შორის, რაც ამარტივებს საერთო ვერიფიკაციის პროცესს. პარამეტრების ვერიფიკაციის ეფექტურობა იზრდება, როდესაც არჩეული ალგორითმები კარგად არის ინტეგრირებული დიზაინის საერთო სამუშაო პროცესში, რაც მონაცემთა ეფექტური გაცვლისა და ანალიზის საშუალებას იძლევა.

2.7. ვერიფიკაციის ალგორითმების ანალიზი და შერჩევის სტრატეგიები

ელექტრონული წრედის პარამეტრების ვერიფიკაცია საიმედო და მაღალი ხარისხის ელექტრონული სისტემების დიზაინისა და წარმოების შეუცვლელი ასპექტია. ნაშრომში წარმოდგენილია ამ კრიტიკული ამოცანისთვის ხელმისაწვდომი ალგორითმებისა და ტექნიკის მრავალფეროვანი სპექტრის მიმოხილვა, ის მოიცავს სიმულაციაზე დაფუძნებულ მეთოდებს, რომლებიც პროგნოზირებენ წრედის ქცევას, ანალიტიკურ ტექნიკას, გვთავაზობს ზუსტ ან სიმბოლურ გადაწყვეტილებებს, სტატისტიკურ მეთოდებს, რაც ითვალისწინებს კომპონენტების ვარიაციების გამოყენებას და ხელოვნური ინტელექტის, ოპტიმიზაციისა და აპარატურული აჩქარების გამოყენებით მოწინავე მიდგომებს. ალგორითმების თითოეული კატეგორია გამოირჩევა უნიკალური ძლიერი და სუსტი მხარეებით. ყველაზე შესაფერისი მეთოდის შერჩევა დამოკიდებულია წრედის სპეციფიკურ მახასიათებლებზე, შესწავლილ პარამეტრებსა და არსებულ რესურსებზე.

ცხრილი 1. ელექტრონული წრედის პარამეტრების შემოწმების ალგორითმების შედარება.

ალგორითმის კატეგორია	კონკრეტული მაგალითები	ძირითადი გამოყენების შემთხვევები	უპირატესობები	ნაკლოვანებები
სიმულაციაზე დაფუძნებული	SPICE სიმულაცია	კომპლექსური ინტეგრირებუ	დეტალური ქცევის	დიდი წრედებისთვის

	(DC, AC, გარდამავალი, მონტე კარლო)	ლი სქემების დიზაინი, ანალოგური/ციფრული/შერეული სიგნალის სქემები	პროგნოზირება სხვადასხვა პირობებში, არაწრფივობის მართვა	გამოთვლები ინტენსიურია, სიზუსტე დამოკიდებულია მოდელის ხარისხზე
ანალიტიკური	ომის კანონის გამოთვლა, სიმბოლური ანალიზი, ფორმალური დადასტურება	მარტივი წრედის ანალიზი, დიზაინის განტოლებების გამოყვანა, ციფრული ლოგიკის ვერიფიკაცია	ზუსტი გადაწყვეტილებები, პარამეტრების ურთიერთკავშირების შესახებ ინფორმაციის მიწოდება, ფორმალური მეთოდების მაღალი სანდოობა	ფორმალურ დადასტურებას შეზღუდული გამოყენებადობა აქვს პირდაპირი გამოთვლებისა და სიმბოლური ანალიზისთვის განკუთვნილი უფრო მარტივი სქემებით.
სტატისტიკური	ტოლერანტობის ანალიზი, მგრძობელობის ანალიზი, მონტე კარლოს ანალიზი	მდგრადობის ანალიზი, წარმოების ხარისხის კონტროლი	კომპონენტების ვარიაციებისა და გაურკვევლობის მართვა, სტატისტიკური ინფორმაციის მიწოდება	ააჭიროა სტატისტიკური მონაცემები კომპონენტის ვარიაციების შესახებ
გაფართოებული	ხელოვნური ინტელექტის/მანქანური სწავლების პროგნოზირება, ოპტიმიზაციის ალგორითმები, აპარატურის ემულაცია	სწრაფი შესრულების პროგნოზირება, ავტომატური წრედის რეგულირება, რთული კონსტრუქციების მადალსიჩქარა ვერიფიკაცია	უფრო სწრაფი ანალიზისა და ოპტიმიზაციის პოტენციალი, რეალურ დროში ვერიფიკაცია	ხელოვნური ინტელექტი/მანქანური სწავლება მოითხოვს ტრენინგის მონაცემებს, აპარატურის ემულაცია შეიძლება ძვირი იყოს.

ცხრილი 2. პარამეტრების შემოწმების ალგორითმის შერჩევაზე გავლენის მქონე ფაქტორები.

ფაქტორი	გავლენა ალგორითმის არჩევანზე
წრედის სირთულე	მაღალი სირთულე ხშირად სიმულაციას ან აპარატურულ ემულაციას მოითხოვს. უფრო მარტივი სქემები შესაძლოა ანალიტიკური მეთოდების გამოყენებას ექვემდებარებოდეს.
წრედის ტიპი	ანალოგურ სქემებს შეიძლება დასჭირდეთ სიმულაციის სპეციფიკური ტიპები (მაგ., სიხშირული რეაქციის ანალიზი). ციფრული სქემები ხშირად სარგებლობენ დროისა და ლოგიკის ფორმალური ვერიფიკაციით. შერეული სიგნალის სქემებისთვის საჭიროა ინსტრუმენტები, რომლებსაც შეუძლიათ როგორც ანალოგური, ასევე ციფრული დომენების დამუშავება.
საინტერესო პარამეტრები	სტატისტიკური პარამეტრები კარგად ერგება DC ანალიზს. დინამიური პარამეტრები მოითხოვს გარდამავალ ანალიზს. სიხშირეზე დამოკიდებული პარამეტრები გაანალიზებულია AC ანალიზის გამოყენებით. ვარიაციებისადმი მდგრადობა ფასდება სტატისტიკური მეთოდებით.
საჭირო სიზუსტე	მაღალი სიზუსტის მოთხოვნებს უნდა მიესადაგებოდეს დეტალური სიმულაციები ან ფორმალური დადასტურება. დაბალი სიზუსტის მოთხოვნებმა შესაძლოა უფრო სწრაფი, ნაკლებად გამოთვლითი ძალის მქონე მეთოდების გამოყენების საშუალება მოგვცეს.
ხელმისაწვდომი რესურსები	შეზღუდული გამოთვლითი რესურსები შესაძლოა ზღუდავდეს გამოთვლით ინტენსიური სიმულაციური ტექნიკის გამოყენებას. დროის შეზღუდვებმა შესაძლოა უპირატესობა მიანიჭოს უფრო სწრაფ, მაგრამ პოტენციურად ნაკლებად ამომწურავ მეთოდებს. ბიუჯეტის შეზღუდვებმა შესაძლოა ხელი შეუშალოს ძვირადღირებული აპარატურით დამოწმების გამოყენებას.
დროის შეზღუდვები	მკაცრი ვადების გამო, შესაძლოა, საჭირო გახდეს, უფრო სწრაფი შემოწმების მეთოდების გამოყენება, რაც ყოვლისმომცველობის ხარჯზე მოხდება. უფრო ხანგრძლივი ვადები, გამოთვლითი თვალსაზრისით, უფრო საფუძვლიანი და ინტენსიური ანალიზის საშუალებას იძლევა.

თავი 3. სიგნალის მთლიანობის შემოწმების მეთოდები

სიგნალის მთლიანობისთვის სისტემური დონის სიმულაციის წარმატება დამოკიდებულია ქსელურ პარამეტრებზე. კაუზალობა არის ერთ-ერთი აუცილებელი თვისება ქსელური პარამეტრების ხარისხის შემოწმებისთვის. კაუზალური სისტემის გამომავალი სიგნალი არ უნდა დახვდეს შემავალ სიგნალს. ფიზიკური სისტემას აქვს სიგრძე და შესაბამისად დროითი დაყოვნება. აქედან გამომდინარე, ეს შეიძლება იყოს არა მხოლოდ კაუზალური, არამედ კაუზალური სისტემის დაყოვნებაც. ეს ნიშნავს რომ სიგნალი არ უნდა გამოჩნდეს გამოსასვლელზე დაყოვნების მომენტამდე. ერთმანეთისგან განსხვავდება შეცდომის წყაროები, როგორცაა გაზომვის ცდომილება გაზომილი მონაცემებისთვის, რიცხობრივი (დამრგვალები) შეცდომა სიმულირებული მონაცემებისთვის, ამორჩევა, სიხშირული ზოლის შეზღუდვა, ყველაფერი ეს გავლენას ახდენს კაუზალურ სისტემებზე. სიმულაციამდე აუცილებელია შეფასდეს კაუზალობის დარღვევა, რომელიც გამოწვეულია შეცდომების სხვადასხვა წყაროდან. თუ კაუზალობის დარღვევა უმნიშვნელოა, რეკომენდებულია კაუზალური კავშირის გამოყენება, მანამდე, ვიდრე ის გამოიყენება სისტემური დონის სიმულაციისათვის, მაგრამ თუ კაუზალობის დარღვევა მნიშვნელოვანია, მაშინ კაუზალობის უზრუნველყოფის შემდეგ გამომავალი მონაცემები მნიშვნელოვნად შეიცვლება და შესაძლოა რომ სხვა მოდელი მივიღოთ. ამ შემთხვევაში, იმისათვის რომ უფრო ხარისხიანი მონაცემები მივიღოთ, რეკომენდირებულია განმეორებით გაიზომოს ან განმეორებით მოხდეს მოდელირება.

3.1 კაუზალობის შემოწმების მეთოდები

კარგადაა ცნობილი რომ კაუზალობის გადაცემის ფუნქცია ტოლი უნდა იყოს მისი ჰილბერტის გარდაქმნისა.

$$H(\omega) = \frac{1}{j\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(\omega')}{\omega - \omega'} d\omega'. \quad (3.1)$$

აქედან გამომდინარეობს რომ მისი ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილი კაუხალობის გარდაქმნის $H(\omega)$ ფუნქციიდან არ არიან დამოუკიდებლები და შეიძლება აღდგენილი იქნან ერთმანეთისგან.

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(H(\omega)) &= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\operatorname{Im}(H(\omega'))}{\omega - \omega'} d\omega', \\ \operatorname{Im}(U(\omega)) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\operatorname{Re}(V(\omega'))}{\omega - \omega'} d\omega'. \end{aligned} \quad (3.2)$$

ეს ფორმულები ცნობილია როგორც კრამერს-კრონინგის ტოლობები. წარმოსახვით და ნამდვილ ნაწილებს შორის. იმისათვის, რომ შევამოწმოთ კაუხალობა უნდა ვიცოდეთ გადაცემის ფუნქციის ერთ-ერთი კომპონენტი (ნამდვილი ან წარმოსახვითი) და აღვადგინოთ მეორე. რაც შეეხება ინტეგრალებს (3.2) გარდაქმნებში, აიღება სიხშირის უსასრულო ინტეგრალი, მაგრამ სიხშირის გატარების ზოლის შემოსაზღვრულობის გამო ინტეგრალის გამოთვლა შესაძლებელია მხოლოდ მაქსიმალურ სიხშირემდე. ეს შეზღუდვა (3.2) ინტეგრალებს ხდის სინგულარულს მაქსიმალურ სიხშირის მახლობლად, ხოლო გამოთვლის ალგორითმი ხდება არა პრაქტიკული. მაქსიმალურ სიხშირესთან მის განსაკუთრებულობის შესამცირებლად. პ.ტრიპერიო გვთავაზობს გამოვიყენოთ ე.წ. გამოკლება. გამოკლების ძირითადი იდეა იმაში მდგომარეობს, რომ ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილებიდან გამოვთვალოთ მათი ლანგრანჟის პოლინომები და ამრიგად ავირიდოთ სინგულარობა (Tsiklauri, Dikhaminjia და al. 2020).

როგორც აღვნიშნეთ, საჭიროა უზრუნველვყოთ არა მხოლოდ კაუხალობა არამედ დაყოვნების კაუხალობაც. ამ მიზნით, ვიდრე გამოვიყენებთ კრამერს-კრონინგის დამოკიდებულებას ნამდვილ და წარმოსახვით ნაწილებს შორის, უნდა მოვსპოთ დაყოვნება გადაცემის ფუნქციიდან მისი $e^{-j\omega\tau}$ -ზე გამრავლებით, სადაც τ არის სისტემის დაყოვნება გამოსასვლელზე

$$H(\omega) \rightarrow H(\omega)e^{-j\omega\tau}. \quad (3.3)$$

კაუხალობის ამ მეთოდით უზრუნველყოფისათვის უნდა ვივარაუდოთ ან რეალური ან წარმოსახვითი არის სწორი, ხოლო მეორე ნაწილი აღდგება კრამერს-კრონინგის ფორმულის საშუალებით, მაგრამ რეალურ და წარმოსახვით ნაწილებს არ

აქვთ ფიზიკური აზრი და თუ ერთ-ერთ მათგანში არის რაიმე შეცდომა, უნდა ვივარაუდოთ, რომ მეორეშიც იქნება შეცდომა, მათგან განსხვავებით ამპლიტუდა და ფაზა არის სისტემის დამოუკიდებელი ფიზიკური მახასიათებლები. კრამერს-კრონინგის (3.2) შეიძლება დადგინდეს ასევე გადაცემითი ფუნქციის ამპლიტუდასა და ფაზას შორისაც (Triverio და Grivet-Talocia 2006, 65-68).

$$\begin{aligned}\theta(\omega) &= \frac{\omega}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha(\omega')}{\omega^2 - (\omega')^2} d\omega', \\ \alpha(\omega) &= \alpha(0) - \frac{\omega^2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\theta(\omega')}{\omega'(\omega^2 - (\omega')^2)} d\omega'.\end{aligned}\tag{3.4}$$

ამპლიტუდა გაცილებით ზუსტად იზომება ვიდრე ფაზა, ამიტომ თუ გაზომილი ფაზა არა ზუსტია, მისი აღდგენა შეიძლება ამპლიტუდით. ამას გარდა, ეს რეკონსტრუქცია არ არღვევს S პარამეტრების კიდევ ერთ აუცილებელ თვისებას პასიურობას, რომელიც ხანდახან მისი აღდგენის დროსაც შეიძლება რომ მოხდეს. ტრივეროს და მისი გუნდის მიერ შემუშავებული გამოკლების მეთოდი შეიძლება იქნას გამოყენებული ამ აღდგენაში სინგულარობის შესამცირებლად მაქსიმალურ სიხშირესთან ახლოს (Triverio და Grivet-Talocia 2006, 65-68).

მეორე მეთოდი. - კაუზალობის იძულებით განხორციელების - დაკავშირებულია ქსელის რეაქციაზე დროით არეში. მეთოდი დამყარებულია დროით არეში იმპულსის $h(t)$ რეაქციის გაყოფაზე კენტ და ლუწ ნაწილებად, ლუწი ნაწილის იგნორირებით და კენტი ნაწილიდან მისი აღდგენით. თუ ჩვენ ამ ალგორითმის მოდიფიცირებას დაყოვნების კაუზალობისთვის მოვახდენთ, დაყოვნებითი კაუზალობის უზრუნველსაყოფად, მივიღებთ შემდეგ ფორმულას:

$$h_{causal}(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau \\ h(t) + h(2\tau - t), & t > \tau \end{cases}\tag{3.5}$$

შლეფნევის ნაშრომში ნაჩვენებია რომ დროით არეში (3.5) - ფორმულაზე დაფუძნებული იმპულსური რეაქცია დაყოვნების კაუზალობა ექვივალენტურია კრამერს-კრონინგის ტოლობისა შესაბამისი გადაცემის ფუნქციის რეალურ და წარმოსახვით ნაწილებს შორის.

აუცილებელია რომ დაყოვნების კაუზალური საზომი აფასებდეს გადაცემის ფუნქციის არა კაუზალობას. აღნიშნულ ნაშრომში ნაჩვენებია არა კაუზალობის შეფასების ფორმულა სისტემისთვის რომელიც იყენებს იმ ენერგიას რაც მიდის დაყოვნების დრომდე (Shlepnev 2010).

$$NonCausality(h) = \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{\tau} h^2(t) dt}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} h^2(t) dt}} 100\%. \quad (3.6)$$

დაყოვნების კაუზალობის შეფასება, აგრეთვე ფიზიკურ სისტემებში კაუზალობის იძულებით გამოყენებაც ითხოვს დროთი დაყოვნების გამოთვლას.

როგორც ზემოთ უკვე აღნიშნეთ დაყოვნებები გვაქ სამი ტიპის და ისინი გამოითვლებიან (1.12) ფორმულით.

ფრონტალური დაყოვნების პოვნა ძნელია, რამდენადაც ის დამოკიდებულია ფაზურ დაყოვნების უსასრულობაზე, მაგრამ ის შეიძლება მიუახლოვდეს ფაზურ დაყოვნების მინიმუმს მოცემულ სიხშირულ დიაპაზონში.

$$\tau_{fr} \approx \min_{\omega \in [\omega_{min}, \omega_{max}]} \frac{\phi(\omega)}{\omega}. \quad (3.7)$$

მიახლოებითი ფრონტალური დაყოვნება დაკავშირებულია გადაცემის ფუნქციის ყველაზე სწრაფ სიხშირულ მდგენელთან მოცემულ სიხშირულ დიაპაზონში.

3.2. ექსტრაპოლაცია DC-ში

არსებობს რამდენიმე ხერხი დროით არეში იმპულსური რეაქციის მისაღებად გადაცემის ფუნქციიდან. ფართოდ გამოიყენება 2 მიდგომა: ვექტორული მისადაგება (Vector Fitting) და სწრაფი ფურიეს ტრანსფორმაცია (FFT); Vector Fitting-ისთვის ვექტორული გადაცემის გადაცემის ფუნქცია აპროქსიმირდება შემდეგ რაციონალურ ფუნქციასთან.

$$H(s) \approx \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{s - p_i}, \quad (3.8)$$

სადაც p_i და q_i არიან კომპლექსური პოლუსები და რაციონალური ფუნქციის ნარჩენები. მათ სტაბილიზაციისათვის აუცილებელია რომ პოლუსების ნამდვილი ნაწილი იყოს უარყოფითი; $\text{Re}[p_i] < 0$

ეს მიდგომა სშუალებას იძლევა ანალიტიკურად მივიღოთ იმპულსური მახასიათებელი დროით არეში:

$$h(t) = \sum_{i=1}^n q_i e^{p_i t} \quad (3.9)$$

ორივე მეთოდისთვის აუცილებელია მუდმივი დენის კორექტული მნიშვნელობა. აუცილებელია გადაცემის ფუნქციის ექსტრაპოლაცია მუდმივი დენის მნიშვნელობამდე. ფუნქციის ექსტრაპოლაცია, ინტერპოლაციისაგან განსხვავებით არაზუსტია და წინასწარ ვერ გავთვლით შედეგს, მაგრამ თუ გამოვიყენებთ გადაცემის ფუნქციის თვისებას, რომ იგი უნდა იყოს ტოლი თავისი კომპლექსური კონიუგატის უარყოფითი სიხშირეებისთვის:

$$H(-\omega) = H^*(\omega), \quad (3.10)$$

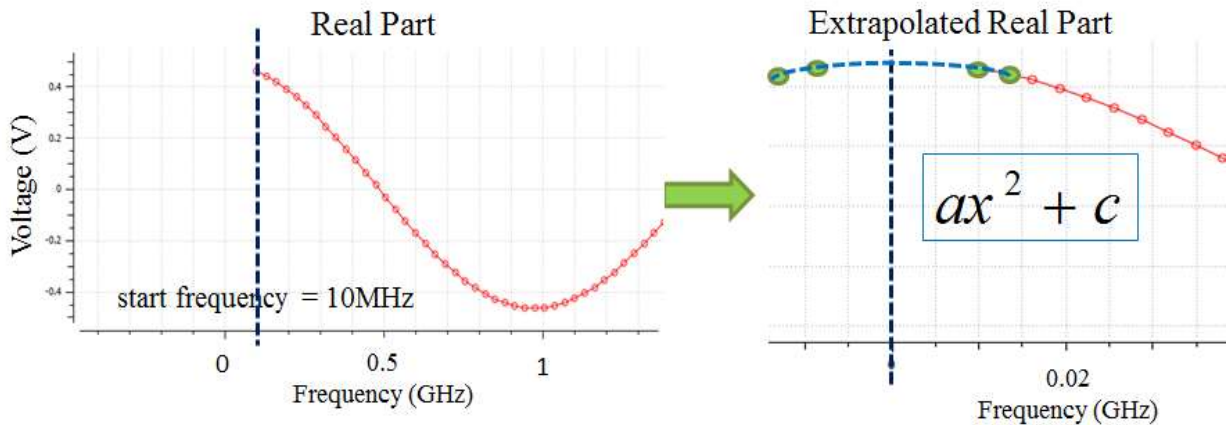
შეიძლება DC ექსტრაპოლაცია გარდავექმნათ ინტერპოლაციის პრობლემებში. გადავწეროთ (3.9) ტოლობა ნამდვილი და წარმოსახვითი ნაწილებისათვის (Tsiklauri, and Zvonkin, და სხვ. 2016).

$$\begin{aligned} \text{Re}(H(-\omega)) &= \text{Re}(H(\omega)), \\ \text{Im}(H(-\omega)) &= -\text{Im}(H(\omega)). \end{aligned} \quad (3.11)$$

მაშინ შესაძლებელია გადაცემის ფუნქციის მნიშვნელობების მიღება პირველი ორი სიხშირული მნიშვნელობებიდან (სიმძლავრიდან) (3.10) ფორმულის თანახმად შეგვიძლია აღვადგინოთ გადაცემის ფუნქციის მნიშვნელობა შესაბამისად სიხშირის უარყოფითი (სიმძლავრე) მნიშვნელობით და ავაგოთ პოლინომი შერჩეული წერტილებისთვის. (3.10)-ს პირველი ტოლობიდან გამომდინარეობს, რეალური (ნამდვილი) ნაწილი არის ლუწი ფუნქცია და შეიძლება მისი აპროქსიმაცია პარაბოლით $ax^2 + b$. ეს პარაბოლა შეიძლება აგებულ იქნას ამ წერტილებზე $\{(-f_2, H_2); (-f_1, H_1); (f_1, H_1); (f_2, H_2)\}$ სადაც f_1 და f_2 არიან პირველი და მეორე სიხშირული მაგალითები. H_1 და H_2 შესაბამისი გადაცემის ფუნქციის მნიშვნელობები. აგებული

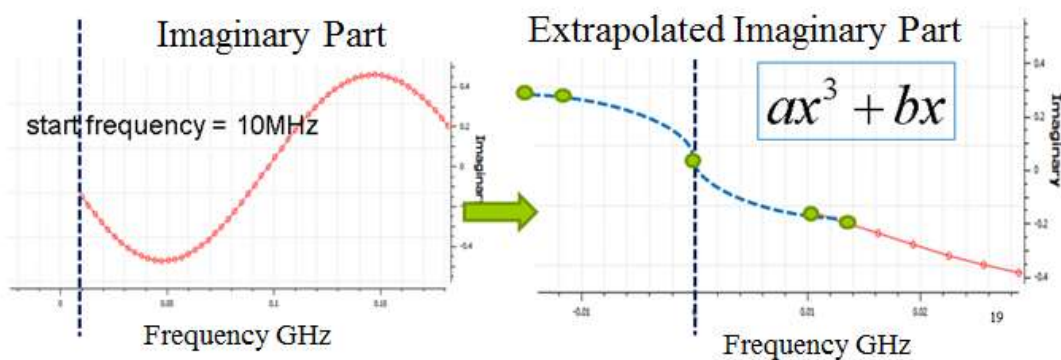
პარაბოლიდან შეიძლება აღვადგინოთ გადაცემის ფუნქციის გამოტოვებული მნიშვნელობები.

ზემოთ აღნიშნული გამოვსახოთ ნახაზით.



ნახ. 5 DC ექსტრაპოლაცია გადაცემის ფუნქციის რეალური ნაწილისთვის. (IEEE Standard for Electrical 2021, 142)

(3.10) -ის მეორე ტოლობიდან გამომდინარეობს, რომ წარმოსახვითი ნაწილი არის კენტი ფუნქცია, რომელიც უდრის 0-ს DC-ში და შეიძლება აპროქსირებული იყოს კუბურ პოლინომში $ax^3 + bx$. ეს პარაბოლა შეიძლება აგებული იქნას შემდეგ წერტილებზე: $\{(-f_2, -H_2); (-f_1, -H_1); (0,0); (f_1, H_1); (f_2, H_2)\}$ აგებული პოლინომიდან (მრავალწევრიდან) შეიძლება აღვადგინოთ გადაცემის ფუნქციის გამოტოვებული მნიშვნელობები. ვიზუალური ახსნა მოცემული ალგორითმისა მოყვანილია ნახ 6-ზე.

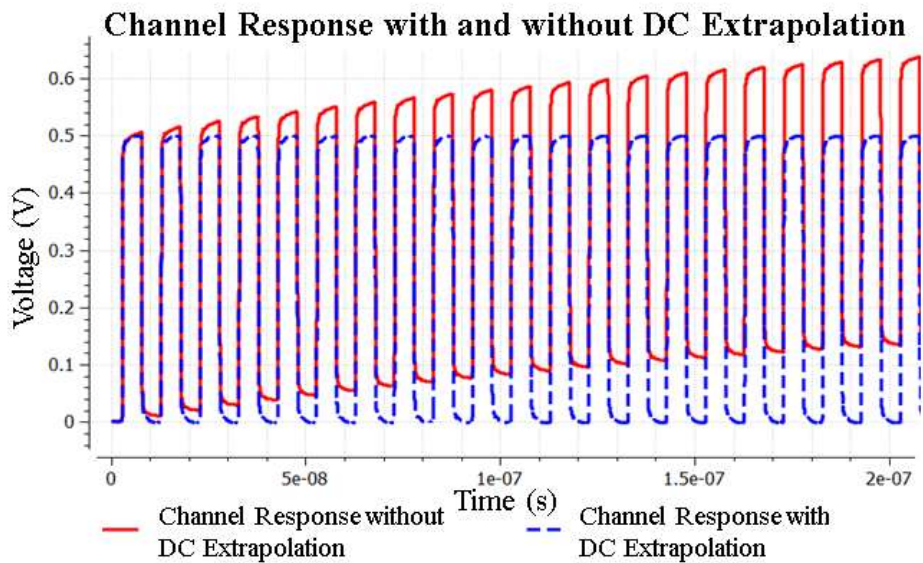


ნახ. 6. DC ექსტრაპოლაცია გადაცემის ფუნქციის წარმოსახვითი ნაწილისთვის. (IEEE Standard for Electrical 2021, 142)

DC ექსტრაპოლაციის მეთოდი უკეთესად მუშაობს წრფივი ფუნქციისთვის წარმოსახვითი და ნამდვილი ნაწილები გრძელი სტრუქტურით საკმარისად მერყეობს, მაგრამ შეიძლება გარდავექმნათ ისინი წრფივად, თუ დაყოვნება აღდგენილი იქნება

გადაცემის ფუნქციიდან, გავამრავლებთ მას. $e^{j\omega t}$ -ზე (Melitz თ. გ.) ექსტრაპოლაციის შემდეგ დაყოვნება $e^{-j\omega t}$ -ზე გამრავლების გზით უნდა დაუბრუნდეს გადაცემის ფუნქციას.

DC-ს გადაცემის ფუნქციის მნიშვნელობები განსაზღვრას სიხშირულ არეში იმპულსის რეაქციის ხანგრძლივ ქცევას. ნახ. 7-ზე მოცემულია არხის რეაქცია მუდმივი დენის ექსტრაპოლაციამდე და შემდეგ. დროით არეში რეაქციის მისაღებად გამოიყენება Vector Titting მეთოდი (ვექტორული მიახლოებით მორგების მეთოდი)- ეს არის ფართოდ გავრცელებული ნუმერიკული ალგორითმი გადაცემის ფუნქციების მოდელირებისთვის, რომელიც ეფუძნება ნაკლები რანგის რაციონალური ფუნქციების მორგებას სიხშირით წარმოდგენილ მონაცემებზე. იგი გამოიყენება ელექტრონული სისტემების მოდელირებაში, S-პარამეტრების ანალიზში, პასიურობის შენარჩუნებასა და მოდელური შეკვეცისთვის (Tsiklauri, Dikhaminjia და Drewniak 2019).



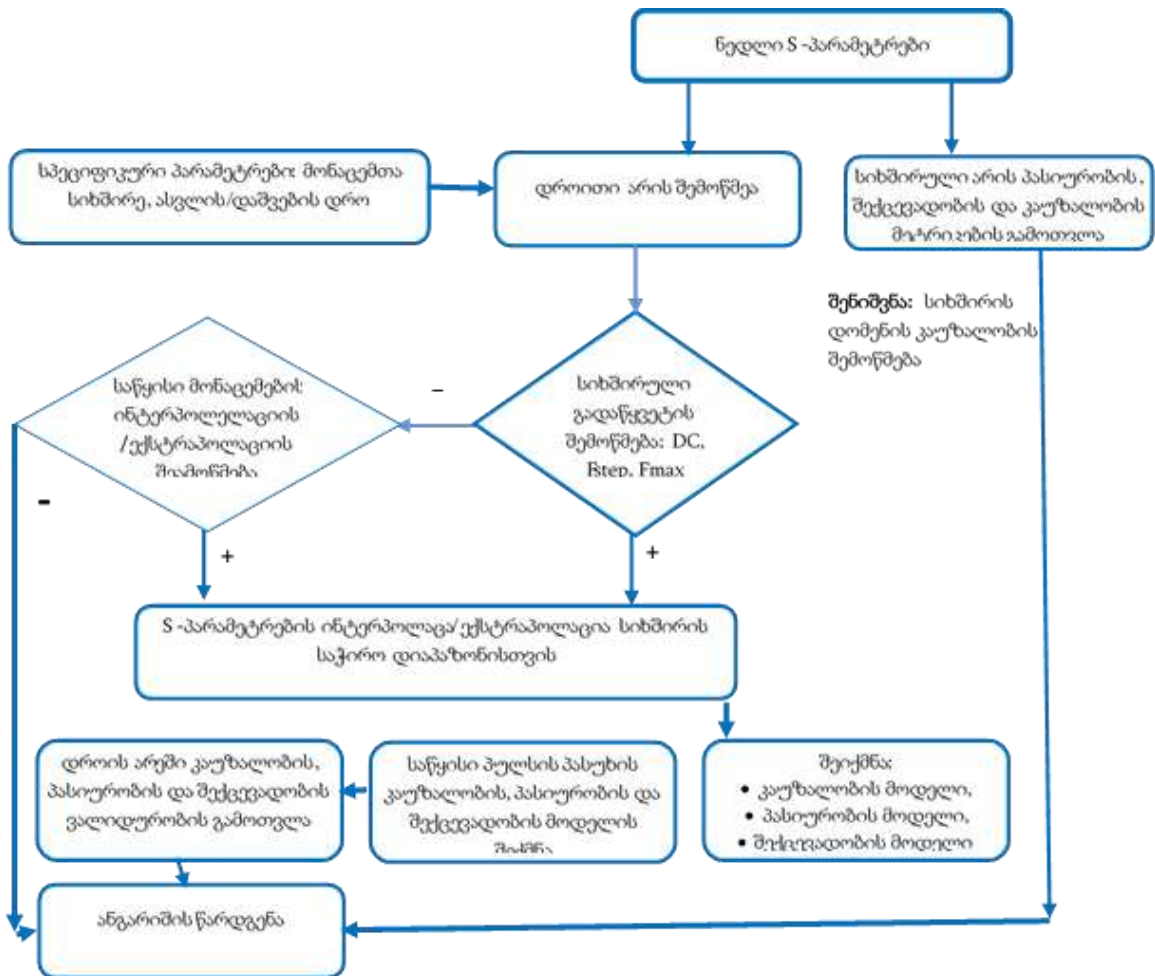
ნახ. 7. გადაცემის ფუნქციის რეალური ნაწილისთვის DC ექსტრაპოლაცია. (Tsiklauri, Dikhaminjia and Fan, et al. 2016)

ამ ნახაზიდან ჩანს, რომ Vector Titting-ის არ შეუძლია ზუსტად აღადგინოს DC-ს მნიშვნელობები და ექსტრაპოლაციის მეთოდმა, რომელიც მოცემული იყო ამ ნაწილში გაზარდოს სიზუსტე.

3.3. საწყისი პასიურობის შემოწმება ნედლ მონაცემებზე

როგორც უკვე აღვნიშნეთ იმისათვის რომ ქსელი ჩაითვალოს გამართულად ის უნდა აკმაყოფილებდეს გარკვეულ პირობებს. მათგან ერთ-ერთი არის პასიურობა და განვიხილოთ S- პარამეტრის შემოწმების პროცესის ბლოკ-სქემა რომელიც მოცემულია სტანდარტში (IEEE Standard for Electrical 2021).

მოცემულ ბლოკ-სქემაზე ნათლად ჩანს როგორ მოწმდება ნედლი მონაცემების პასიურობა.



ნახ. 8. ნედლი მონაცემების პასიურობა შემოწმება

აქვე განვიხილავთ პასიურობის საზომს მეტრიკას.

მეტრიკა გამოიყენება ორიგინალურ და იძულებით მონაცემებს შორის სხვაობის დასადგენად

ანუ პასიურობის საზომი გამოიყენება მონაცემთა პასიურობის ხარისხის გასაზომად.

პასიურობის ხარისხის მეტრიკის რანგი: (IEEE Standard for Electrical 2021)

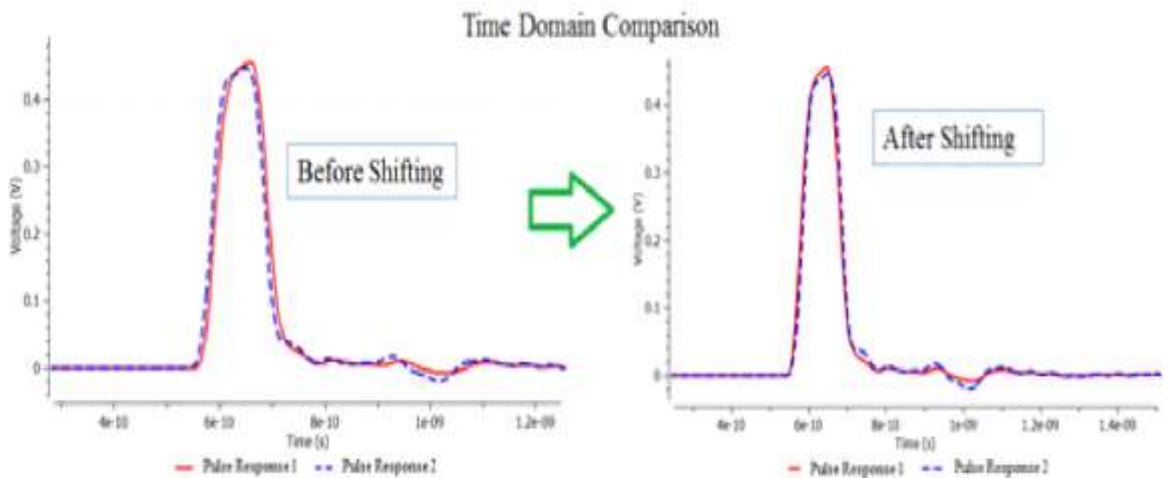
- კარგი – [0 mV, 5 mV); [100, 99.9);
- მისაღები – [5 mV , 10 mV); [99.9, 99);
- საეჭვო – [10 mV,15 mV); [99, 80);
- ცუდი – [15 mV, +∞). [80, 0);

იმპულსის მახასიათებელი როგორც საწყის ისე პასიურ მოდელებისთვის უნდა გარდაიქმნას დროით დომეინში. შემდგომ იმპულსის ერთ-ერთი მახასიათებელი იმერის დროში უკეთესი დამთხვევისთვის, რომელიც მოცემულია განტოლებაში და (ნახ.9)

$$\Delta\tau_{i,j} \rightarrow \min_{\Delta\tau_{i,j}} \|h_1^{i,j}(t) - h_2^{i,j}(t + \Delta\tau_{i,j})\|$$

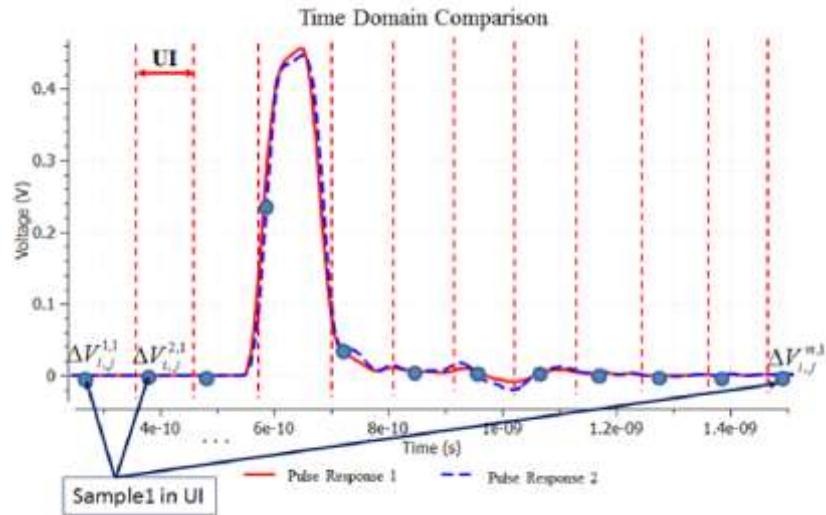
სადაც i და j შეესაბამება S -პარამეტრების კომპონენტს,

h_1 და h_2 არის შესაბამისად ორიგინალური და პასიური იმპულსური პასუხები, t დროა, $\Delta\tau_{ij}$ არის დროის ცვლა.



ნახ. 9. იმპულსური რეაგირების დროითი წანაცვლება ოპტიმალური დამთხვევისთვის. (IEEE Standard for Electrical 2021, 99)

ძვრის შემდეგ ქსელის მახასიათებლის ამპლიტუდების სხვაობა mV ერთეულებში. დროის ინტერვალი უნდა გაიყოს ერთეულების ინტერვალებზე



ნახ. 10. სიგნალის შეფასება დროის დომენში მილივოლტური ერთეულებით
(IEEE Standard for Electrical 2021, 99)

ყოველი მაგალითისათვის UI ძაბვის სხვაობა გამოითვალეთ შემდეგი ფორმულით.

$$\Delta V_{i,j}^{l,k} = |h_1^{l,j}(k+l*UI) - h_2^{l,j}(k+l*UI)|$$

სადაც:

i და j შეესაბამება S პარამეტრის კომპონენტს.

l არის UI-ების რიცხვი თანმიმდევრობით;

k არის ნიმუშის მდებარეობის ინდექსი თითოეულ ინტერფეისში;

h1 და h2 არის შესაბამისად ორიგინალური და პასიური იპულსური პასუხები.

ყველა ნიმუშის ადგილმდებარეობის ძაბვათა სხვაობა უნდა შეჯამდეს შემდეგი ფორმულით:

$$\Delta V_{i,j}^k = \sum_{l=1}^m \Delta V_{i,j}^{l,k}$$

და ბოლოს, მაქსიმუმი ΔV_{kij} დან გამოითვლება ფორმულით:

$$\Delta V_{i,j} = \max_{1 \leq k \leq n} (\Delta V_{i,j}^k)$$

სადაც

$\Delta V_{i,j}$ არის მოცემული S პარამეტრის S_{ij} კომპონენტის ხარისხის შეფასება mV-ში.

ΔV_{ij} შეფასებას აქვს ფიზიკური მნიშვნელობა; ეს მნიშვნელობა არის მაქსიმალური განსხვავება, რომელიც შეიძლება მიღებულ იქნეს, თუ უარესი ბიტების თანმიმდევრობა გამოყენებული იქნება შეყვანის სიგნალად.

ΔV_{kj} ფორმულის საშუალებით უნდა შეიქმნას ძაბვის სხვაობის ΔV მატრიცა

$$\Delta V = \begin{pmatrix} \Delta V_{11}, \dots, \Delta V_{1N} \\ \Delta V_{21}, \dots, \Delta V_{2N} \\ \dots \\ \Delta V_{N1}, \dots, \Delta V_{NN} \end{pmatrix}$$

სადაც

ΔV არის მოცემული S -პრამეტრების ხარისხის შეფასების მატრიცა mV-ში

საბოლოო შეფასება სხვაობისა საწყის(ორიგინალ) და პასიურ მოდელებს შორის ფიზიკურ ერთეულებში შესაძლოა გამოითვალოს შემდეგი ფორმულით:

$$\|\Delta V\| = \max_{1 \leq i \leq N} \left(\sum_{j=1}^N |\Delta V_{ij}| \right)$$

თავი 4. რიცხვითი ექსპერიმენტის შედეგი

კვლევაში გამოვიყენეთ კომპიუტერული მოდელირება და სიმულაციური მეთოდი. საკვლევი ქსელის პარამეტრებისთვის (S პარამეტრები მოგვაწოდეს მისურის შტატის უნივერსიტეტის ლაბორატორიიდან სადაც მუშაობენ აღნიშნულ პრობლემებზე) ზემოთ განხილული ალგორითმების, მეთოდების და სტანდარტის მეტრიკის გათვალისწინებით MATLAB-ში დავწერეთ პროგრამები რომელთა საშუალებით გამოვიკვლიეთ 20 გჰ-იანი PCB პლატა და 50 ომი წინააღობის 6 დიუმინი გამტარი (ზოლოვანი ხაზი).

4.1. ქსელის აგება მოცემული პარამეტრებით და მისი შემოწმება გამართულობაზე თვალის დიაგრამით

ციფრული სიგნალების ანალიზის ერთ-ერთი გავრცელებული და მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტია თვალის დიაგრამების გამოყენება. ეს მეთოდი იძლევა საშუალებას დეტალურად იქნას შეფასებული ციფრული სიგნალის მნიშვნელოვანი მახასიათებლები, მათ შორის გადაცემის სიზუსტე, დამახინჯების დონე და დინამიკური დიაპაზონი. თვალის დიაგრამის აგება ხორციელდება სიგნალის ბიტურ ნაკადზე დაყრდნობით, რომელიც სპეციალურ ანალიზატორში იტვირთება. შედეგად, სიგნალის გამოსასვლელზე გრაფიკული გამოსახულება გენერირდება მსგავსი კონტურით.

გადაცემის ფილტრი ზღუდავს სიგნალის სიხშირულ სპექტრს, რის შედეგადაც იმპულსის ფორმაში გარკვეული ცვლილებები ხდება. ამ ტრანსფორმაციის ვიზუალური გამოხატულებაა ე.წ. „სტანდარტული თვალი“, რომლის გეომეტრია ასახავს სისტემის მუშაობის ეფექტურობას.

თვალის დიაგრამა ეფუძნება ციფრული სიგნალის პერიოდულ სტრუქტურას: სხვადასხვა ბიტური კომბინაციების ზედდებით გატარებით ხდება სიგნალის ფორმის დაგროვება ერთ მონაკვეთზე, რაც საბოლოოდ წარმოქმნის თვალის კონტურს. დაგროვებითი გაზომვების საფუძველზე მიღებული დიაგრამა უზრუნველყოფს მაღალი სიზუსტის დიაგნოსტიკას სისტემის გაუმართაობების, გადატვირთვისა და ხმაურის არსებობის პირობებში (ტაბეშაძე, ვედიაკოვი და ტაბატაძე 2019).

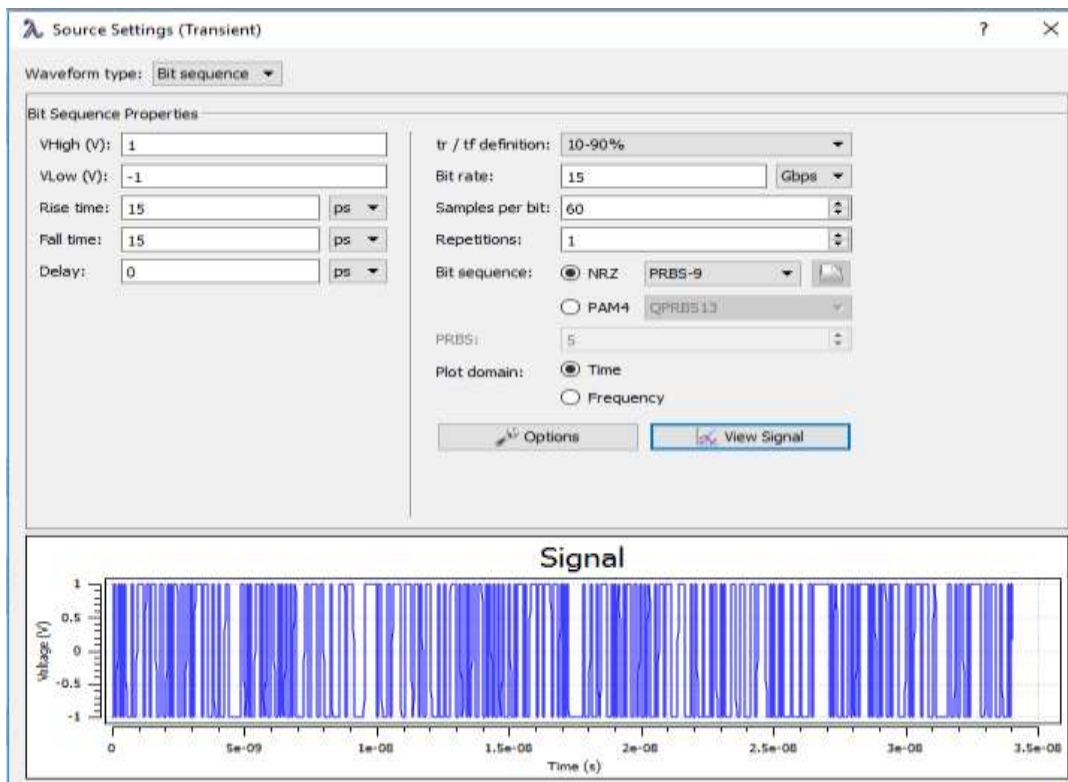
კვლევის დასაწყისში ავადეთ ქსელი პროგრამა ფემასში (რომელთან წვდომაც მოგვცეს ზემოთ ხსენებულ მისურის შტატატის უნივერსიტეტის ლაბორატორიაში).

არხს მოცემული პარამეტრებით დაუმატეთ სიგნალის წყარო და გამოსავალზე მიმღებამდე დავაყენეთ გამზომი ხელსაწყო და მიმღები.



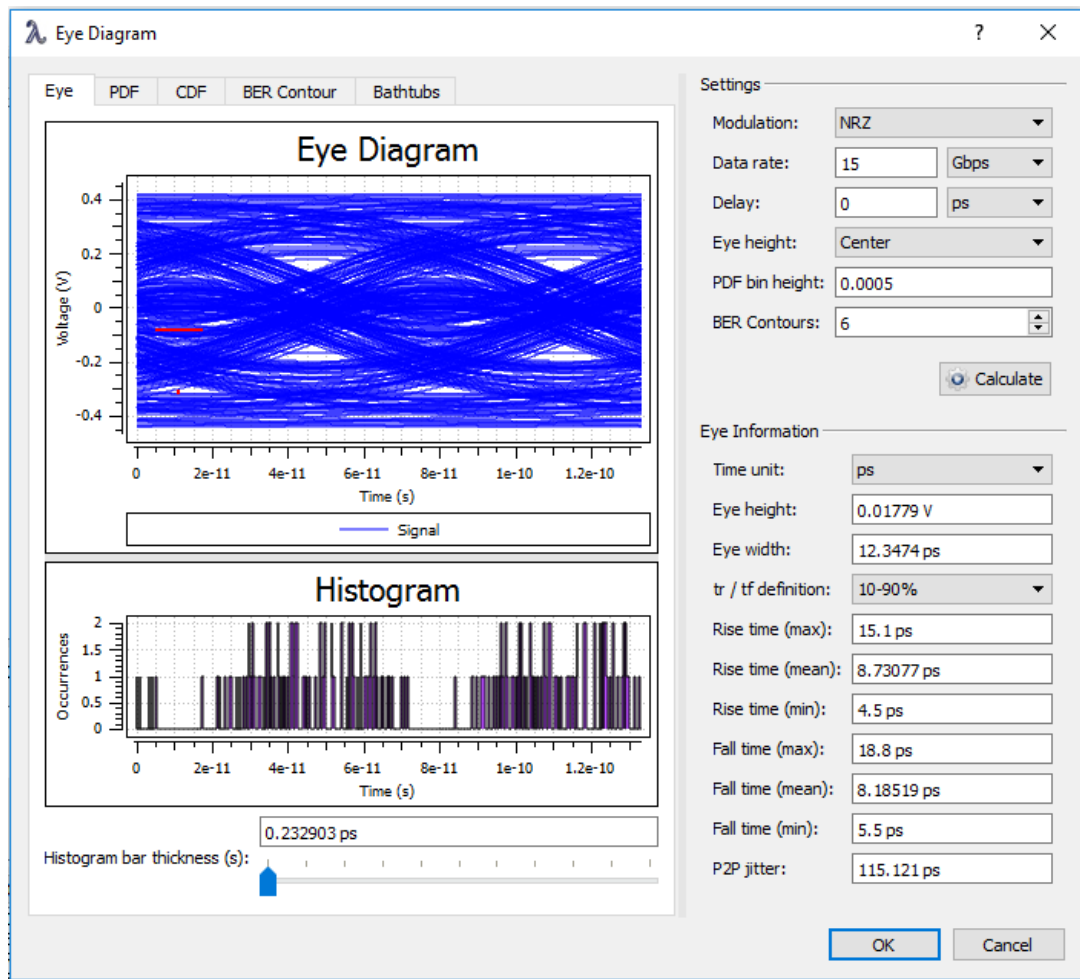
ნახ. 11. საკვლევი პარამეტრებით შექმნილი ქსელი

გავზომეთ ჩვეულებრივად გამავალი სიგნალი და ვნახეთ რამდენად დამახინჯდა გამოსასვლელზე, ექსპერიმენტის დროს ვცვალეთ სიხშირეები, ქვემოთ მოცემულია სურათი როცა სიხშირე იყო 15 მგჰ



ნახ. 12. მიღებულ ქსელში გავლილი სიგნალი კონკრეტული მონაცემებით

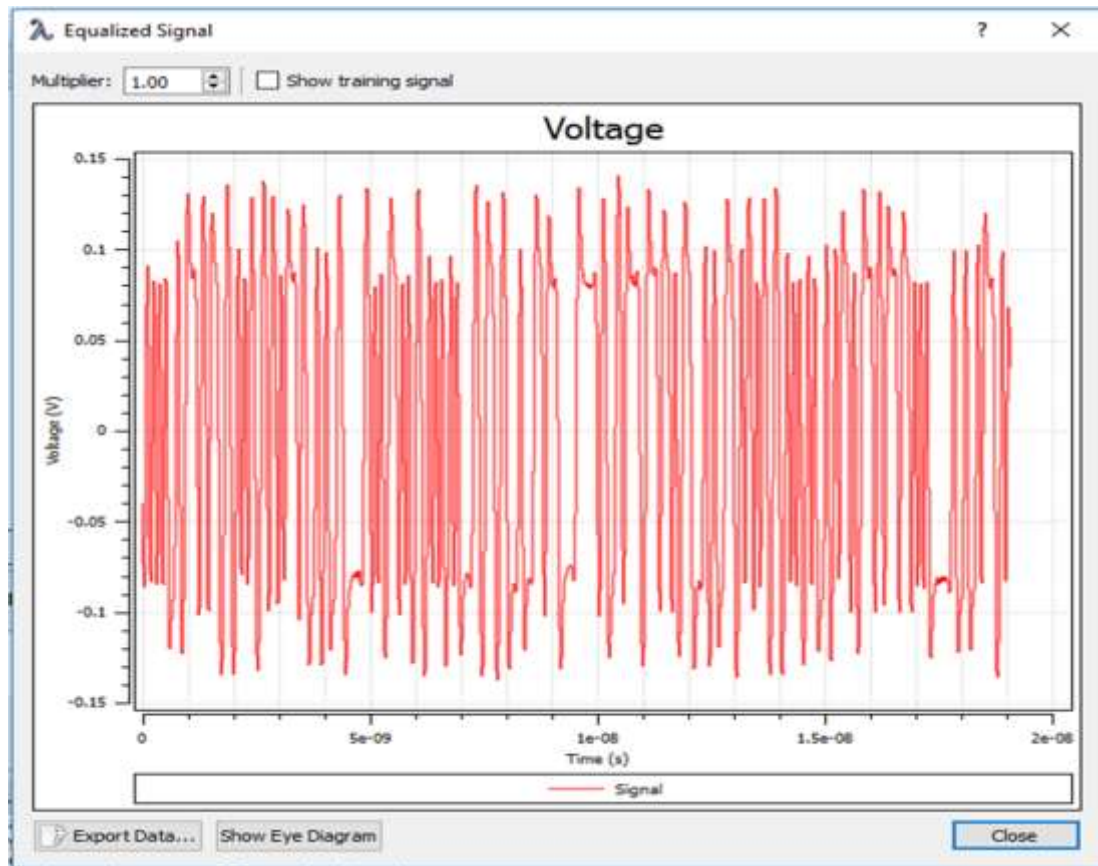
შესაბამისად გვაქვს ამ სიხშირეზე გვაქვს თვალის დიაგრამა



ნახ. 13. მიღებული სიგნალის თვალის დიაგრამა.

და მიღებული შედეგიდან ჩანს, რომ როცა მაღალია იმპულსის სიჩქარე მით მეტად მახინჯდება თვალი და საჭიროებს უფრო მეტ ეკვალიზაციის ალგორითმებს.

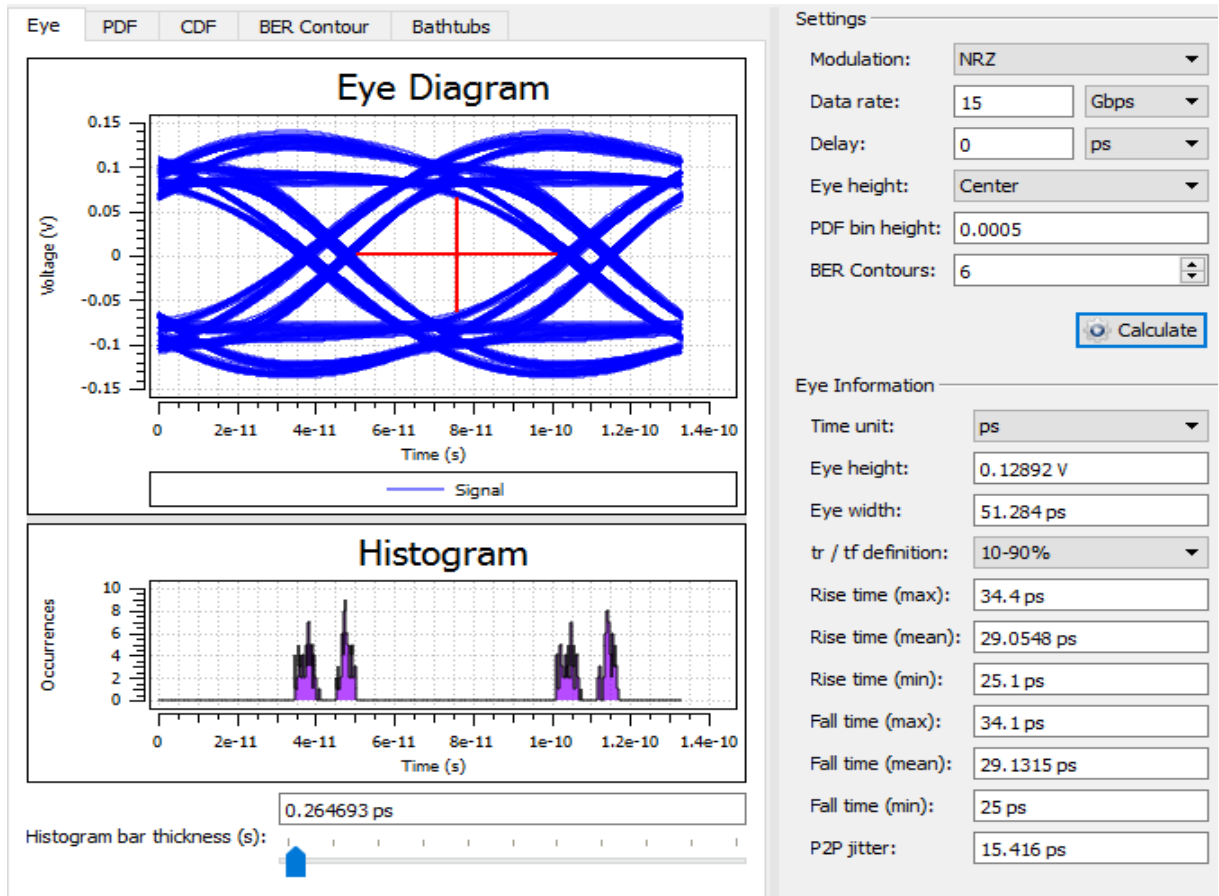
შემდეგ დავამატეთ FFE ეკვალიზატორი



ნახ. 14. ეკვალიზატორის დამატების შემდეგ მიღებული სიგნალი

ეკვალიზატორმა სიგნალის წინასწარი მომზადების ალგორითმით, ანუ დაყოვნების კომბინაციით, სიგნალების ამპლიტუდები ინვერსიით მიაწოდა და შეწონილი ამპლიტუდით დაამატა.

მოხდა ამ სიგნალების კონვოლუცია და რესივერზე ანუ მიმღებზე მივიდა აღდგენილი სიგნალი, რასაც გვიჩვენებს უკვე თვალის დიაგრამა.



ნახ. 15. აღდგენილი სიგნალის თვალის დიაგრამა.

კვლევა ჩავატარეთ იმავე არხზე (იგივე პარამეტრებით) 10 მგპ სიხშირეზე და ვნახეთ რომ თვალი უკეთ იყო გახსნილი

კვლევის შედეგი

ჩატარებულმა კვლევამ მოგვცა საშუალება რომ თეორიული ვარაუდი დაგვედასტურებინა. მაღალსიხშირიანი სიგნალების გადაცემისას უფრო მეტად მახინჯდება სიგნალი და მიმღებამდე საჭიროა აღდგენის ალგორითმები.

4. 2. კაუზალობის შეფასება ჰილბერტის გარდაქმნით (DHT)

შემდეგ კვლევა ჩავატარეთ ქსელზე მოცემული S პარამეტრებით.

ალგორითმი შევქმენით ზემოთ აღწერილი მეთოდების გათვალისწინებით, კერძოდ, ჰილბერტის დისკრეტული გარდაქმნის საუბველზე, პროგრამა განვახორციელეთ MATLAB-ში, ქსელის პარამეტრებისთვის და მივიღეთ შედეგები. (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019)

ქვემოთ მოყვანილია MATLAB-ში დაწერილი კოდი და შემდეგ მისი განმარტება.

პროგრამის დასაწყისში უნდა გასუფთავდეს ყველა რეგისტრი და წავიკითხოთ მონაცემები და მივაწოდოთ S პარამეტრები.

```
%%%%%%%% qselis mtlioanobis shemocmeba kauzalobis metodit

[freq,Sdata,npts] = fromtouchn('Through_20GHz.s2p');
%[freq,Sdata,npts] = fromtouchn('Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p');
%Get S21
s21 = squeeze(Sdata(2,1,:));
o=s21;
df = freq(2)-freq(1);
    %DC extrapolation
if(freq(1) ~ = 0)
    disp('extrapolating to dc ...');
    [freq,s21] = dcextrapolation(freq,s21);
end
    %Interpolate data
New_N = floor(freq(end)/df);
new_freq = df*(ceil(freq(1)/df):New_N)';
s21 = interpolation(freq,s21,new_freq);
freq = new_freq;
N = length(freq);
    %Extend to negative frequencies
s21_conj = add_conj(s21);
s21re=real(s21_conj);
s21im=imag(s21_conj);
hil=hilbert(s21im);
rehil=real(hil);
rehilshifted=zeros(length(rehil),1);
rehilshiftedinv=zeros(length(rehil),1);
for i=26:length(rehil)
    rehilshifted(i)=rehil(i-25);
```

```

end
for i=1:length(rehil)
rehilshiftedinv(i)=rehilshifted(length(rehil)-i+1);
end
%for i=1:length(rehil)
%rehilshiftedinv(i)=rehilshiftedinv(i)(i);
%end

figure(110);
%plot(rehilshifted);
plot(rehilshifted,'color','red');
hold on;
plot(s21re,'color','blue');
%Plot magnitude
%figure(1)
%plot(freq/10^9,db(s21), 'r','lineWidth', 4); hold on;
%Plot phase
%figure(2)
%plot(freq/10^9,phase(s21), 'r','lineWidth', 4); hold on;
transfer=real(iff(s21_conj));
%figure(3)
i=1:length(transfer);
%plot(i,transfer); hold on;
x=[0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0, 1, 0, 1, 0,1,0,1,0,1,0,1,0,1, 0, 1, 0, 1,0,1];
disktime1=1e-9;
risetime1=4*disktime1;
falltime1=4*disktime1;
datarate1=10*disktime1;
input=signal(x,risetime1,falltime1,datarate1,disktime1);
size(input);
აქ ხდება მიწოდებული სიგნალის დიაგრამის ( ნახაზის) აგება
figure(4);
plot(input)
output=zeros(length(input));
for i=1:length(input)
for j=1:length(transfer)
if( i-j>0 && i-j<=length(input) )
output(i)=output(i)+transfer(j)*input(i-j);
end
end
end
end

```

```

figure(55);
ee=imag(output)
figure(5);
plot(output)

```

კოდის აღწერა

დასაწყისში იშლება და იხურება ყველაფერი MATLAB-ში, პროგრამის გაშვებამდე

ხდება მონაცემების ამოკითხვა Sdata მასივიდან (S პარამეტრების ფაილიდან), ფუნქციის მნიშვნელობა, პარამეტრები მოცემულია სიხშირულ არეში

```

%Read Data
% [freq,Sdata,npts] =romtouchn("Through_20GHz.s2p");
[freq,Sdata,npts]=fromtouchn('Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p');

```

მასივიდან გვჭირდება მხოლოდ S21- გადატანის ფუნქცია

```

%Get S21
s21 = squeeze(Sdata(2,1,:));
o=s21;
Df სიხშირული ბიჯი
df = freq(2)-freq(1);

```

ხდება ექსტრაპოლაცია, მოწმდება სიხშირე freq(1) ტოლია თუ არა ნოლის, თუ ტოლია, ე.ი. გვაქვს მუდმივი დენი, თუ არა ამ სიხშირის აღდგენა ხდება 0-ლოვან სიხშირემდე.

```

%DC extrapolation
if(freq(1) ~= 0)
    disp('extrapolating to dc ...');
    [freq,s21] = dcextrapolation(freq,s21);
end

```

ინტერპოლაციის დროს ითვლება ახალი ფუნქცია სადაც თანაბრდება სიხშირული ბიჯი

```

%Interpolate data
New_N = floor(freq(end)/df);
new_freq = df*(ceil(freq(1)/df):New_N)';
s21 = interpolation(freq,s21,new_freq);
freq = new_freq;
N = length(freq);

```

წყაროდ გამოყენებულია MATLAB პროგრამული პაკეტის სახელმძღვანელო გვერდი (Aydin და Chaparro 2024).

უკვე გვაქვს სიხშირეები 0-დან, ახლა საჭირო დაემატოს მას უარყოფითი სიხშირეებიც, და გადაცემის პუნქციის პარამეტრი S_{21} მიიღებს საბოლოო სახეს.

`s21_conj` - ის დამატებული აქვს უკვე უარყოფითი სიხშირეები.

```
%Extend to negative frequencies
```

```
s21_conj = add_conj(s21);
```

ვპოულობთ S_{21} რეალურ და წარმოსახვით ნაწილებს კრამერს-კრონინგის ფორმულით

```
s21re=real(s21_conj);
```

```
s21im=imag(s21_conj);
```

ჰილბერტის დისკრეტული გარდაქმნით (ჰდგ) (ეს ფუნქცია ჩაშენებული აქვს MATLAB

```
hil=hilbert(s21im); %% არის (HDT) წარმოსახვითი ნაწილის
```

```
rehil=real(hil); %% არის რეალური ნაწილი წარმოსახვითი ნაწილის (HDT) -ის.
```

და ისინი უნდა ემთხვეოდნენ ერთმანეთს რადგან გადაცემის ფუნქცია $H(\omega) = V(\omega) + I U(\omega)$

$H(\omega) - S_{21_conj}$; $V(\omega) - S_{21re}$ რეალური ნაწილი და $U(\omega) - S_{21im}$ წარმოსახვითი ნაწილი
(ჰილბერტის დისკრეტული გარდაქმნა ხსნის სინგულარობის პრობლემას)

```
hil=hilbert(s21im);
```

```
rehil=real(hil);
```

```
rehilshifted=zeros(length(rehil),1);
```

```
rehilshiftedinv=zeros(length(rehil),1);
```

უნდა გავითვალისწინოთ დროითი დაყოვნება და თუ ამას გამოვსახავთ სიხშირულ არეში, უნდა დავძრათ დროითი დაყოვნების ბიჯით და ისინი უნდა დაემთხვეს ერთმანეთს

```
for i=26:length(rehil)
```

```
rehilshifted(i)=rehil(i-25);
```

```
end
```

```
for i=1:length(rehil)
```

```
rehilshiftedinv(i)=rehilshifted(length(rehil)-i+1);
```

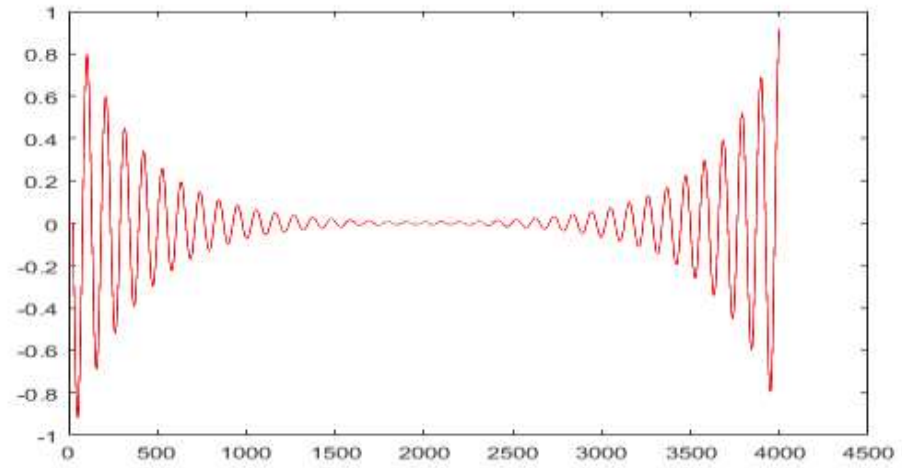
```
end
```

```
figure(110);
```

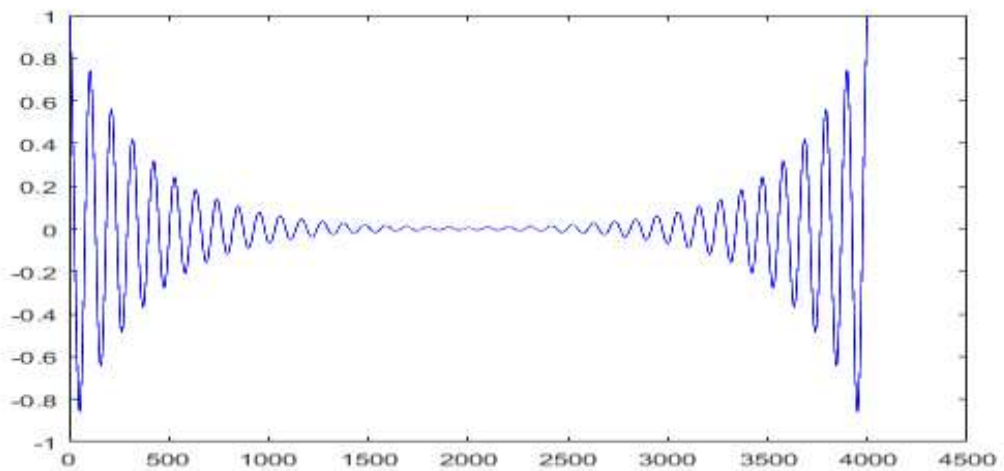
```
%plot(rehilshifted);
```

```
plot(rehilshifted,'color','red');
```

```
figure(111);  
plot(s21re,'color','blue');
```



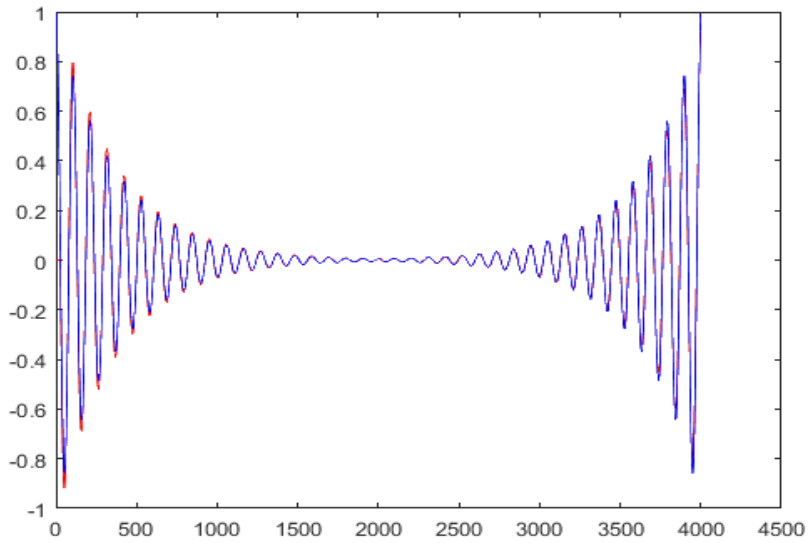
ნახ. 16. ჰილბერტის გარდაქმნის რეალური ნაწილი 50 ომიანი სტრიმისთვის



ნახ. 17. რეალური ნაწილით აღდგენილი წარმოსახვითი ნაწილი დაძრული დროითი დაყოვნების ტოლი ბიჯით 50 ომიანი სტრიმისთვის

```
figure(112);  
plot(rehilshifted,'color','red');  
hold on;  
plot(s21re,'color','blue');
```

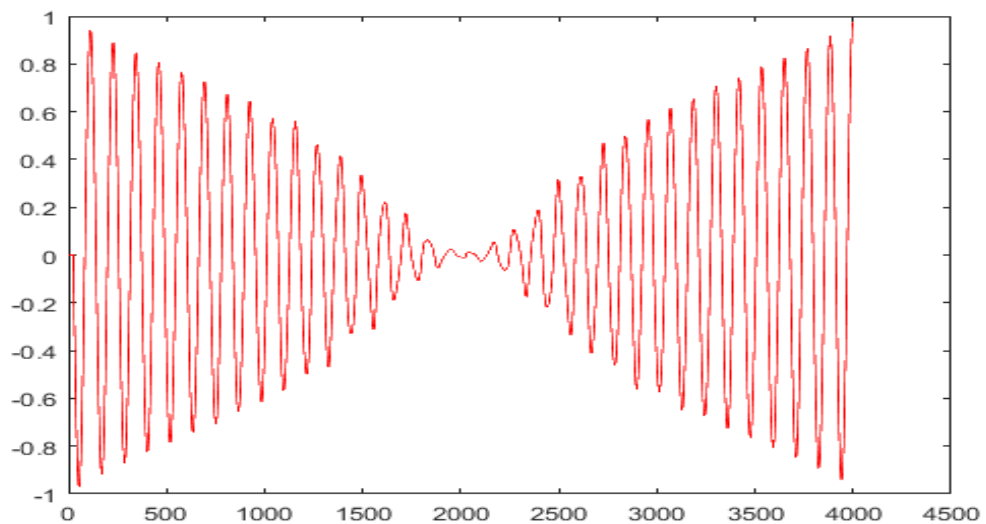
და თუ დავადებთ მათ ერთმანეთს დავინახავთ, რამდენად ემთხვევიან ერთმანეთს.



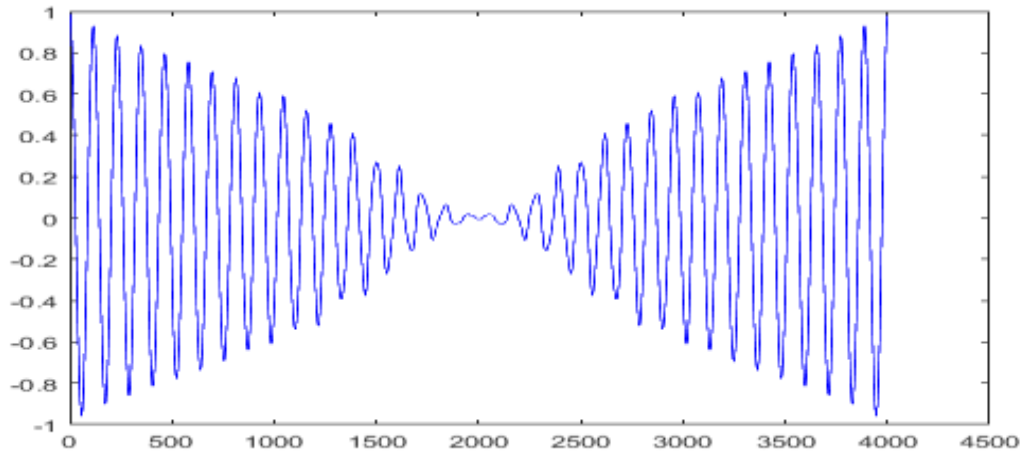
ნახ. 18. მიღებული დიაგრამების ერთმანეთზე ზედდებით მიღებული შედეგი 50 ომიანი სტრიმისთვის

ეს კვლევა ჩავატარეთ 56 ომიანი წინაღობის ქსელს კაბელზე.

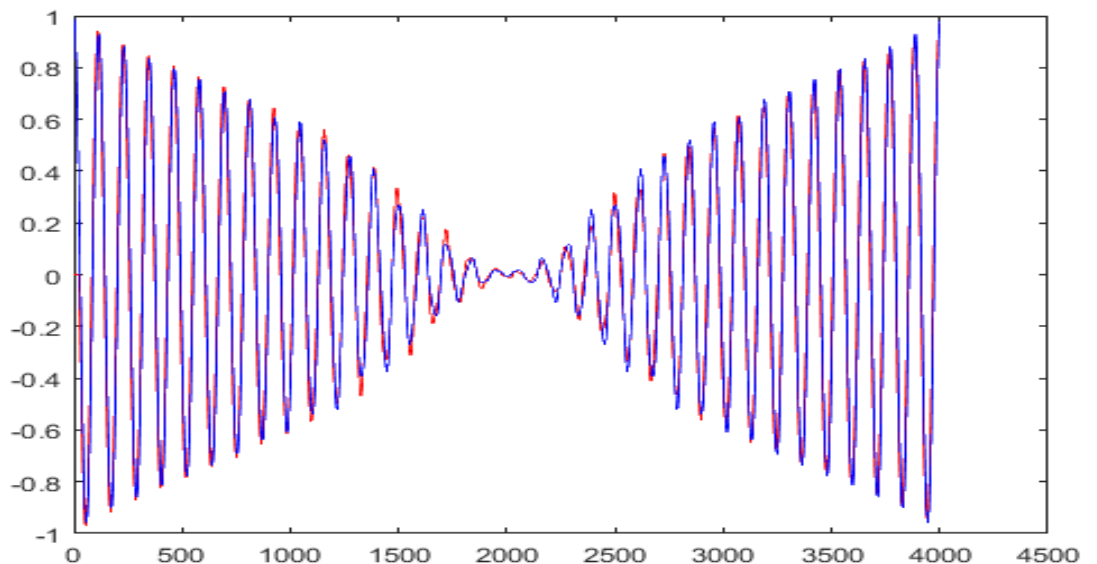
მსგავსი კვლევა ჩავატარეთ ბეჭდურ პლატაზე PCB-ზე და კვლევის შედეგებმა გვიჩვენა შემდეგი:



ნახ. 19. ჰილბერტის გარადაქმნის რეალური ნაწილი



ნახ. 20. რეალური ნაწილით აღდგენილი წარმოსახვითი ნაწილი დაძრული დროითი დაყოვნების ტოლი ბიჯით



ნახ. 21. მიღებული დიაგრამების ერთმანეთზე ზედღების შედეგი

შედეგი

კვლევამ გვიჩვენა რომ, ბეჭდური პლატის შემთხვევაში დამთხვევა უკეთესია დაბალ სიხშირეებზე, ხოლო 50 ომიანი წინალობის კაბელში უკეთესი დამთხვევა ხდება მაღალ სიხშირეებზე, მაგრამ ეს ცდომილება შეიძლება ჩაითვალოს მინიმალურად და

დასკვანა არის ის, რომ ორივე შემთხვევაში ხდება კაუზალური თვისების დაკმაყოფილება (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019, 81-87).

ფიზიკური ქსელის მთლიანობის შესამოწმებლად აუცილებელი გვექონდეს S პარამეტრებს მატრიცა და მათი საშუალებით შემოწმდეს ქსელის აუცილებელი მახასიათებლები: კაუზალობა, შექცევადობა და პასიურობა.

ჩვენ განვიხილეთ ამ მახასიათებლებიდან ერთ-ერთის - კაუზალობის შემოწმება S პარამეტრების გამოყენებით დავწერეთ გადაცემის ფუნქციისთვის, ჰილბერტის დისკრეტულ გარდაქმნებზე დაფუძნებული კაუზალობის შემოწმების ალგორითმი და გამოვიკვლიეთ მოწოდებული ქსელის S პარამეტრების მქონე ქსელი და PCB-ის თვისებება იყო თუ არა კაუზალური (ვედიაკოვი, ტაბეშაძე და წიკლაური 2019)

4. 3. ქსელის შემოწმება პასიურობაზე

ნაშრომის მოცემულ თავში წარმოდგენილია ალგორითმი, რომელიც ეფუძნება სინგულარული მნიშვნელობების დაშლას (SVD) და მიზნად ისახავს პასიურობის უზრუნველყოფას ინტერპოლირებულ და ექსტრაპოლირებულ S-პარამეტრების მოდელებში. მეთოდი მიმართავს მინიმალურ ჩარევას პარამეტრებში პასიურობის შესანარჩუნებლად და ამავდროულად უზრუნველყოფს მოდელის სიზუსტის შენარჩუნებას. პასიურობის ხარისხის შეფასება ხდება დროით დომენში იმპულსური პასუხის შედარებით. მეთოდის ვალიდაცია განხორციელდა Through_20GHz.s2p და Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p

მაღალსიჩქარიან ციფრულ და მიკროტალღურ ინჟინერიაში გაბნევის პარამეტრები (S-პარამეტრები) მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მრავალპორტიანი წრფივი ქსელების ელექტრული ქცევის აღწერაში. ამ პარამეტრების ზუსტი მოდელირება აუცილებელია სისტემური სიმულაციისა და სიგნალის მთლიანობის ანალიზისთვის. თუმცა, ინტერპოლირებული ან ექსტრაპოლირებული S-პარამეტრები ხშირად არღვევენ ფიზიკის ფუნდამენტურ მოთხოვნას — პასიურობას, რაც იწვევს არარეალურ ქცევებს ან სიმულაციის არასტაბილურ შედეგებს. აქედან გამომდინარე,

პასიურობის უზრუნველყოფა S-პარამეტრების მოდელებში აუცილებელია სისტემის სანდო დიზაინისა და ანალიზისთვის (Vediakovi, Tabatadze და Işcan 2025).

პასიურობის უზრუნველყოფის ალგორითმების მიზანია მინიმალური გადახრით შეცვალონ საწყისი S-მატრიცა ისე, რომ შენარჩუნდეს მოდელის სიზუსტე. სინგულარული მნიშვნელობების დაშლაზე (SVD) დაფუძნებული მეთოდები ეფექტურად ასრულებენ ამ ამოცანას იმ სინგულარული მნიშვნელობების კორექტირებით, რომლებიც აჭარბებენ პასიურობის ზღვარს. ასეთი მეთოდები უზრუნველყოფენ მათემატიკურად გამყარებულ მიდგომას და ფართოდ გამოიყენება რაციონალური მაკრომოდელირებისა და სისტემების იდენტიფიკაციის პროცესებში.

პასიურობის მიღწევის ხარისხის შეფასებისთვის საჭიროა პრაქტიკული მეტრიკები. ამ მიზანს დროითი დომენის პულსური რეაგირების შედარებაზე დაფუძნებული პასიურობის ხარისხის მეტრიკა ემსახურება, რომელიც ზომავს ორ მოდელს — საწყისსა და პასიურ მოდელს — შორის გადახრას. ამგვარი მეტრიკები აუცილებელია იმის დასადგენად, რომ ვარგისია თუ არა მიღებული პასიური მოდელი. ნაშრომის მოცემულ თავში წარმოდგენილია ალგორითმი, რომელიც სინგულარული მნიშვნელობების დაშლას (SVD) ეფუძნება და მიზნად ისახავს პასიურობის უზრუნველყოფას ინტერპოლირებულ და ექსტრაპოლირებულ S-პარამეტრების მოდელებში. მეთოდი მიმართავს მინიმალურ ჩარევას პარამეტრებში პასიურობის შესანარჩუნებლად და ამავდროულად უზრუნველყოფს მოდელის სიზუსტის შენარჩუნებას. მეთოდის ვალიდაცია განხორციელდა Through_20GHz.s2p და Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p მონაცემებზე. მიღწეული მაქსიმალური ΔV იყო 0.4304 მვ (კარგი) და 6.3353 მვ (მისაღები). შედეგები ადასტურებს, რომ შესაძლებელია სანდო პასიურობის უზრუნველყოფა კონტროლირებადი გადახრებით (Vediakovi, Tabatadze და Işcan 2025).

ნაშრომში წარმოდგენილია SVD-ზე დაფუძნებულ პასიურობის უზრუნველყოფის ალგორითმი და დროით დომენზე დაფუძნებულ ხარისხობრივ მეტრიკას მისი ეფექტიანობის შესაფასებლად. წარმოდგენილი მეთოდი დამოწმებულია რეალურ S-პარამეტრების მონაცემებზე და აჩვენებს ეფექტიანობას პასიურობის დაცვაში.

აღწეროთ ქსელის პასიურობის შემოწმების ალგორითმი (IEEE Standard for Electrical 2021)

ნაბიჯი 1. გამოვიყენოთ S-პარამეტრების საწყის მატრიცის დაშლა.

$$S = UDV^* \quad (4.1)$$

სადაც S- საწყისი S -პარამეტრების მატრიცაა, D- საკუთრივი რიცხვების დიაგონალური მატრიცა, U - მარცხენა საკუთრივი ვექტორების მატრიცაა, და V - მარჯვენა საკუთრივი ვექტორების მატრიცა.

ნაბიჯი 2. D დიაგონალურ მატრიცაში შევცვალოთ ყველა იმ ელემენტის მნიშვნელობა, რომელიც მოდულით 1-ზე მეტია (შევამციროთ ყველა ელემენტის ამპლიტუდა 1-მდე)

$$D_{passive}(i, j) = \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ \frac{D(i, i)}{\max(1, |D(i, i)|)}, & i = j. \end{cases} \quad (4.2)$$

წყარო: (Tsiklauri, Zvonkin და Jun 2014, 961-966)

ნაბიჯი 3. S პარამეტრების პასიური მატრიცის შექმნა საკუთარი მოდიფიცირებული მნიშვნელობების მატრიცის გამოყენებით;

$$S_{passive} = UD_{passive}V^* \quad (4.3)$$

მსგავსების ზომა გამოვიყენოთ $\Delta S_{passive} = S - S_{passive}$, სხვაობის შესაფასებლად:

შეიძლება იმის დამტკიცება, რომ აღნიშნული ალგორითმი (4.4) პოულობს საწყისი პარამეტრების იმ მინიმალურ შემფოთებას რომელიც მას პასიურად გარდაქმნის. მოცემული ალგორითმისთვის შემფოთების მატრიცა ტოლია:

$$\Delta S = S - S_{passive} = UDV^* - UD_{passive}V^* = U(D - D_{passive})V^* = U\Delta DV^* \quad (4.4)$$

ΔD - დიაგონალური მატრიცაა, ყველა დიაგონალურ ადგილზე არის ნულოვანი მნიშვნელობა, თუ S პარამეტრების საწყისი მატრიცის შესაბამისი საკუთარი მნიშვნელობები ერთზე ნაკლებია და $(D_{i,i} - 1)$ წინააღმდეგ შემთხვევაში ფორმულა (5.6) წარმოადგენს დაშლილი საკუთრივი მნიშვნელობების შემფოთების მატრიცას,

აქედან გამომდინარე თუ საწყისი S პარამეტრების მატრიცა არ არის პასიური მაშინ შემფოთების მატრიცის ნორმა ტოლია:

$$\|\Delta S\| = \max_i (\Delta D_{ii}) = \max(\lambda) - 1 = \|S\| - 1 \quad (4.5)$$

ახლა ვაჩვენოთ რომ არ არსებობს შემფოთების ისეთი მატრიცა, რაც საწყის მატრიცას აქცევს პასიურად და რომლის ნორმაც $\|S\| - 1$ -ზე ნაკლებია. ბოლოს ნორმის თვისებიდან გამომდინარე გვექნება:

$$\|S\| = \|(S + \Delta \tilde{S}) - \Delta \tilde{S}\| \leq \|S + \Delta \tilde{S}\| + \|\Delta \tilde{S}\| \quad (4.6)$$

აქედან გამომდინარე გვექნება:

$$\|\Delta \tilde{S}\| \geq \|S\| - \|S + \Delta \tilde{S}\| = \|S\| - 1 \quad (4.7)$$

ამით მტკიცდება, რომ აღწერილი ალგორითმით აიგება პასიური მატრიცა რომელიც ყველაზე ახლოსაა საწყისი S პარამეტრების მატრიცასთან.

S-პარამეტრების პასიური მატრიცის შექმნის ალგორითმი ჩვაწერეთ MATLAB პროგრამაში და გამოვიკვლიეთ იგივე ორი მოწყობილობა რაც გვექონდა კაუზალობის შემოწმების დროს.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ნაშრომი წარმოდგენილია SVD-ზე დაფუძნებულ პასიურობის უზრუნველყოფის ალგორითმი და სთავაზობს ახალ დროით დომენზე დაფუძნებულ ხარისხობრივ მეტრიკას მისი ეფექტიანობის შესაფასებლად. წარმოდგენილი მეთოდი დამოწმებულია რეალურ S-პარამეტრების მონაცემებზე და აჩვენებს ეფექტიანობას პასიურობის კონტროლირების დაცვაში.

აქვე აღვწერთ კოდს (კოდი დაწერილია MATLAB პროგრამულ პაკეტში)

მონაცემების შემოტანა და ინიციალიზაცია

```
matlab
```

```
CopyEdit
```

```
clear all;
```

```
clc;
```

```
[freq,Sdata,npts] = fromtouchn('Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p');
```

საწყის ეტაპზე, ხდება MATLAB გარემოს გაწმენდა არსებული ცვლადებისგან (clear all) და კონსოლის გასუფთავება (clc). შემდეგ ფუნქცია fromtouchn გამოიყენება. s2p ფაილიდან S-პარამეტრების წასაკითხად, რომლებიც აღწერენ ორპორტიან ელექტრონულ ქსელს სხვადასხვა სიხშირეზე.

ერთეულების ორთოგონალიზაცია და დეისპექტრალიზაცია

matlab

CopyEdit

```
for i=1:N
```

```
[V(:,i),D(:,i),U(:,i)]=eig(Sdata(:,i));
```

```
end
```

მოსალოდნელი მიზანი იყო S-მატრიცების სპექტრალური ანალიზი. ფუნქცია eig იყენებს Eigenvalue Decomposition-ს, რათა მოახდინოს S-მატრიცის დიაგონალიზაცია იმ ფორმით, რომ:

$$S=UDV^*$$

სადაც:

- U და V - არის სინგულარული ვექტორების მატრიცები
- D - დიაგონალური მატრიცა, რომელიც შეიცავს სინგულარულ

მნიშვნელობებს.

პასიურობის მატრიცის შეფასება

```
for n=1:N
```

```
for i=1:2
```

```
for j=1:2
```

```
if(i~=j)
```

```
Dpassive(i,j,n)=0;
```

```
else
```

```
Dpassive(i,j,n)=min(1,D(i,j,n));
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

აქ იგეგმება პასიურობის პირობების დაკმაყოფილება: მატრიცის დიაგონალური ელემენტები არ უნდა აღემატებოდეს ერთიანს, ხოლო არადიაგონალური ელემენტები ნულდება. შედეგად მიღებული Dpassive რომელიც გამოიყენება ახალი, **პასიური S-მატრიცის** ასაგებად:

```
Spassive(:,i)=U(:,i)*Dpassive(:,i)*V(:,i)';
```

ერთგვაროვნების შეფასება სინგულარული მნიშვნელობების მიხედვით

```
Sing = svd( Sdata(:,i) )
```

გამოითვლება სინგულარული მნიშვნელობები, რაც S-მატრიცის ნორმასა და პასიურობას შორის დამოკიდებულებას ამჟღავნებს. მაქსიმალური სინგულარული მნიშვნელობა არ უნდა აღემატებოდეს ერთიანს, რათა ქსელი იყოს პასიური.

```
გადაცემის ფუნქციის მოდელირება დროში  
transfer_p=real(iff(s21_p));  
transfer=real(iff(s21));
```

ხდება ფურიეს უკუ გარდაქმნა (IFFT), რათა სიხშირულ სივრცეში არსებული გადაცემის ფუნქცია დროით სივრცეში გადმოიტანოს. მიიღება transfer_p – პასიური მატრიცით მიღებული რეალური დროის რეაქცია და transfer – საწყისი მატრიცით მიღებული რეაქცია.

```
შესატანი იმპულსის გენერაცია  
x=[0,0,1,0,0,0];  
...  
input=signal(x,risetime1,falltime1,datarate1,disktime1);
```

გენერირდება ტრაპეციული ფორმის შესატანი სიგნალი, რომელიც განისაზღვრება დროის დისკრეტიზაციისა და აწევის/ვარდნის პერიოდებით. იგივენიარად, გენერირდება შეცვლილი იმპულსიც input_shifted.

```
გამოხმაურების გაანგარიშება პასიური და საწყისი მატრიცისთვის  
output_p(i)=output_p(i)+transfer_p(j)*input(i-j);  
output(i)=output(i)+transfer(j)*input_shifted(i-j);  
გამოითვლება სისტემის რეაქცია პასიურ და საწყის სისტემებზე შესაბამისი
```

კონვოლუციის პრინციპით.

```
შედეგების შედარება  
dv(i)=abs(output(i)-output_p(i));  
sum=sum+dv(i);
```

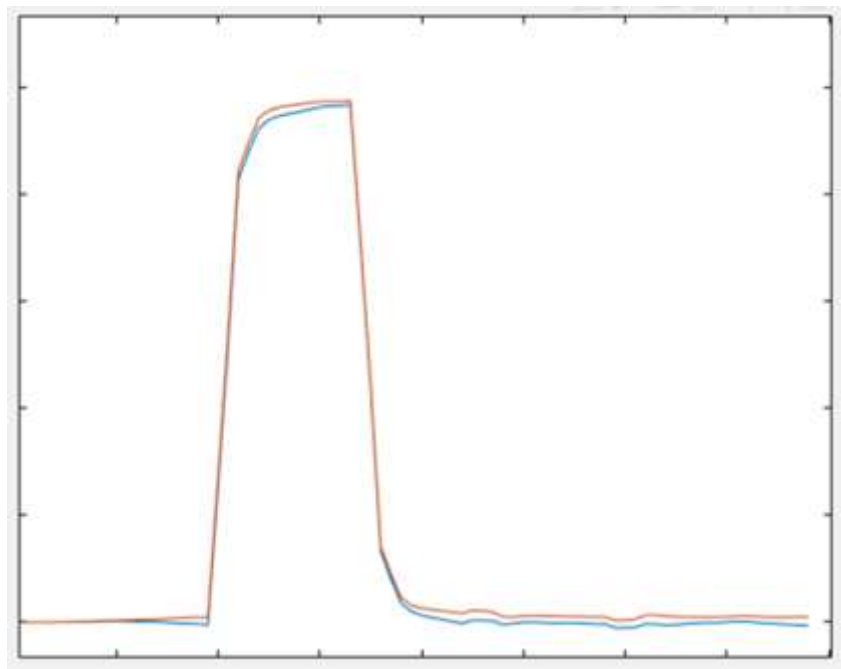
მოხდება გამომავალი სიგნალების განსხვავების გაანგარიშება წერტილობრივად და ჯამური გადახრის გამოყვანა.

შედეგი:

ნახაზი 22. წარმოადგენს დროით დომენში იმპულსური რეაგირების შედარებას საწყის მოდელსა და პასიურ მოდელს შორის, რომელიც მიღებულია Through_20GHz.s2p S-პარამეტრების მონაცემებზე. გრაფიკზე ნაჩვენებია ამპლიტუდის განსხვავება ΔV (მილივოლტებში) დროის მიმართ (ნანოწამებში) მას შემდეგ, რაც

გამოყენებული იქნა SVD-ზე დაფუძნებული პასიურობის უზრუნველყოფის ალგორითმი.

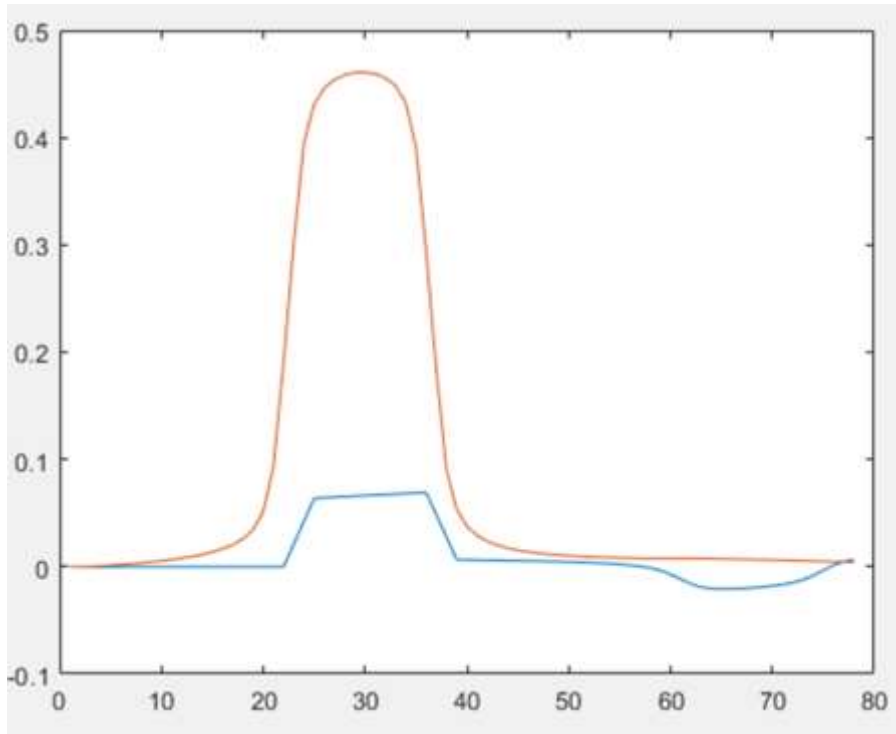
დაფიქსირებული მაქსიმალური ამპლიტუდის განსხვავება შეადგენს 0.4304 მვ-ს, რაც, განსაზღვრული პასიურობის ხარისხის მეტრიკის მიხედვით, განეკუთვნება „კარგი“ კატეგორიას (0–5 მვ). ეს მიუთითებს, რომ მიღებული პასიური მოდელი მაქსიმალურად ინარჩუნებს საწყისი მოდელის ქცევას და ამავდროულად აკმაყოფილებს პასიურობის მოთხოვნებს (Vediakovi, Tabatadze and Işcan 2025)



ნახ. 22. $sum=0.4304$, PCB პლატა (კარგია)

ნახაზი 23 ასახავს იმავე შედარებას Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p მონაცემების საფუძველზე. იგი აჩვენებს ამპლიტუდის განსხვავებას ΔV (მვ) დროის მიმართ (ნს) მას შემდეგ, რაც განხორციელდა სინგულარული მნიშვნელობების დაშლაზე დაფუძნებული პასიურობის უზრუნველყოფა.

მაქსიმალური დაფიქსირებული განსხვავება შეადგენს 6.3353 მვ-ს, რაც პასიურობის ხარისხის მეტრიკის მიხედვით მიეკუთვნება „მისაღები“ კატეგორიას (5–10 მვ). ეს ადასტურებს, რომ მიღებული პასიური მოდელი ინარჩუნებს მისაღებ შესაბამისობას საწყისი მონაცემებთან და ამავდროულად უზრუნველყოფს პასიურობას.



ნახ. 23. $sum=6.3353$. 50 ომიანი წინაღობის გამტარი (მისაღებია)

წარმოდგენილ კვლევაში განხილულია პრაქტიკული მეთოდოლოგია პასიურობის უზრუნველყოფისთვის ინტერპოლირებულ და ექსტრაპოლირებულ S-პარამეტრულ მონაცემებზე, რაც დაფუძნებულია სინგულარული მნიშვნელობების დაშლაზე (SVD). შემოთავაზებული ალგორითმი მიზნად ისახავს მინიმალური დარღვევებით უზრუნველყოს პასიურობა, შეინარჩუნოს მოდელის სიზუსტე და ფიზიკური სანდოობა.

პასიურობის გაძლიერების ზემოქმედების შესაფასებლად შემუშავებული იქნა პასიურობის ხარისხის მეტრიკა, რომელიც ეფუძნება დროში განსაზღვრულ იმპულსურ რეაგირებაზე მოდელის ანალიზს. ეს მეტრიკა რაოდენობრივად აფასებს ორ მოდელს – პირვანდელს და პასიურობას დაქვემდებარებულს – შორის არსებული განსხვავებას ფიზიკური ერთეულებით (მილივოლტებში), რაც მნიშვნელოვნად ამარტივებს პრაქტიკულ შეფასებას.

მეთოდოლოგიის ეფექტიანობა შემოწმდა ორ საცდელ მონაცემთა ნაკრებზე:

- **Through_20GHz.s2p**, სადაც მაქსიმალური ვოლტაჟური სხვაობა იყო 0.4304 მვ (კატეგორია – „კარგი“),

- და **Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p**, რომელშიც მაქსიმალური სხვაობა შეადგენდა 6.3353 მვ-ს (კატეგორია – „მისაღები“).

ეს შედეგები ადასტურებს, რომ წარმოდგენილი ალგორითმი ეფექტურად უზრუნველყოფს პასიურობას მინიმალური დამახინჯების პირობებში, რაც მნიშვნელოვანია მაღალი სიჩქარის ინტერკონექტების მოდელირებისა და სისტემურ სიმულაციებში გამოსაყენებლად.

რიცხვითმა ანალიზმა ასევე აჩვენა ალგორითმის მდგრადობა, პროგნოზირებადობა და გამოყენებადობა სხვადასხვა ტიპის მონაცემების შემთხვევაში. წარდგენილი MATLAB-ში შექმნილი კოდი აღმოჩნდა, როგორც ეფექტური და ადვილად ინტეგრირებადი ინსტრუმენტი საინჟინრო სამუშაო პროცესებში, რაც ამცირებს ხელით ჩარევის აუცილებლობას და აუმჯობესებს დიზაინის ხარისხს.

საერთო ჯამში, წარმოდგენილი მიდგომა წარმოადგენს დაბალანსებულ გადაწყვეტას, რომელიც სთავაზობს მკაცრ მათემატიკურ უზრუნველყოფას პასიურობისა და ამავე დროს ინარჩუნებს მოდელის რეალურობისა და სიზუსტის მაღალი დონეს. მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ მეთოდი არა მხოლოდ თეორიულად გამართულია, არამედ პრაქტიკულად გამოსაყენებელი და აპლიკაციისთვის მზა იარაღია (Vediakovi, Tabatadze and İşcan 2025).

მომავალი კვლევები მიზნად უნდა ისახავდეს მის გაფართოებას მრავალპორტიან და არაწრფივ სისტემებზე, გამოთვლითი ეფექტიანობის გაუმჯობესებას მასშტაბურ ამოცანებზე და ადაპტიურ იძულებით განხორციელების ტექნიკის დანერგვას, რაც უზრუნველყოფს უფრო მაღალ სიზუსტეს რთულ მოდელირების პირობებში.

4.4. სიგნალის მდგრადობის შეფასება ხმაურის პირობებში

ზემოთ აღნიშნული კვლევები ჩავატარეთ იმ მოსაზრებით რომ ქსელში არ არის ხმაური. ჩავთვალეთ, რომ უნდა გაგვეგრძელებინა კვლევა და გამოვიკვლიეთ ქსელის მდგრადობა ხმაურის პირობებში, რადგან ხმაური რეალური სისტემებისთვის გარდაუვალია. გამოკვლეულ ქსელში შემავალ სიგნალს დავამატეთ ე.წ. გაუსის

ხმაური და შევისწავლეთ საშუალო გადახრა უხმაურო და ხმაურიან გამომავალ სიგნალებს შორის. კვლევა ჩატარდა ხმაურის სხვადასხვა შემთხვევებისთვის.

კვლევისთვის კვლავ გამოვიყენეთ MATLAB, დავწერეთ კოდი სადაც შემავალ სიგნალს დავამატეთ გაუსის ხმაური. გაუსის ხმაურის გენერირებაც ჩამოწმებულია MATLAB-ში.

```
input = awgn(input,70); აქ ხდება ხმაურს დადება gn gausis xmauri
outputn=zeros(length(input));
for i=1:length(input)
    for j=1: length(transfer)
        outputn(i)=outputn(i)+transfer(j)*feinput(i-j); ეს აგენერირებს
        საწყის სიგნალს
    end
end
figure(51);
plot(outputn, 'color', 'red')
```

გამომავალი სიგნალის კონვოლუციის გათვლა და შესაბამისი დიაგრამის დახაზვა ხმაურის არსებობის დროს.

საშუალო გადახრას ანუ ERR -ს ვითვლით ფორმულით:

$$გადახრა = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{output_{clean}(i) - output_{noisy}(i)}{output_{clean}(i)} \right|$$

$output_{clean}(i)$ – არის გამომავალი სიგნალი ხმაურის გარეშე.

$output_{noisy}(i)$ – არის გამომავალი სიგნალი ხმაურის არსებობის დროს.

გადახრის კოეფიციენტის დათვლა

```
err=0;
for i=1:length(output)
    if abs(output(i))~=0
        err=err+abs(output(i)-outputn(i))/abs(output(i))
    end
end
err=err*100/length(output)
```

ინტერპოლაცია და ექსტრაპოლაცია

მონაცემების და პარამეტრების წაკითხვა

```
clc; clear all; close all;
```

ასუფთავებს სამუშაო სივრცესა და ფანჯრებს. შემდეგში:

```
[freq,Sdata,npts] = fromtouchn('Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p');
```

ჩატვირთვა ხდება .s2p ფორმატის S-პარამეტრების ფაილის (მიკროზოლის მოდელი), რაც წარმოადგენს ორპორტიან ქსელს.

S21 პარამეტრის გამოტანა და დისკრეტიზაცია

```
matlab
```

```
CopyEdit
```

```
s21 = squeeze(Sdata(2,1,:));
```

```
df = freq(2)-freq(1);
```

ამ კოდით მიიღება გადაცემის ფუნქცია S21S_{21}S21 და დათვლილია სიხშირეთა ბიჯი (შუალედი).

გადავრცელება DC- მდე (სიხშირე = 0)

```
if(freq(1) ~= 0)
```

```
    disp('extrapolating to dc ...');
```

```
    [freq,s21] = dcextrapolation(freq,s21);
```

```
end
```

თუ სიხშირე ნულიდან არ იწყება, გამოიყენება DC ექსტრაპოლაცია — რაც მნიშვნელოვანია კაუზალობის უზრუნველსაყოფად.

ინტერპოლაცია და უარყოფითი სიხშირეების დამატება

```
s21 = interpolation(freq,s21,new_freq);
```

```
s21_conj = add_conj(s21);
```

ეს ნაბიჯი აუცილებელია ინვერსული ფურიეს გარდაქმნისთვის, რომელიც დროის დომენზე გადასვლას უზრუნველყოფს.

დროის დომენზე გადასვლა

```
transfer=real(iff(s21_conj));
```

გამოთვლილია სისტემის იმპულსური რეაქცია h(t), რომელიც აუცილებელია კონვოლუციისთვის.

შემავალი სიგნალის გენერაცია

```
x=[0,1,0,1,...]; % ბიტური მიმდევრობა
input=signal(x,risetime1,falltime1,datarate1,disktime1);
```

ესაა მოდელირებული ციფრული სიგნალი (მაგ. 101010...), რომელსაც აქვს რეალური ტრანზიციების დროები.

FFE - Feedforward Equalizer გამოყენება

```
TD=1;
C0=1; C1=1; C2=-1;
for i=2*TD+1:length(input)
    ffeinput(i) = c0*input(i) + c1*input(i-1*TD) + c2*input(i-2*TD);
end
```

ეს არის მარტივი წინასწარ განსაზღვრული წონებით აშენებული **FFE**, რომელიც მიზნად ისახავს ISI-ის შემცირებას.

სისტემის რეაქციის გამოთვლა კონვოლუციით

```
for i=1:length(input)
    for j=1:length(transfer)
        if ( i-j>0 && i-j<=length(input) )
            output(i)=output(i)+transfer(j)*ffeinput(i-j);
        end
    end
end
```

ეს წარმოადგენს კონვოლუციას შეყვანასა და იმპულსურ რეაქციას შორის, რათა მივიღოთ გამოსავალი ხმაურის გარეშე.

ხმაურის დამატება

```
input = awgn(input,10); % Additive White Gaussian Noise (SNR = 10 dB)
```

სიგნალს ემატება თეთრი გაუსიანური ხმაური, რითაც ის ტესტირდება რეალურ პირობებში.

კონვოლუცია ხმაურიან შემთხვევაში

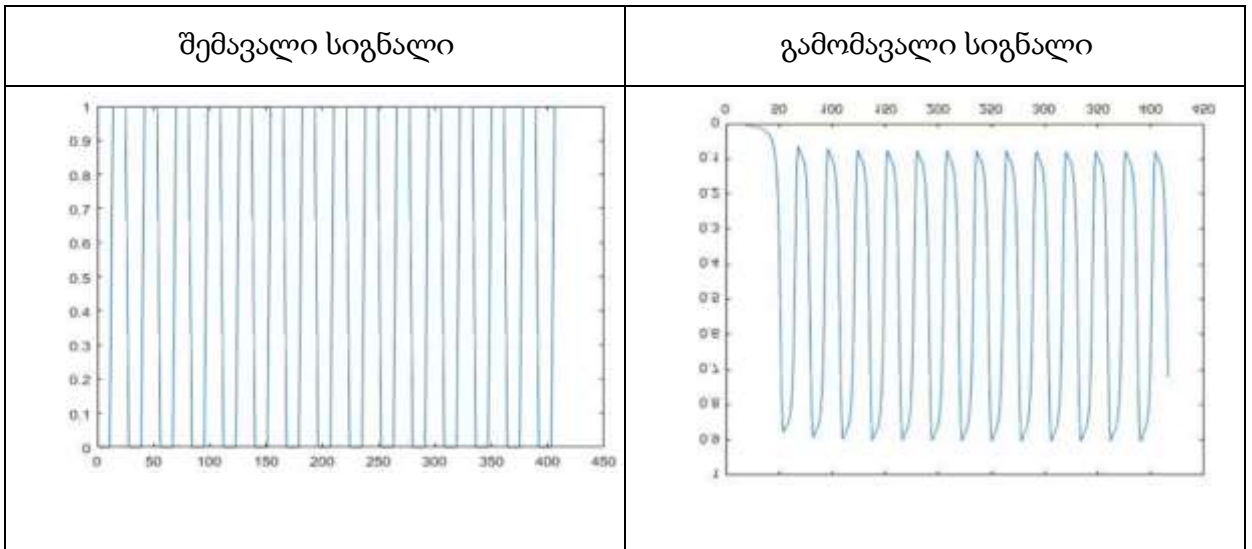
გამოითვლება მეორე კონვოლუცია უკვე ხმაურიან შეყვანაზე.

შეცდომის შეფასება (ფარდობითი შეცდომა - ERR)

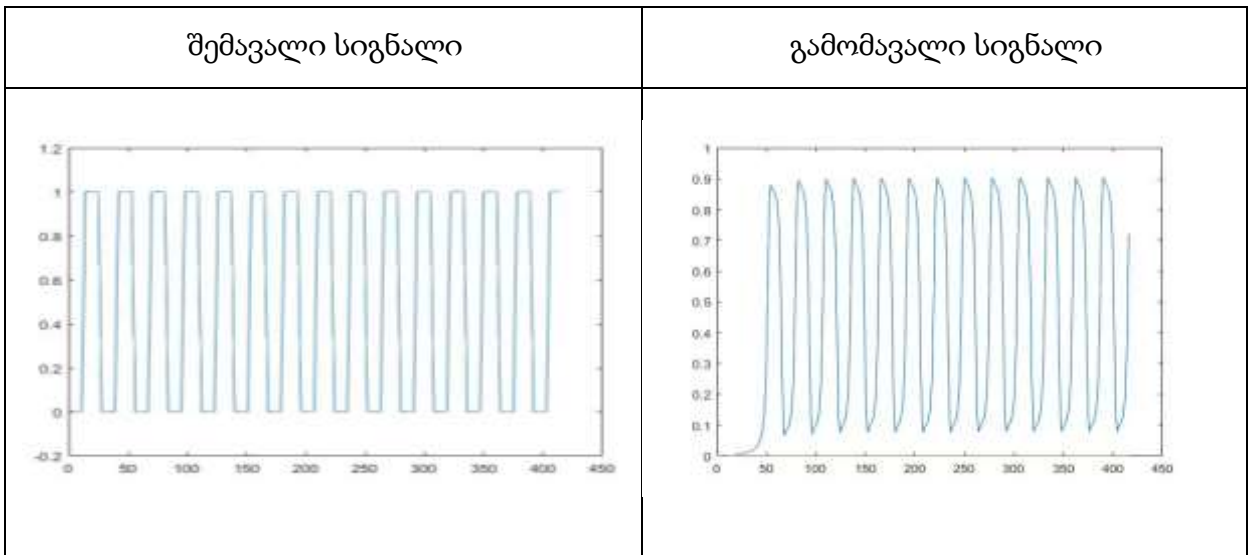
```
for i=1:length(output)
    if abs(output(i))~=0
        err=err+abs(output(i)-outputn(i))/abs(output(i));
    end
end
err=err*100/length(output)
```

გამოთვლილია საშუალო ფარდობითი შეცდომა ხმაურთან და სუფთა გამოსავალს შორის პროცენტებში — ERR მეტრიკა.

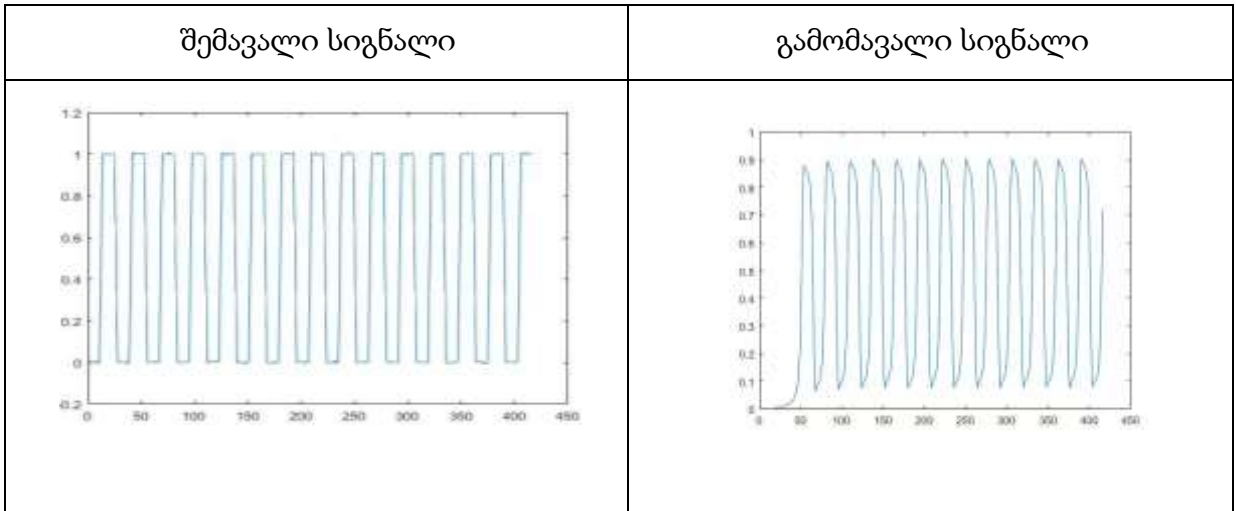
კვლევის შედეგები



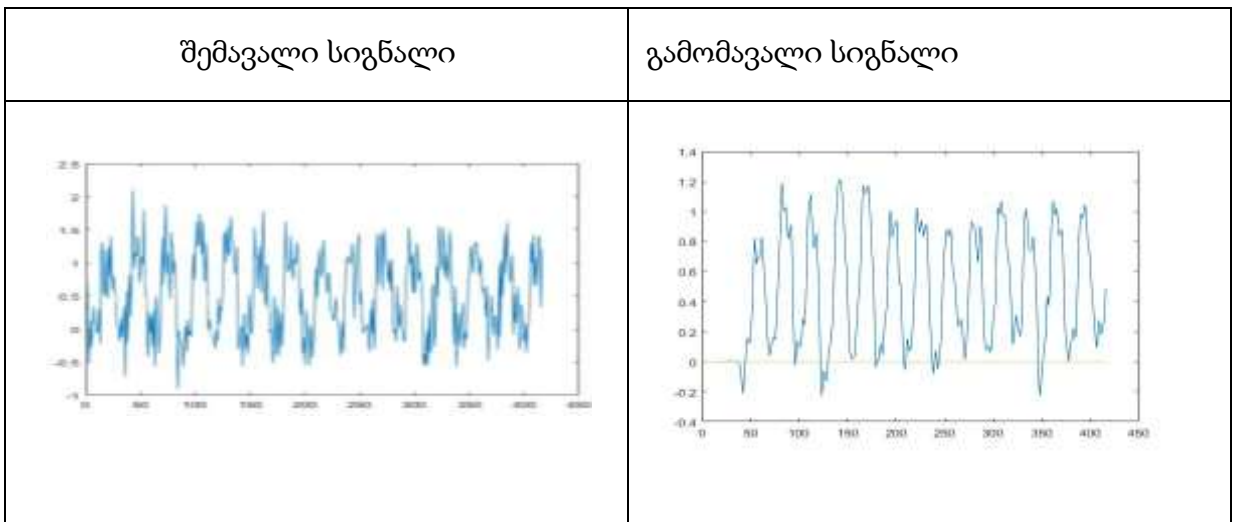
დიაგრამა 1. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი =100



დიაგრამა 2. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი =90



დიაგრამა 3. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი =50



დიაგრამა 4. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი =10

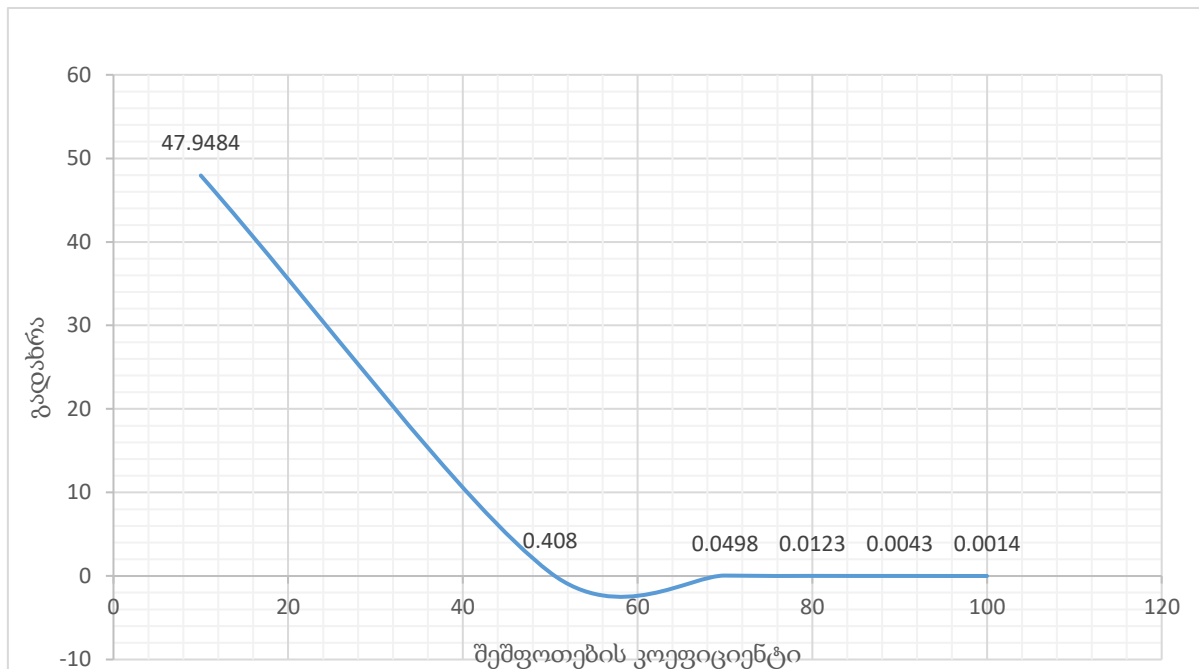
საკვლევად აღებული იყო 50 ომიან ქსელის კაბელზე და მივიღეთ ასეთი სურათი: და აქვე უნდა აღინიშნოს რომ როდესაც ხმაურის კოეფიციენტი 100-ის ტოლია მაშინ ყველაზე მცირეა ხმაური, როდესაც მნიშვნელობა იკლებს ხმაურიც მატულობს.

ცხრილი 3-ში მოყვანილია კვლევის შედეგები ხმაურის სხვადასხვა შემთხვევისთვის და ჩანს რომ ცდომილებაც შესაბამისად იზრდება, ე.ი. სიგნალი მახინჯდება.

შემფოთების კოეფიციენტი	100	90	80	70	50	10
ERR -ის მნიშვნელობები	0.0014	0.0043	0.0123	0.0498	0.4080	47.9484

ცხრილი 3. 56 ომიან ქსელის კაბელზე კვლევის შედეგები ხმაურის სხვადასხვა შემთხვევისთვის

56 ომიან ქსელის კაბელზე კვლევის შედეგები ხმაურის სხვადასხვა შემთხვევისთვის და ჩანს რომ ცდომილებაც შესაბამისად იზრდება, ე.ი. სიგნალი მახინჯდება.



დიაგრამა 5. ხმაურის გავლენა სიგნალზე

აქ დავითვალეთ საშუალო ფარდობითი გადახრის შეცდომა (ERR) პროცენტებში. იგივე სიგნალებისთვის შემდეგ დავითვალეთ სიგნალის და ხმაურის ფარდობა დეციბელებში **SNR**.

მიკროზოლოვან ხაზში სიგნალის ქცევის ანალიზი ხშირად ხდება გადაცემითი ხაზების თეორიისა და სიხშირითი დომენის მოდელირების გამოყენებით, სადაც გადაცემითი ფუნქცია წარმოადგენს ხაზის ქცევის სიზუსტით მოდელირების

საშუალებას (Ramo S. 1994). კონვოლუციის გამოყენება სიხშირით დომენში საშუალებას გვაძლევს ზუსტად განვსაზღვროთ იმპულსზე გადამცემი ხაზის გავლენა (Oppenheim A.V. 1997)

სისტემებში ხშირად ვხვდებით სხვადასხვა ტიპის ხმაურს, რომელთა შორის, როგორც უკვე აღნიშნული გვაქ, ყველაზე გავრცელებულია *გაუსის თეთრი ადიტიური ხმაური (AWGN)*. იგი კარგად აღწერს თერმულ და ელექტრონულ ხმაურებს რეალურ გარემოში (Proakis 2008). MATLAB-ის `awgn()` ფუნქცია კი საშუალებას იძლევა ექსპერიმენტულად დაემატოს ეს ხმაური სიგნალს და შეფასდეს მისი ზემოქმედება (AWGN Function., MathWorks 2025).

ამ კვლევაში ვიხილავთ, თუ როგორ ზემოქმედებს 56 ომიანი მიკროზოლოვანი ხაზი პერიოდულ იმპულსზე და როგორ იცვლება სიგნალის სტაბილურობა სხვადასხვა ხმაურის პირობებში.

განხილულია პერიოდული იმპულსი, რომელსაც ახასიათებს განსაზღვრული ამპლიტუდა, პულსის სიგრძე და განმეორების სიხშირე, გადაცემული **56 ომიან მიკროზოლოვან ხაზზე**. მიკროზოლოვანი ხაზი აღიწერება მისი სიხშირითი გადაცემითი ფუნქციით $H(f)$, რომელიც ხაზის შესუსტებასა და ფაზურ ცვლილებებს ასახავს.

შეყვანილი სიგნალი $x(t)$ გარდაიქმნება სიხშირულ არეში:

$$X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} \quad (4.8)$$

სისტემის რეაქცია სიხშირით დომენში მიიღება შეყვანილი სიგნალისა და გადაცემითი ფუნქციის ნამრავლით:

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f) \quad (4.9)$$

შემდეგ კი დროით არეში აღდგება: $y(t) = \mathcal{F}^{-1}\{Y(f)\}$ (4.10)

ასეთი მოდელირება ასახავს რეალურ დამახინჯებებს, მაგალითად, სიგნალის შესუსტებასა და გადაცემის შეფერხებას.

რეალური გარემოს ზუსტი მოდელირებისთვის შევიტანეთ AWGN, MATLAB-ის `awgn()` ფუნქციის გამოყენებით:

```
matlab
```

```
CopyEdit
```

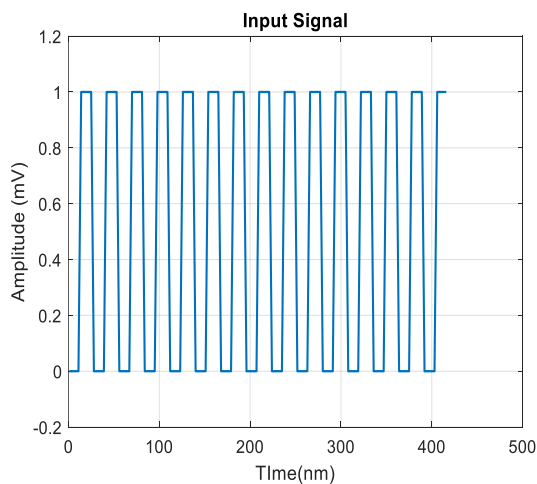
```
y_noisy = awgn(y_clean, SNR);
```

სადაც:

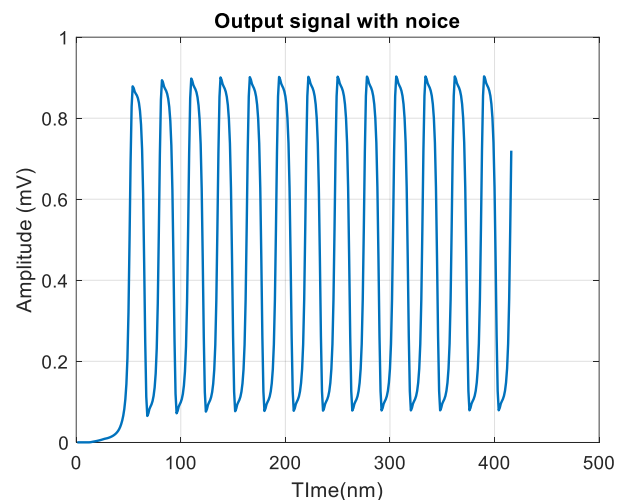
- y_{clean} – კონვოლუციით მიღებული სუფთა სიგნალია;
- SNR – სიგნალ-ხმაურის ფარდობა დეციბელებში;
- y_{noisy} – ხმაურიან სიგნალთან ერთად.

AWGN არის საშუალო მნიშვნელობის მქონე ნულოვანი და ფიქსირებული დისპერსიის ხმაური, რომლის სიმძლავრე მოცემული SNR-ის შესაბამისად განისაზღვრება. მისი სპექტრი თეთრია (ყველა სიხშირეზე ერთნაირი), ხოლო ამპლიტუდა – თანაბარი. კვლევის ფარგლებში გამოვიყენეთ სხვადასხვა SNR:

- 20 dB
- 50 dB

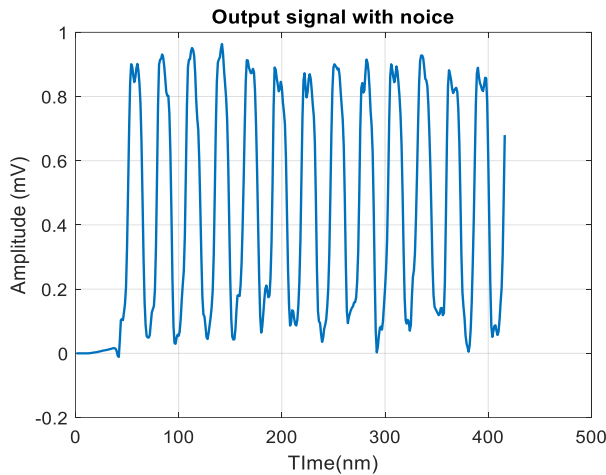


დიაგრამა 6. შემაგალი სიგნალი ხმაურის გარეშე

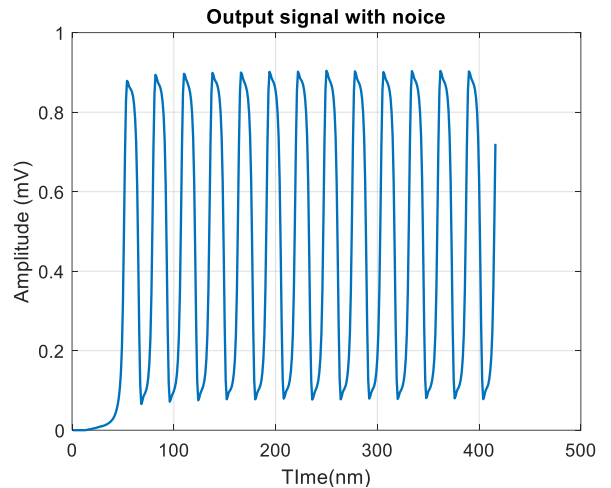


დიაგრამა 7. გამომავალი სიგნალი ხმაურის გარეშე.

დიაგრამა 3-ზე მოცემულია შემაგალი პერიოდული სიგნალი. როგორც ვხედავთ იმპულსები კვადრატულია და თანაბარი. დიაგრამა 4 - გვიჩვენებს გამომავალ სიგნალს ხმაურის გარეშე და გამომავალი იმპულსი ცოტა შეცვლილია მიკროზოლოვან ხაზში გავლის გამო, თუმცა ამპლიტუდები თითქმის თანაბარია.



**დიაგრამა 8. გამომავალი სიგნალი ხმაურით
SNR=20 DB**



**დიაგრამა 9. გამომავალი სიგნალი ხმაურით
SNR=50 DB**

დიაგრამა 5 გვიჩვენებს გამომავალ იმპულსს, როდესაც ხმაურის დონე SNR=20 DB. ამ შემთხვევაში სიგნალი მნიშვნელოვნად დამახინჯებულია. გადახრა სუფთა სიგნალსა და დამახინჯებულს შორის $\varepsilon = 13\%$.

დიაგრამა 6 გვიჩვენებს გამომავალ სიგნალს, როდესაც ხმაურის დონე SNR=50 DB. ამ შემთხვევაში სიგნალი თითქმის სუფთაა. გადახრა სუფთა სიგნალსა და დამახინჯებულს შორის $\varepsilon = 0.4\%$.

შედეგებმა აჩვენა, რომ SNR ≥ 50 dB უზრუნველყოფს სიგნალის სტაბილურობას და სავალდებულოა მაღალკვალიფიციური სისტემებისთვის (ვედიაკოვი 2025, 105-109).

კვლევამ დაადასტურა, რომ სისტემის გადაცემითი ფუნქციის გამოყენებით კონვოლუცია ეფექტურად აჩვენებს 56 ომიან მიკროზოლოვან ხაზში პერიოდული იმპულსის გადაცემას. MATLAB-ის awgn() ფუნქცია კი საშუალებას იძლევა რეალისტურად შევისწავლოთ ხმაურის გავლენა. SNR ≥ 50 dB ოპტიმალური პირობაა სიგნალის ხარისხის შესანარჩუნებლად.

აგრეთვე კვლევამ აჩვენა, რომ როდესაც ხმაური იზრდება ისე რომ მისი ERR კოეფიციენტი 70-ზე ნაკლებია, სიგნალი საკმაოდ მახინჯდება და ამ დონის ხმაურის არსებობის შემთხვევაში მოწყობილობა აღარ გამოდგება (ვედიაკოვი 2025, 105-109).

თავი 5. რიცხვითი ექსპერიმენტის შესასრულებლად საჭირო MATLAB კოდი

5.1 ციფრული სიგნალის გენერირება დროის დომენში

ეს ფუნქცია signal ქმნის ტრაპეციული ფორმის დროებრივ სიგნალს ვექტორის x საფუძველზე, რომელიც შედგება ნულებისა და ერთიანებისგან. თითოეული „1“ წარმოდგენილია როგორც იმპულსი, რომელიც შეიცავს წანაცვლებითსა და დაცემით ნაწილებს — შესაბამისად rise time, fall time, და მუდმივ დონეს. მიღებული სიგნალი იდეალურია ციფრული სისტემების სიმულაციისთვის (მაგალითად, ინტერფეისის ხაზებზე იმპულსური რეაქციის მოდელირებისთვის).

შეყვანის პარამეტრები

matlab

CopyEdit

```
function [ y ] = signal( x, risetime, falltime, datarate, disktime )
```

- x — სიგნალის ციფრული დონეები (მაგ. [0 1 1 0 0 ...]).
- risetime — იმპულსის ამოსვლის დრო.
- falltime — იმპულსის დაცემის დრო.
- datarate — იმპულსის აქტიური განყოფილების ხანგრძლივობა.
- disktime — დისკრეტიზაციის პერიოდი.

სტრუქტურის განსაზღვრა — რამდენი „ასვლა“ და „ჩამოსვლა“ გვაქვს

```
for i = 1:length(x)-1
```

```
    if x(i)==0 && x(i+1)==1
```

```
        countrise = countrise + 1;
```

```
    end
```

```
    if x(i)==1 && x(i+1)==0
```

```
        countfall = countfall + 1;
```

```
    end
```

ითვლება იმპულსების რაოდენობა.

(Aydin და Chaparro 2024)

დროის სკალის გათვლები და შედეგის ვექტორის ინიციალიზაცია

```
t = datarate*length(x) + countrise*risetime + countfall*falltime;
```

```
n = round(t / disktime);
```

```
y = zeros(n,1);
```

გრძელდება სრული სიგნალის ხანგრძლივობის გამოთვლა და ინიციალიზდება ნულებით სავსე ვექტორი y .

სიგნალის აგება while ციკლით

კოდი გადის ვექტორ x -ზე ელემენტობრივად და ქმნის შესაბამის ტრაპეციულ

იმპულსს y -ში:

ტრანზიციები:

- $0 \rightarrow 1 \rightarrow$ დამატებულია ამოსვლის დრო + მუდმივი დონე.
- $1 \rightarrow 0 \rightarrow$ დამატებულია დაცემის დრო + ნულოვანი დონე.
- $1 \rightarrow 1 \rightarrow$ დარჩება მაღალ დონეზე.
- $0 \rightarrow 0 \rightarrow$ დარჩება დაბალ დონეზე.

მაგალითი:

for k = 1: nrise

y(county) = (k-1)/(nrise-1); % ამოსვლის წრფივი ტრანზიცია

ასევე გამოიყენება დაცემისთვის:

for k = 1: nfall

y(county) = 1 - (k-1)/(nfall-1); % დაცემის ტრანზიცია

ეს ფუნქცია გამოიყენება კონკრეტული იმპულსური ციფრული სიგნალის ფორმირებისთვის, სადაც შესაძლებელია გრადუალური ამოსვლისა და დაცემის მახასიათებლების პარამეტრიზება. იგი ფართოდ გამოიყენება იმპულსური რეაქციის ტესტირებისთვის, ფილტრების ანალიზისთვის, ან სიგნალის გამავრცელებელი სისტემების (მაგ. PCB ტრასების, მიკრონ აწყობების) რეაქციის შესასწავლად.

5.2 ექვალაიზაციის ალგორითმი თვალის დიაგრამის ანალიზისთვის

კოდი წარმოადგენს სიხშირის დომენში აღწერილი მიკროგაგადამცემის მოდელირების, დროის დომენში გადაყვანისა და იმპულსური რეაგირების შეფასების ალგორითმს, რომელიც მოიცავს შემდეგ ნაბიჯებს:

ელექტრონული წრედის კაუხალობისა და პასიურობის ანალიზი:

მონაცემების წაკითხვა და დაწყებითი დამუშავება, კოდი იწყება S-პარამეტრების (.s2p) ფაილის წაკითხვით fromtouchn ფუნქციით. S21 პარამეტრი გამოთვლილია და შემოწმებულია DC კომპონენტი. საჭიროების შემთხვევაში გამოიყენება dextrapolation.

ინტერპოლაცია და სიხშირის მასივის გაფართოება მონაცემები გადადიან თანაბარ სიხშირით განაწილებულ ბადეზე interpolation ფუნქციის მეშვეობით, შემდეგ დამატებულია conjugate კომპონენტები უარყოფითი სიხშირეებისთვის (add_conj).

```

% --- მონაცემთა ინტერპოლაცია
New_N = floor(freq(end)/df);
new_freq = df*(ceil(freq(1)/df):New_N)';
s21 = interpolation(freq,s21,new_freq);
freq = new_freq;
N = length(freq);

```

ჰილბერტის გარდაქმნის შეფასება:

ჰილბერტის გარდაქმნა S21-ის წარმოსახვით კომპონენტზე გამოიყენება რეალური ნაწილი შესაფასებლად და ორიგინალურ და რეალურ მონაცემთ შედარებისთვის.

ესაა ჰილბერტის გარდაქმნის გამოყენება ფაზის აღსადგენად

```

hil = hilbert(s21im);
rehil = real(hil);
rehilshifted = zeros(length(rehil),1);
rehilshiftedinv = zeros(length(rehil),1);

    for i = 26:length(rehil)
        rehilshifted(i) = rehil(i-25);
    end
    for i = 1:length(rehil)
        rehilshiftedinv(i) = rehilshifted(length(rehil)-i+1);
    end

```

```

figure(110);
plot(rehilshifted,'color','red');
hold on;
plot(s21re,'color','blue'); %აუცილებელია კაუზალობის შესამოწმებლად.

```

სიგნალის ტრანსფორმაცია დროის დომენში

გამოთვლილია უკუ ფურიეს გარდაქმნა (IFFT) გადაცემის ფუნქციისთვის და მიღებულია დროის დომენის რეაქცია.

სისტემის იმპულსური რეაქციის გამოთვლა IFFT-ის გამოყენებით

```

transfer = real(IFFT (s21_conj));
i = 1:length(transfer)

```

შესაყვანი სიგნალის გენერაცია და FFE ფილტრაცია

შეიქმნა შესაყვანი ბიტური სიგნალი და დამუშავდა წინასწარი თანაბარი ეკვალიზატორით (FFE), რაც ფილტრავს არხის დამახინჯებებს.

სისტემური რეაქციის სიმულაცია კონვოლუციით

გადაცემის ფუნქცია გამოიყენება შესაყვან სიგნალთან კონვოლუციაში, იმისათვის რომ მოდელირდეს გამომავალი სიგნალი დროის დომენში.

```
% --- არხის გამტარობის მოდელირება კონვოლუციით
output = zeros(length(input),1);
for i = 1:length(input)
    for j = 1:length(transfer)
        if( i-j>0 && i-j<=length(input) )
            output(i) = output(i) + transfer(j)*ffeinput(i-j);
        end
    end
end
end
```

DFE ეკვალიზერის გამოყენება

რეალიზებულია Decision Feedback Equalizer (DFE), რომელიც გამომავალს ასწორებს წარსულ სიმბოლოებზე დაყრდნობით.

```
% --- Decision Feedback Equalizer (DFE)
dfeoutput = zeros(length(output),1);
k = 1;
c1 = 2;
c2 = -1;
for i = 2*k+1: length(output)
    dfeoutput(i) = c1*output(k-1) + c2*output(k-2);
end
figure(9);
plot(dfeoutput
```

თვალის დიაგრამების აგება

შესაყვან და გამომავალ სიგნალებზე აგებულია თვალის დიაგრამები, რაც საშუალებას იძლევა შევაფასოთ გადაცემის არხის ხარისხი და დეფორმაცია.

```
%-- თვალის დიაგრამის გენერაცია (output)
outeyeup=zeros (1, 1);
outeyedown=zeros (1, 1);
```

```

for j=1: size
    for i=1:28
        outeyeup(i,j)=output(i+25+1*(j-1));
    end
end
end
for j=1:15
    for i=1:l
        outeyedown(i,j)=output(i+39+1*(j-1));
    end
end
end

```

ბინარული სიგნალის გარდაქმნა ტრაპეციულ ფორმატში – რეალისტური დროითი პროფილის სიმულაცია
 ფუნქცია: signal.m

იმპულსური სიგნალის გენერაცია MATLAB-ში

ფუნქციის მიზანი:

ფუნქცია იღებს ბინარულ ვექტორს (მაგ. [0 1 1 0 1]) და აბრუნებს სიგნალს, რომელშიც თითოეული ცვლილება 0-დან 1-ზე (rise) ან 1-დან 0-ზე (fall) ხდება არა მყისიერად, არამედ გარკვეული დროის განმავლობაში ტრაპეციული პროფილით. ეს უფრო ზუსტად ასახავს ფიზიკური სისტემების ქცევას (მაგ. ტრანსმისტორების/მაბვის გაწელვა).

არგუმენტები:

X - ბინარული სიგნალი (0 და 1)

Risetime - ამოსვლის დრო (მაგ., 1 ნანოწამი)

Falltime - ჩასვლის დრო

Datarate - თითოეული ბიტის ხანგრძლივობა

Disktime - დისკრეტიზაციის ინტერვალი დროის ღერძზე (sampling step

მუშაობის პრინციპი:

1. გარდამავალი წერტილების დათვლა

კოდი ამოსვლის (0 → 1) და ჩავარდნის (1 → 0) რაოდენობებს ითვლის, რაც დროის სიგრძის გამოთვლისთვის არის საჭირო:

```

if (x(i)==0 && x(i+1)==1)
    countrise = countrise + 1;
end
if (x(i)==1 && x(i+1)==0)

```

```

countfall = countfall + 1;
end
საერთო დროის გამოთვლა
t = datarate * length(x) + countrise * risetime + countfall * falltime;
n = round(t / disktime);
y = zeros(n, 1); % საბოლოო სიგნალი, რომლის თითოეულ ელემენტს ამ დროით
ვაკსებთ

```

კონვერტირება დროიდან ნიმუშებში

matlab

CopyEdit

```

ndata = round(datarate / disktime); % რამდენი ნიმუში შეესაბამება ერთ ბიტს
nrise = round(risetime / disktime); % წელი ამოსვლის სიგრძე ნიმუშებში
nfall = round(falltime / disktime); % წელი ჩავარდნის სიგრძე ნიმუშებში

```

ძირითადი ალგორითმი – while ციკლი:

ეს ნაწილი აგებს საბოლოო სიგნალს y , რომელიც გამოხატავს:

- ერთიანებს,
- ნულებს,
- ამოსვლებს (ნულიდან ერთამდე)
- ჩასვლას (ერთიდან ნულამდე)
- თუ ახალ პოზიციაზე ვხვდებით 1, ხოლო წინა იყო 0, მაშინ გვჭირდება ამოსვლა (ramp up).

```

for k = 1:nrise

```

```

    y(county) = (k-1)/(nrise-1);

```

```

    county = county + 1;

```

```

end

```

- ხოლო როცა $1 \rightarrow 0$ გადასვლაა, გვჭირდება ჩასვლა:

matlab

CopyEdit

```

for k = 1:nfall

```

```

    y(county) = 1 - (k-1)/(nfall-1);

```

```

    county = county + 1;

```

```

end

```

შუალედებში ვამატებთ შესაბამისი სიგრძის მუდმივ დონეს – ანუ 1 ან 0-ის დაფიქსირებას დროით დიაპაზონში.

y არის დროით ნიმუშიან სივრცეში აგებული სიგნალი, რომელიც თავდაპირველი ბიტური მიმდევრობის ტრაპეციულ-დროით მოდელაციას

ახორციელებს. იდეალურია რეალურ სისტემათა სიმულაციებისთვის, სადაც ტრანზიციები ფარდობითია და არა მყისიერი.

დასკვნა

წარმოდგენილი კვლევა ეფუძნება თანამედროვე ელექტრონული სისტემების მოდელირებისა და ვერიფიკაციის კრიტიკულ საჭიროებებს. კვლევის მიზანი იყო ელექტრონული წრედების პარამეტრების კორექტულობის შემოწმების ალგორითმების განვითარება და მათი ეფექტიანობის პრაქტიკული დადასტურება. აღნიშნული ამოცანა უკავშირდება N-პარამეტრებზე დაფუძნებულ მოდელებს, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება მაღალსიხშირიან სისტემებში. მიუხედავად მათი გავრცელებისა, ასეთი მოდელების გამოყენება გამართლებულია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ისინი აკმაყოფილებენ ფიზიკურ თანხვედრას – კაუზალობას, პასიურობას და შექცევადობას. ფიზიკური შეზღუდვების დარღვევამ შეიძლება სისტემის არასტაბილურობა და გაუმართაობა გამოიწვიოს, რის გამოც ამ პრობლემის გადაჭრა კვლევის ერთ-ერთ მთავარ გამოწვევას წარმოადგენს.

დასკვნითი ნაწილი ხაზს უსვამს კვლევის ძირითად მიღწევებს, მათ პრაქტიკულ მნიშვნელობას და სამომავლო განვითარების პერსპექტივებს.

თეორიული საფუძვლები და მიზნობრიობა: კვლევის პირველივე ეტაპზე დადგინდა, რომ მაღალი სიხშირის სისტემებში სიგნალის მთლიანობის დარღვევებმა შეიძლება მნიშვნელოვნად იმოქმედოს სისტემის სტაბილურობაზე, რის გამოც აუცილებელია მოდელების ხარისხის მკაცრი კონტროლი. ლიტერატურის მიმოხილვამ აჩვენა, რომ ტრადიციული მეთოდები – როგორცაა Vector Fitting, Residue Matrix Correction და SVD-ზე დაფუძნებული ალგორითმები – წარმოადგენენ ეფექტურ ინსტრუმენტს, მაგრამ მათ აქვთ შეზღუდვები რთულ და ჰიბრიდულ სისტემებთან მიმართებით. ეს ფაქტორი ინოვაციური მიდგომების დანერგვის აუცილებლობას განაპირობებს, რომლებიც შეძლებენ ერთდროულად უზრუნველყონ სიზუსტე, გამოთვლითი ეფექტიანობა და ფიზიკურ რეალობასთან შესაბამისობა.

კვლევის ძირითადი შედეგები: შემუშავდა ჰილბერტის დისკრეტულ გარდაქმნაზე დაფუძნებული ალგორითმი კაუზალობის შესამოწმებლად, რომელიც

გადაცემის ფუნქციის რეალური და წარმოსახვითი კომპონენტების შესაბამისობას უზრუნველყოფს და ხელს უწყობს არაკაუზალური კომპონენტების აღმოჩენას.

წარმოდგენილ იქნა პასიურობის განხორციელების მეთოდოლოგია, რომელიც სინგულარული მნიშვნელობების დაშლას (SVD) ეფუძნება და იყენებს მატრიცულ კორექციას მინიმალური დამახინჯებით. ეს მიდგომა ამცირებს მოდელის სტრუქტურის დარღვევის რისკს და სიზუსტის მაღალ დონეს ინარჩუნებს.

შემოთავაზებული მიდგომა ტესტირებულია MATLAB-ის საშუალებით ორ საცდელ მონაცემთა ნაკრებზე (Through_20GHz.s2p და Simulated_Microstrip_6In_56Ohm.s2p), სადაც მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა მაქსიმალური ვოლტაჟური განსხვავება ფიზიკურ ერთეულებში, რაც მიუთითებს ალგორითმის ეფექტიანობასა და პრაქტიკულ სანდოობაზე.

რიცხვითმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა მეთოდების მდგრადობა, ადაპტურობა და გამოყენებადობა მრავალ სცენარში, რაც ხაზს უსვამს მათი პრაქტიკული დანერგვის შესაძლებლობას.

პრაქტიკული მნიშვნელობა: კვლევის შედეგები მნიშვნელოვანია როგორც აკადემიური, ისე ინდუსტრიული თვალსაზრისით. პასიურობისა და კაუზალობის კონტროლი კრიტიკულია მაღალი სიჩქარის PCB-ებისა და ინტერფეისების მოდელირებისთვის, EMC ტესტირებისა და სიგნალის მთლიანობის შენარჩუნებისთვის. MATLAB-ზე დაფუძნებული ალგორითმები წარმოადგენს ეფექტურ ინსტრუმენტს, რომელიც ადვილად ინტეგრირდება საინჟინრო სამუშაო პროცესებში და ამცირებს დიზაინის ციკლის ხანგრძლივობას. IEEE P370 სტანდარტის ინტეგრაცია უზრუნველყოფს მოდელების სტრუქტურულ შესაბამისობას და მათი გამოყენებადობის ხარისხს.

თანამედროვე ტენდენციები და ინოვაციური მიდგომები: PINNs და მანქანურ სწავლებაზე დაფუძნებული ჰიბრიდული მოდელები ქმნიან ახალ ხედვას ვერიფიკაციის სფეროში, სადაც ფიზიკური შეზღუდვები ჩაშენებულია ალგორითმების სტრუქტურაში. ეს მიდგომა ამცირებს ემპირიულ მონაცემებზე დამოკიდებულებას და ზრდის მოდელების პროგნოზირების სიზუსტეს. ამასთანავე, უახლესი ალგორითმები, როგორცაა SROPEE და Spectral MOR, ამცირებს გამოთვლით

ხარჯს და აუმჯობესებს სიმულაციის ეფექტიანობას, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მასშტაბური სისტემების შემთხვევაში.

გამოწვევები და სამომავლო რეკომენდაციები: მიუხედავად მიღწევებისა, კვლავ არსებობს რამდენიმე მნიშვნელოვანი გამოწვევა: enforcement-ალგორითმების ადაპტაცია ჰიბრიდული და არაწრფივი სისტემებისთვის;

- ალგორითმების ინტერპრეტირებადობის გაუმჯობესება ინჟინრისთვის სანდო გადაწყვეტილების მისაღებად;

- სტოქასტიკური და დროში ცვალებადი მოდელების ეფექტური მართვა;

- რეალურ დროში ვერიფიკაციის მექანიზმების დანერგვა ღრუბლოვანი და ჰეტეროგენულ გარემოში.

სამომავლო კვლევებმა უნდა განავითაროს ინტეგრირებული მიდგომები, რომლებიც ფიზიკურ თანხვედრას, მაღალი სიზუსტის პროგნოზირებას და გამჭვირვალობას უზრუნველყოფს. განსაკუთრებული ყურადღება უნდა დაეთმოს AI-ზე დაფუძნებული არქიტექტურების ინტერპრეტირებადობას და სტანდარტებთან შესაბამისობას. ამით შესაძლებელი გახდება უფრო ეფექტური და საიმედო ალგორითმების დანერგვა რთულ საინჟინრო ამოცანებში. დასკვნის საფუძველზე შეიძლება ითქვას, რომ ელექტრონული წრედების პარამეტრების კორექტულობის ვერიფიკაცია გადადის ტრადიციული მეთოდებიდან ინტელექტუალურ პროგნოზირებაზე, რაც ქმნის ახალ შესაძლებლობებს ინოვაციური ტექნოლოგიების დანერგვისთვის. ეს ტრანსფორმაცია მოითხოვს როგორც თეორიული მოდელების გადრმავებას, ასევე პრაქტიკული ალგორითმების განვითარებას, რომლებიც სისტემების სანდოობას, სტაბილურობასა და ინდუსტრიულ მოთხოვნებთან შესაბამისობას უზრუნველყოფენ.

სამომავლო მიმართულებები და რეკომენდაციები

ელექტრონული წრედების პარამეტრების კორექტულობის შეფასების ტექნოლოგიური განვითარება სწრაფად პროგრესირებს და ახალ მიდგომებს, ინსტრუმენტებსა და ინტეგრირებულ სტრატეგიებს მოითხოვს. პარალელურად იზრდება ელექტრონული სისტემების სირთულე, კომპაქტურობა და ფუნქციონალური მოქნილობა, რაც შემდეგი თაობის ვერიფიკაციის მეთოდების შემუშავების აუცილებლობას განაპირობებს. პარამეტრების ყოვლისმომცველი შემოწმების მნიშვნელობა ძნელია გადაჭარბებული იყოს. პარამეტრების ზუსტი მნიშვნელობები ფუნდამენტურია ელექტრონული სქემების განკუთვნილი ფუნქციონალურობის, ოპტიმალური მუშაობის, გრძელვადიანი საიმედოობისა და უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად. რადგან ელექტრონული სისტემები სულ უფრო რთული ხდება და ფართო სპექტრის აპლიკაციებში გამოიყენება, პარამეტრების შემოწმების საიმედო და ეფექტური ტექნიკის საჭიროება მხოლოდ გაიზრდება.

მომავლისკენ ხედვისას, მოსალოდნელია, რომ ელექტრონული წრედის პარამეტრების ვერიფიკაციის ევოლუციაზე რამდენიმე ძირითადი ტენდენცია იმოქმედებს. ხელოვნური ინტელექტისა და მანქანური სწავლების მზარდი გამოყენება გვპირდება, რომ რეკოლუციას მოახდენს ამ სფეროში, რთული წრედებისა და დიდი მონაცემთა ნაკრებების უფრო სწრაფი და ინტელექტუალური ანალიზის საშუალებით. აპარატურული ვერიფიკაციის განვითარება კვლავაც უზრუნველყოფს ძალიან დიდი და რთული დიზაინის ვერიფიკაციის მნიშვნელოვან დაჩქარებას. ღრუბელზე დაფუძნებული სიმულაციისა და ვერიფიკაციის პლატფორმები დემოკრატიზაციას გაუწევს წვდომას მძლავრ გამოთვლით რესურსებზე, რაც მოწინავე ვერიფიკაციის ტექნიკას უფრო ხელმისაწვდომს გახდის მომხმარებელთა უფრო ფართო სპექტრისთვის. ამ მიღწევების მიუხედავად, კვლავ რჩება რამდენიმე გამოწვევა. უკიდურესად რთული წრედებისთვის სიმულაციის სიზუსტისა და სიჩქარის გაუმჯობესება, უფრო მტკიცე და უნივერსალურად გამოყენებადი ფორმალური ვერიფიკაციის ტექნიკის შემუშავება და კომპონენტების ქცევისა და პროცესის ვარიაციების უფრო ზუსტი და ყოვლისმომცველი მოდელების შექმნა ის სფეროებია, რომლებიც საჭიროებენ შემდგომ კვლევასა და განვითარებას.

ელექტრონული წრედის პარამეტრების ვერიფიკაციის სფერო მუდმივად ვითარდება, რაც განპირობებულია წრედების მზარდი სირთულით და უფრო მაღალი შესრულებისა და საიმედოობის მოთხოვნით. მომავალი კვლევები, სავარაუდოდ, ფოკუსირებული იქნება უფრო ინტელექტუალური, ავტომატიზირებულ და ეფექტური ვერიფიკაციის ტექნიკის შემუშავებაზე. პარამეტრების ყოვლისმომცველი და მკაცრი ვერიფიკაცია თანამედროვე ელექტრონული წრედის დიზაინისა და წარმოების შეუცვლელი ნაწილია, რაც მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს ელექტრონული მოწყობილობების ხარისხსა და საიმედოობას.

როგორც ავლინებთ ელექტრონული წრედის პარამეტრების ვერიფიკაცია წარმოადგენს საიმედო და მაღალი ხარისხის ელექტრონული სისტემების დიზაინისა და წარმოების შეუცვლელ ასპექტს. მოცემულ ნაშრომში განხილული იქნა ამ პროცესისთვის ხელმისაწვდომი ალგორითმების და ტექნიკის მრავალფეროვანი სპექტრი, მათ შორის სიმულაციაზე, ანალიტიკაზე, სტატისტიკასა და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მიდგომები.

აღსანიშნავია, რომ S-პარამეტრების ფიზიკური თანხვედრის უზრუნველყოფა — კაუზალობის, პასიურობისა და შექცევადობის ჭრილში — წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან გამოწვევას როგორც თეორიულ მოდელირებაში, ისე სამრეწველო CAD პროცესებში. ტრადიციული ალგორითმები, როგორცაა Vector Fitting, SVD დაფუძნებული კორექციები და Residue Matrix Enforcement, უზრუნველყოფენ მაღალი ხარისხის მაკრომოდელების აგებას და ფართოდ გამოიყენება სტანდარტიზებული მოთხოვნების შესაბამისად.

მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვს IEEE P370 სტანდარტს, რომელიც სტრუქტურულ ჩარჩოს წარმოადგენს S-პარამეტრების მოდელირების, შეფასებისა და პრაქტიკულ გამოყენებადობასთან დაკავშირებით. სტანდარტი არა მხოლოდ მოთხოვნებს განსაზღვრავს, არამედ გვთავაზობს სპეციფიკურ ტესტირებისა და შეფასების მეთოდოლოგიებს.

თანამედროვე მიდგომები, როგორცაა SROPEE, Spectral MOR, და Physics-Informed Neural Networks, ამცირებენ გამოთვლით სირთულეს, ზრდიან სიმულაციის სიზუსტეს და ხსნიან ახალ პერსპექტივებს მოდელების ავტომატური კორექტულობის

უზრუნველსაყოფად. ხელოვნური ინტელექტი და მანქანური სწავლება საშუალებას იძლევა წრედის პარამეტრების ღრმა ანალიზის, რთული არარეგულარული ნიმუშების იდენტიფიკაციისა და გამჭვირვალე ოპტიმიზაციისათვის.

თუმცა, პრაქტიკაში კვლავ არსებობს რამდენიმე მნიშვნელოვანი გამოწვევა:

- მრავალგანზომილებიანი და დროში ცვალებადი სისტემებისთვის განხორციელების (enforcement) სტრატეგიების ადაპტირება;
- ვერიფიკაციის ალგორითმების ინტერპრეტირებადობის ნაკლებობა;
- სანდოობის უზრუნველყოფა სტოკასტიკურ მოდელებში;
- ვერიფიკაციის მოდულების ინტეგრაცია რეალურ დროში ღრუბლოვანი და ჰეტეროგენულ პლატფორმებზე.

ამ ფონზე, **სამომავლო კვლევების ძირითად მიმართულებებს** უნდა წარმოადგენდეს:

- ინტეგრირებული ალგორითმების შექმნა, რომლებიც ერთდროულად უზრუნველყოფენ ფიზიკური თანხვედრის პირობებსა და AI მოდელების გამჭვირვალობას;
- გაუმჯობესებული განხორციელების მოდულების შემუშავება სტოკასტიკური და ჰიბრიდული სისტემებისთვის;
- ნეირონული ქსელების და ევოლუციური ოპტიმიზაციის კომბინაცია მოდელირების ადაპტური სისტემებისთვის;
- განმარტებადობაზე (interpretability) ორიენტირებული მოდელების განვითარება ინჟინრული გადაწყვეტილების გამჭვირვალობისთვის.

ამრიგად, ელექტრონული წრედების მოდელირება და პარამეტრების კორექტულობის ვერიფიკაცია უკვე სცილდება მხოლოდ ტექნიკურ დიაგნოსტიკას — იგი ინტეგრირებულ, ინტელექტუალურ და სტრატეგიულ პროცესად გარდაიქმნება, რომელიც განსაზღვრავს მომავალი ელექტრონული სისტემების სანდოობას, ეფექტურობასა და ინოვაციურ პოტენციალს.

გამოყენებული ლიტერატურა

- Antoulas, A., Sorensen, D. "Passivity-Preserving Model Reduction." *SIAM*, 2022.
- Antoulas, L, and D Sorensen. "Passivity Preserving Model Reduction via Spectral Factorization." *Automatica*, vol. 140, 2022: 1-10.
- AWGN Function., MathWorks . *MATLAB Help Center*. 04 2025.
<https://www.mathworks.com/help/comm/ref/awgn.html>.
- Aydin, Akan, and Luis F Chaparro. *MATLAB and Simulink Based Books*. 2024.
<https://ch.mathworks.com/academia/books/signals-and-systems-using-matlab-chaparro.html>.
- Bechhoefer, J. "Kramers–Kronig, Bode, and the meaning of zero." *American Journal of Physics, Volume 79, Issue 10*, 2011: 1053-1059.
- Beckers, J. Colombo,A. "Physics-Informed Learning for Electronic Systems Verification." *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 44, no. 3, 2025: 512–525.
- Beckers, J., Colombo, A. "Physics-Informed Learning for Electronic Systems Verification." *IEEE Transactions on CAD*, 2025.
- Beckers, Thomas, and Leonardo Colombo. "Physics-Informed Learning for Passivity-Based Tracking Control." 2025: 45.
- Choupanzadeh, Rasul, Ata Zadehgo, and Sr Member. "A Novel Algorithm for Transforming S-Parameters." *IEEE*, 2024: 1-12.
- Doshi, A, and P Pupalaiakis. "Fast and Optimal Algorithms for Enforcing Reciprocity, Passivity and Causality in S-Parameters." *DesignCon*. 1-10, 2012.
- Doshi, A., B. Triverio, et al. "Fast and Optimal Algorithms for Enforcing Reciprocity, Passivity and Causality in S-Parameters." *DesignCon*. 2005.
- Electrical, IEEE Standard. "Characterization of Printed Circuit Board and Related Interconnects at Frequencies up to 50 GHz,." *IEEE Standard for Electrical IEEE Std 370-2020*, vol., 2021: pp.1-147.
- "IEEE Standard for Electrical." In *IEEE Standard for Electrical Characterization of Printed Circuit Board and Related Interconnects at Frequencies up to 50*, by Compatibility IEEE Electromagnetic, 141-174. IEEE, 2021.
- Gustavsen. "Fast Passivity Enforcement for S-Parameter Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues." *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 33, no. 1, 2010.
- Gustavsen. "Fast Passivity Enforcement for S-Parameter Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues." *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 33, no. 1, 2010: 257-265.
- Gustavsen, Bjørn. "Fast Passivity Enforcement for S-Parameter Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues." *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 33, no. 1, 2010.

- Gustavsen, Bjørn. "Fast Passivity Enforcement for S-Parameter Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues." (IEEE Transactions on Advanced Packaging* 33, no. 1) 2010: 257-265.
- Hakki M. Torun, Ahmet C. Durgun, Kemal Aygün, Madhavan Swaminathan. "Enforcing Causality and Passivity of Neural Network Models of Broadband S-Parameters." *IEEE 28th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019.
- "IEEE Standard for Electrical." 55-58. Printed in the United States of America: Standards Development Committee, 2021.
- IEEE Standard for Electrical. *IEEE Standard 370-2020*. IEEE Electromagnetic Compatibility Society: IEEE, 2021.
- IEEE Standard for Electrical. "IEEE Standard for Electrical." *IEEE Electromagnetic Compatibility Society*, 2021: 50-60.
- IEEE, P370-2020. "IEEE Standard for Electrical Performance of High-Speed Interconnects and Packages." *IEEE Standards Association*, n.d.: 2020.
- M. Tsiklauri., N. Dikhaminjia., J. Fan., J. Drewniak and M. Zvonkin,. "Front delay based causality for network parameters,." *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Shenzhen*. 2016. 870-872.
- MathWorks. "Signal Processing Toolbox User's Guide." By Inc The MathWorks. 2023.
- Melitz, Richard. n.d. http://www.ieee802.org/3/100GCU/public/ChannelData/mellitz_3bj_02_0713.zip.
- Nussenzveig, N.M. "Causality and dispersion relation." *Academic Press*. 1972. 3-24, 73.
- Oppenheim A.V., Willsky A.S. *Signals and Systems, 2nd ed., Pearson*. 2nd ed., Pearson, 1997.
- OPPENHEIM, ALAN, and ALAN. WILLISKYALAN. *SIGNALS & SYSTEMS*. New Jersey: Prentice-Hall, 2023.
- Papoulis, A, and Mc Graw. *The Fourier Integral and Its Applications*. Hill Book Company, INC, 1962.
- Proakis, J. Salehi, M. *Digital Communications*. 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T. "Fields and Waves in Communication Electronics." *3rd ed., Wiley*, 1994.
- Shlepnev, Y. "Quality metrics for S-parameter models." *DesignCon IBIS Summit*, 2010.
- . *Quality Metrics for S-parameter Models*. IBIS Summit at DesignCon. 2010. <http://www.eda.org/ibis/summits/feb10/shlepnev.pdf>.
- . *Reflections on S-parameter Quality*. Reflections on S-parameter Quality. 2011. <http://www.eda.org/ibis/summits/nov11b/shlepnev.pdf>.
- . *Reflections on S-parameter Quality*. Reflections on S-parameter Quality. 2011. <http://www.eda.org/ibis/summits/nov11b/shlepnev.pdf>.

- Society, IEEE Electromagnetic Compatibility. "IEEE Standard for Electrical." In *IEEE Standard for Electrical Characterization of Printed Circuit Board and Related Interconnects at Frequencies up to 50*, by IEEE Electromagnetic Compatibility Society, 141-174. IEEE, 2021.
- Torun, Durgun, M, A Aygün, and M Swaminathan. "Enforcing Causality and Passivity of Neural Network Models of Broadband S-Parameters." *IEEE 28th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*, 2020: 1-3.
- Torun, H.M. Durgun.,A. C. K. Aygün and M. Swaminathan. "Enforcing Causality and Passivity of Neural Network Models of Broadband S-Parameters,." *IEEE 28th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*,, 2019: 1-3.
- Torun, M, M Durgun, and D Aygün. "Enforcing Causality and Passivity of Neural Network Models of Broadband S-Parameters." *IEEE 28th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*, 2019: 1-3.
- Torun, M, M Hakki, C Ahmet, C Durgun, Kema Aygün, and Madhavan Swaminathan. "Enforcing Causality and Passivity of Neural Network Models of Broadband S-Parameters." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 10, no. 7, 2020: 1-3.
- Torun, M, M Hakki, C Ahmet, M Durgun, Aygün Kemal, and Swaminathan Madhavan. "Enforcing Causality and Passivity of Neural Network Models of Broadband S-Parameters." *IEEE 28th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019.
- Triverio, P, and S Grivet-Talocia. "A robust causality verification tool for tabulated frequency data." *Signal Propagation on Interconnects IEEE Workshop on* , vol., no., 2006: 65-68.
- Tsiklauri, M, M and Zvonkin, N Dikhaminjia, and J Fan. "Discrete Hilbert Transform based delay causality enforcement for network parameters." *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2016: 921-926.
- Tsiklauri, M, N Dikhaminjia, and et al. "Causality and Front Delay Verification Using Discrete Hilbert Transform in S-Parameters." *DesignCon Conference Proceedings*. 2020. 56.
- Tsiklauri, M, N Dikhaminjia, and J Drewniak. "S-Parameters Quality Estimation in Physical Units." *IEEE*, 2019: 532 -537.
- Tsiklauri, M, N Dikhaminjia, and J Fan. "Front delay based causality for network parameters,." *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Shenzhen*. 2016. 870-872.
- Tsiklauri, M, N Dikhaminjia, J Fan, J Drewniak, and M and Zvonkin. "Front delay based causality for network parameters." *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Shenzhen*. 2016. 870-872.
- Tsiklauri, Mikheil, Mikhai Zvonkin, and Fan Jun. "Causality and Delay and Physics in Real Systems." *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Raleigh, NC*, 2014: 961-966.

- Tsiklauri, Mikheil. Dikham, Nana. "Front Delay Based Causality for Network Parameters." *7th Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016. 870-873.
- van Dalen, K. N., E Slob, and Ch. Schoemaker. "Generalized minimum-phase relations for memory functions associated with wave phenomena." *Geophysical Journal International, Volume 195, Issue 3*, 2013: p.1620-1629.
- Vediakovi, Darejan, Vasik Tabatadze, and Emre İçsan. "Using Singular Value Decomposition and Time-Domain Quality Metrics." 2025.
- X. Li et al. "AI-Based Design for Power Converter Circuits." *arXiv preprint*, 2023.
- Zachariah, Peterson. September 1, 2022. <https://resources.altium.com/p/what-eye-diagram>.
- ვედიაკოვი, დ. "სიგნალის გადაცემა 56 ომიანი ხაზით: კონვოლუცია, გადაცემითი ფუნქცია და MATLAB ანალიზი." *შრომები, მართვის ავტომატიზირებული სისტემები*, 2025: 105-109.
- ვედიაკოვი, დ, ჯ, ტაბეშაძე, and მ წიკლაური. "ჰილბერტის დისკრეტული გარადქმნის საფუძველზე კაუზალობის განხორციელების ალგორითმი." *შრომები, მართვის ავტომატიზირებული სისტემები (სტუ)*, 2019: 81-87.
- ტაბეშაძე, ჯ, დ ვედიაკოვი, and ვ ტაბატაძე. "ციფრულსიგნალისდამუშავების წინასწარი მიწოდებისა და გადაწყვეტილებაზე რეაგირების ეკვალიზატორები." *მართვის ავტომატიზირებული სისტემები*, 2019: 178-185.
- ყუბანიშვილი, ე. *ბიოსიგნალების ციფრული დამუშავებ*. თბილისი: სტუ, 2013.

ნახაზების, ცხრილების და დიაგრამების ნუსხა

ნახ. 1.2 პორტიანი ქსელიში შემავალი და გამომავალი იმპულსები. წყარო: ავტორი .35	
ნახ. 2. საწყისი სიგნალის აღდგენა დამოკიდებულია N სიდიდეზე ანუ დისკრეტიზაციის ΔT ინტერვალზე (ყუბანეიშვილი 2013, 11)	41
ნახ. 3 . S-პარამეტრების პასიურობის განმარტება	49
ნახ. 4. უარყოფითი ჯგუფური დაყოვნების მაგალითი.....	51
ნახ. 5 DC ექსტრაპოლაცია გადაცემის ფუნქციის რეალური ნაწილისთვის. წყარო: (IEEE STANDARD FOR ELECTRICAL 2021, 142)	94
ნახ. 6. . DC ექსტრაპოლაცია გადაცემის ფუნქციის წარმოსახვითი ნაწილისათვის. წყარო: (IEEE STANDARD FOR ELECTRICAL 2021, 142).....	94
ნახ. 7. გადაცემის ფუნქციის რეალური ნაწილისთვის DC ექსტრაპოლაცია.....	95
ნახ. 8. ნედლი მონაცემების პასიურობა შემოწმება წყარო: ავტორი.....	96
ნახ. 9. იმპულსური რეაგირების დროითი წანაცვლება ოპტიმალური დამთხვევისთვის. წყარო: (IEEE STANDARD FOR ELECTRICAL 2021, 99).....	97
ნახ. 10. სიგნალის შეფასება დროის დომენში მილივოლტური ერთეულებით.....	98
ნახ. 11. საკვლევი პარამეტრებით შექმნილი ქსელი წყარო: ავტორი	101
ნახ. 12. მიღებულ ქსელში გავლილი სიგნალი კონკრეტული მონაცემებით.....	101
ნახ. 13. მიღებული სიგნალის თვალის დიაგრამა. წყარო: ავტორი	102
ნახ. 14. ეკვალიზატორის დამატების შემდეგ მიღებული სიგნალი წყარო: ავტორი..	103
ნახ. 15. აღდგენილი სიგნალის თვალის დიაგრამა. წყარო: ავტორი	104
ნახ. 16. ჰილბერტის გარადაქმნის რეალური ნაწილი 50 ომიანი სტრიმისთვის	109
ნახ. 17. რეალური ნაწილით აღდგენილი წარმოსახვითი ნაწილი დამრული დროითი დაყოვნების ტოლი ბიჯით 50 ომიანი სტრიმისთვის წყარო: ავტორი	109
ნახ. 18 . ნახ 17-ზე და ნახ.18 -ზე წარმოდგენილი დიაგრამების ერთმანეთზე დადების შედეგი 50 ომიანი სტრიმისთვის წყარო: ავტორი	110
ნახ. 19. ჰილბერტის გარადაქმნის რეალური ნაწილი წყარო: ავტორი	110
ნახ. 20. რეალური ნაწილით აღდგენილი წარმოსახვითი ნაწილი დამრული დროითი დაყოვნების ტოლი ბიჯით წყარო: ავტორი.....	111
ნახ. 21. ნახ.20-ზე და ნახ.21 -ზე წარმოდგენილი დიაგრამების ერთმანეთზე დადების შედეგი წყარო ავტორი.....	111
ნახ. 22. SUM=0.4304 არის FCB პლატა, კარგია წყარო: ავტორი	118
ნახ. 23. SUM=6.3353. ეს არის 50 ომიანი წინააღობის გამტარი, მისაღებია წყარო: ავტორი	119

ცხრილი 1. ელექტრონული წრედის პარამეტრების შემოწმების ალგორითმების

შედარება 79

ცხრილი 2. პარამეტრების შემოწმების ალგორითმის შერჩევაზე გავლენის მქონე ფაქტორები.....	81
ცხრილი 3. 56 ომიან ქსელის კაბელზე კვლევის შედეგები ხმაურის სხვადასხვა შემთხვევისთვის	125
დიაგრამა 1. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი = 100	124
დიაგრამა 2. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი = 90	124
დიაგრამა 3. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი = 50	125
დიაგრამა 4. სიგნალის ქცევა როცა შეშფოთების კოეფიციენტი = 10	125
დიაგრამა 5. შემავალი სიგნალი ხმაურის გარეშე	127
დიაგრამა 7. გამომავალი სიგნალი ხმაურის გარეშე	127
დიაგრამა 8. გამომავალი სიგნალი ხმაურით SNR=20 DB	128
დიაგრამა 9. გამომავალი სიგნალი ხმაურით SNR=50 DB	128

ძირითადი ტერმინების განმარტება

- **S21** – გადაცემის ფუნქცია.
- **IFFT** – ინვერსული ფურიეს გარდაქმნა.
- **Transfer** – დროის დომენში გადაყვანილი სისტემის რეაქცია.
- **FFE** – Feedforward Equalizer, დისტორზიის აღმოსაფხვრელად.
- **AWGN** – თეთრი გაუსიანური ხმაური.
- **ERR** – ფარდობითი შეფასება გამოსავალთა სხვაობის მიხედვით.
- **Vector Fitting (VF)** არის მათემატიკური ალგორითმი, რომელიც გამოიყენება

ელექტრონულ ინჟინერიაში, განსაკუთრებით მაღალი სიხშირის წრედების მოდელირებაში. ის გარდაქმნის სიხშირული დომენის გაზომილ ან სიმულირებულ მონაცემებს (როგორცაა S-პარამეტრები) რაციონალურ ფუნქციად, რომლის ანალიზიც უფრო მარტივია. ეს საშუალებას იძლევა მივიღოთ სისტემის დროითი რეაქცია და შევინარჩუნოთ ისეთი მნიშვნელოვანი თვისებები, როგორცაა პასიურობა (სტაბილურობა). Vector Fitting აუმჯობესებს DC (მუდმივი დენის) ექსტრაპოლაციის სიზუსტეს

- **დისკრეტულ-კონტინუმი** - დისკრეტულ-უწყვეტი ჰიბრიდული სისტემები (discrete-continuum hybrid systems)- ნიშნავს სისტემას ან მოდელს, რომელიც აერთიანებს **დისკრეტულ** (განუყოფელ, ციფრულ) და **კონტინუუმურ** (უწყვეტ, უწყვეტად ცვალებად) კომპონენტებს და გამოიყენება: 1. ელექტრონულ სისტემებში, სადაც განიხილება ციფრული კონტროლი (დისკრეტული) და ანალოგური ფიზიკა (კონტინუმი). 2. მაღალი სიხშირის მოდელირებაში, სადაც მონაცემები არის ნიმუშებად აღებული, მაგრამ აღწერს უწყვეტ სიგნალებს.

- **Residue Matrix Enforcement** - წარმოადგენს მათემატიკურ პროცედურას, რომლის მიზანია სისტემის ან ქსელის რეზიდუალური მატრიცის მნიშვნელობების კორექტირება ისე, რომ დაიცვან ფიზიკური და მათემატიკური თვისებები, როგორცაა პასიურობა, სტაბილურობა და კაუზალობა. ეს პროცედურა უზრუნველყოფს, რომ სიმულაციის ან მოდელირების პროცესში მიღებული მონაცემები იქნას ფიზიკურად სანდო და სისტემური ანალიზისთვის შესაბამისი.“

აბრევიატურის ნუსხა

- PSpice** – პერსონალური სიმულაციური პროგრამა, ორიენტირებული ინტეგრირებული სქემების მოდელირებაზე
- LTSpice** – წრფივი ტექნოლოგიის SPICE სიმულატორი
- AC** – ცვლადი დენი (მცირე სიგნალის AC ანალიზი)
- DOE** – ექსპერიმენტების დიზაინი
- AI** – ხელოვნური ინტელექტი
- ML** – მანქანური სწავლება
- FPGAs** – ველზე პროგრამირებადი გეითების მატრიცები
- DSP** – ციფრული სიგნალის დამუშავება
- FFT** – ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა
- DFT** – დისკრეტული ფურიეს გარდაქმნა
- TDR** – დროითი დომენის რეფლექტომეტრია
- FDR** – სიხშირის დომენის რეფლექტომეტრია
- SVD** – სინგულარული მნიშვნელობების დაშლა
- DHT** – ჰილბერტის დისკრეტული გარდაქმნა
- AWGN** – ადიტიური თეთრი გაუსის ხმაური
- DC** – მუდმივი დენი
- CEL** – კაუზალობის უზრუნველყოფის შრე
- PEL** – პასიურობის უზრუნველყოფის შრე
- CAD** – ავტომატური დაპროექტების სისტემა
- Residue Matrix Enforcement** – ნარჩენი მატრიცის კორექციის მეთოდი (პასიურობის ან კაუზალობის უზრუნველსაყოფად)
- SROPEE** – სიგნალის შემცირება, ოპტიმიზაცია, პასიურობის უზრუნველყოფა, შეფასება და ექსტრაპოლაცია
- Spectral MOR** – სპექტრული მოდელის რიგის შემცირება
- PINNs** – ფიზიკაზე დაფუძნებული ნეირონული ქსელები
- BER** – ბიტური შეცდომის მაჩვენებელი
- LTI system** – წრფივი, დროითი ინვარიანტული სისტემა

SNR – სიგნალისა და ხმაურის შეფარდება

ERR – ცდომილების/შეცდომის მაჩვენებელი

DUT - სატესტო მოწყობილობა

ABBREVIATIONS

PSpice - Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

LTSpice - Linear Technology SPICE simulator

AC - Alternating Current (Small-Signal AC Analysis)

DOE - Design of Experiments

AI - Artificial Intelligence

ML- Machine Learning

FPGAs - Field-Programmable Gate Arrays

DSP - Digital Signal Processing

FFT – Fast Fourier Transform

DFT – Discrete Fourier Transform

TDR – Time Domain Reflectometry

FDR - Frequency Domain Reflectometry

SVD - Singular Value Decomposition

DHT – Discrete Hilbert Transform

AWGN - Additive White Gaussian Noise

DC – Direct Current

CEL- Causality Enforcement Layer

PEL – Passivity Enforcement Layer

CAD - Computer-Aided Design

SROPEE – Signal Reduction, Optimization, Passivity Enforcement, Estimation, Extrapolation

Spectral MOR - Spectral Model Order Reduction

PINNs - Physics-Informed Neural Networks

BER - Bit Error Rate

LTI system - Linear Time-Invariant system.

CAD - Computer-Aided Design

SNR - Signal-to-Noise Ratio

ERR - Error Rate

DUT - Device Under Test