**ივანე ჯავახიშვილის სახელობის**

**თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი**



***გიორგი კაპანაძე***

**მძლავრი ეკრანირებული ელექტრული სისტემებიდან ელექტრომაგნიტური ველის გამოსხივების მოდელირება**

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი  
ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერია

სამაგისტრო ნაშრომი

სამაგისტრო ნაშრომის

ხელმძღვანელი, ელექტრული და

ელექტრონული ინჟინერიის დოქტორი : **ანა გეონჯიანი**

თბილისი 2018

სარჩევი

[ანოტაცია 3](#_Toc517192050)

[1 შესავალი 3](#_Toc517192051)

[1.1 მაღალი ძაბვის ეკრანირებული სისტემების აქტუალობა საავტომობილო წარმოებაში 3](#_Toc517192052)

[1.2 ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემები და ეკრანირების მნიშვნელობა 4](#_Toc517192053)

[1.3 ავტომობილში ელექტრონული და ელექტრული სისტემების მონტაჟის და დამიწების ზეგავლენა ეკრანირების ეფექტურობაზე 6](#_Toc517192054)

[2 სამაგისტრო ნაშრომის მიზნები და სტრუქტურა 10](#_Toc517192055)

[3 თეორიის მიმოხილვა 11](#_Toc517192056)

[3.1 ეკრანირებული კაბელების გამოსხივებით შექმნილი ელექტრომაგნიტური ველის მოდელირების მეთოდოლოგია 11](#_Toc517192057)

[3.1.1 მრავალგამტარიან გადამცემ ხაზთა მეთოდი - Multiconductor transmission line approach (MTL). 13](#_Toc517192058)

[3.1.2 მომენტების მეთოდი - Method of Moments (MoM) 15](#_Toc517192059)

[3.2 ეკრანირებული კაბელის გადაცემის წინაღობის დადგენის მეთოდები 17](#_Toc517192060)

[3.2.1 გაზომვის მეთოდები 19](#_Toc517192061)

[3.2.2 ანალიტიკური მეთოდები 22](#_Toc517192062)

[4 გაზომვებისა და მოდელირების პროცესების აღწერა და მიღებული შედეგები 27](#_Toc517192063)

[4.1 Coroplast-FLRG2GCB2G-35 mm2 მაღალი ძაბვის კაბელის გადაცემის წინაღობის გაზომვა LIM (Line Injection Method) ით 27](#_Toc517192064)

[4.2 ლაბორატორიული გამზომი სტენდი და სპექტრის გენერატორი 32](#_Toc517192065)

[4.3 MTL მოდელი 33](#_Toc517192066)

[4.4 მძლავრი ეკრანირებული ელექტრული სისტემის სამგანზომილებიანი სრულტალღოვანი მოდელირება 37](#_Toc517192067)

[4.5 კვლევის შედეგები და მათი განხილვა 43](#_Toc517192068)

[5 დასკვნა 48](#_Toc517192069)

[ლიტერატურა 49](#_Toc517192070)

[6 დანართი 51](#_Toc517192071)

[6.1 არაეკრანირებული კაბელის გამოსხივებით შექმნილი ელექტრომაგნიტური ველი 51](#_Toc517192072)

[6.2 ეკრანირებული კაბელის გამოსხივებით შექმნილი ელექტრომაგნიტური ველი 61](#_Toc517192073)

# ანოტაცია

თანამედროვე საავტომობილო წარმოებაში ჰიბრიდული და ელექტრო ავტომობილების განვითარება დამოკიდებულია წარმოებაში გამოყენებული ელექტრონიკის საიმედოობასა და ოპტიმალურ ღირებულებაზე. მაღალი სიმძლავრის მოდულები როგორიცაა ინვერტერი, ძაბვის გარდამქმნელი და დამუხტვის მოწყობილობა, მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით მუშაობენ იმპულსურ რეჟიმებში. ასეთი მოდულების დიზაინის დროს ერთ-ერთი მთავარი მოთხოვნა არის ელექტრომაგნიტური თავსებადობა, რათა უზრუნველყოფილი იყოს ადამიანების უსაფრთხოება და სხვა ელექტრონული სისტემების შეუფერხებელი მუშაობა. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შესამცირებლად საჭირო არის სწორად გამოვიყენოთ ეკრანირების და დამიწების პრინციპები. ოპტიმალურ ეკრანირებას მოითხოვს როგორც აქტიური მოდულები ასევე მათი შემაერთებელი კაბელები. სადიპლომო ნაშრომის ერთ-ერთი მიზანია საავტომობილო მაღალი ძაბვის კაბელების ეკრანირების მახასიათებლის, გადაცემის წინაღობის გაზომვა და შესაბამისი ანალიტიკური მოდელის შერჩევა. ნაშრომში განხილული შემდეგი მნიშვნელოვანი ამაცანაა - ეკრანირებული სისტემების დამიწებასთან დაკავშირებული რეზონანსული ეფექტების გამოკვლევა. გამოსხივებული ველები და მათი ურთიერთქმედება ახლომდებარე კაბელებთან გაზომილია სპეციალურად შემუშავებული ლაბორატორიული დანადგარის მეშვეობით. კომპიუტერული მოდელირება საშუალებას გვაძლევს გავაანალიზოთ დამიწების იმპედანსის ბუნება და მისი გავლენა. სადიპლომო ნაშრომში მოყვანილია მოდელირების მეთოდების და თავად მოდელების დეტალური აღწერა. მოდელირების შედეგები შედარებულია გაზომვებთან - დამიწების სხვადასხვა კონფიგურაციისთვის.

# შესავალი

## მაღალი ძაბვის ეკრანირებული სისტემების აქტუალობა საავტომობილო წარმოებაში

ტერმინი ელექტრო-მობილურობა გამოიყენება ისეთი მოძრავი საშუალებების აღსაწერად, როგორიცაა ელექტრული ავტომობილები (EV), ჰიბრიდული ელექტრული ავტომობილები (HEV), რომელთა აკუმულატორის დამუხტვა შესაძლებელია ელექტრული ქსელიდან (PHEV).

ასეთი მოძრავი საშუალებები საგრძნობლად ამცირებენ ნავთობ-პროდუქტების გამოყენებას და CO-გამონაბოლქვების დონეს. ამის გარდა, ელექტრო-მობილურობის კონცეფცია გვაახლოვებს ელექტრონიკის გამოყენებით სატრანსპორტო საშუალებების სრული მართვის იდეასთან. ამით არის გამოწვეული საავტომობილო ინდუსტრიის მაღალი ინტერესი ამ თემისადმი. ზოგიერთი მწარმოებელი გეგმავს მხოლოდ-და-მხოლოდ ელექტრო-ავტომობილების წარმოებას. უკვე დღეს, მოწინავე ავტო-მწარმოებლები გამოდიან მსოფლიო ბაზარზე ელეტრო-მობილების ახალი მოდელებით, როგორიცაა მაგალითად: VW e-Golf, Renault ZOE, [Nissan Leaf](https://mashable.com/2017/09/06/nissan-leaf-2018/), [Tesla Model 3](https://mashable.com/category/model-3/). უახლოეს მომავალში ეს ტენდენცია კიდევ უფრო გაძლიერდება.

მაღალი სიმძლავრის ელექტრონიკა ქმნის ელექტრო-მობილების განვითარების ძირითად საფუძველს, მის განვითარებაზეა დაყრდნობილი ელექტრო-მობილების მომავალი (იხ. ნახ. 1, ნახ. 2). ელექტრომობილი საჭიროებს მაღალ ძაბვას (100V-ზე მეტს), ამის გარდა, ტრადიციული 14V-ნი ელექტრონული სისტემები უნდა ფუნქციონირებდეს ისევე გამართულად როგორც წინა თაობის ავტომობილებში. მაღალი ძაბვის ქსელი ავტომობილში სრულად უნდა იყოს იზოლირებული დაბალი ძაბვის (ტრადიციული) ქსელისაგან და ასევე ავტომობილის ძარისაგან. მაღალი ძაბვის ქსელში უნდა არსებობდეს ენერგიის შემნახველი მოწყობილობა (მაღალი ძაბვის აკუმულატორი), ელექტრო-ძრავი და ასევე ძრავის მმართველი სისტემა. ამ სისტემის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კვანძია ინვერტერი, რომელიც გარდაქმნის აკუმულატორიდან მოწოდებულ მუდმივ დენს (DC) ელექტრო-ძრავისათვის აუცილებელ ცვალებად დენად (AC). სისტემაში ასევე შედის DC/DC გარდამქმნელები, რომლებიც გამოიყენება აკუმულატორის მაღალი ძაბვის (ტიპიური მნიშნელობებია 250V, 380V, 300V) გარდასაქმნელად ტრადიციულ 14V-იან ძაბვად და პირიქით, გარე ქსელიდან მოწოდებული ენერგიის მეშვეობით მაღალი ძაბვის აკუმულატორის დასამუხტად.

|  |
| --- |
|  |
| 1. მძლავრი ელექტრული სისტემის კომპონენტები ელექტრო-ავტომობილში |

აღნიშნული ფუნქციონალობის შესასრულებლად მაღალი სიმძლავრის ელექტრონიკაში გამოიყენება ნახევარგამტარული თეორიულად 100% ეფექტურობის მქონე სწრაფი გადამრთველები. ასეთი გადამრთველები მუშაობენ ჩართულ ან გამორთულ რეჟიმებში და იმართებიან იმპულსის სიგნალის ცვლილების მოდულაციით (pulse-width modulation, PWM). გადართვის სიჩქარე შეიძლება იყოს ძალზე მაღალი რაც, გამოყენებული მაგნიტური მასალების თვისებების გამო იძლევა მოწყობილობების ზომების მკვეთრი შემცირების საშუალებას.

## ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემები და ეკრანირების მნიშვნელობა

ელექტრომაგნიტური თავსებადობის სტანდარტების დაცვა ძალზე მნიშვნელოვანია საავტომობილო ინდუსტრიაში. ის უზრუნველყოფს სხვადასხვაგვარი მოწყობილობების თანადროულ მუშაობას და ასევე იძლევა იმის გარანტიას რომ ადამიანები არ იქნებიან დასხივებულნი ორგანიზმისათვის საშიში ენერგიების მქონე ველებით. ეს ველები ელექტროავტომობილებში საკმაოდ დაბალია, გაცილებით მცირეა, ვიდრე ელექტროაგრეგატაბის სტანდარტებით მოითხოვება, მაგრამ სუსტი ველების ხანგრძლივი ზემოქმედება შესაძლებელია მავნე აღმჩნდეს. სტანდარტები ასევე არეგულირებენ ავტომობილის მიერ გამოსხივებულ ენერგიას ირგვლივმყოფ გარემოში. ამ სტანდარტების მაგალითებია SAE J1113/41, SAE J1113/42 [1],[2],[3] და ასევე CISPR25 [4].

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული მაღალი ძაბვის ელექტრონიკა იყენებს MOSFET (Metal-oxide semiconductor field effect transistor), ან IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ტექნოლოგიებზე აგებულ სწრაფ ნახევარგამტარულ გადამრთველებს. IGBT ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული გადამრთველები ხასიათდებიან მაღალი ეფექტურობით, მცირე ზომებით და შედარებით დაბალი ფასებით. მაღალი დენებისა და ძაბვების გადართვისას კი ისინი ქმნიან ფართო-ზოლოვან ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას [5-9].

ელექტრომაგნიტური გამოსხივების არასასურველი ეფექტი გვევლინება ელექტრომაგნიტური ხმაურის სახით. ეს ხმაური ურთიერთქმედებს სხვადასხვა უკაბელო გადამცემ სისტემებთან (რადიო, ტელევიზია, მობილური ტელეფონები), ან შეიძლება გამოიწვიოს ავტომობილში ჩაშენებული სამუხრუჭე სისტემის, ABS-ის, არასწორი ფუნქციონირება და ა.შ.

მთავარი ამოცანები ელექტრომაგნიტური შეფერხებების შესწავლის დროს:

* ელექტრომაგნიტური გამოსხივების გაზომვა, მოდელირება და კვლევითი კომპიუტერული სიმულაციების ჩატარება
* მაღალი სიმძლავრის გარდამქმენელებში საჭირო ცვლილებების შემუშავება ელექტრომაგნიტური ხმაურების ჩასახშობად

პრობლემების გადაჭრის ერთ-ერთი მეთოდია ეკრანირება. ელექტრომაგნიტური ველის ჩასახშობად მძლავრი მოდულების ეკრანირება ხდება სხვადასხვა ფორმის გამტარი ზედაპირებით. ეკრანირების ზედაპირების ფორმების შერჩევა კი კონსტრუირების ადრეულ ეტაპზე უნდა მოხდეს. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დიდი ზომის Lithium-ion მაღალი ძაბვის ელემენტებისთვის ეკრანირების ყუთის დამზადება (იხ. ნახ. 2, HV ელემენტი).

|  |
| --- |
|  |
| 1. ელექტრული მამოძრავებელი სისტემა VW hybrid Golf-ში |

მძლავრ ელექტრონულ სისტემებში მაგნიტური წყაროებიდან გამოსხივებული ახლო მდებარე ველები ეკრანირების შედეგად უნდა შემცირდეს რამდენიმე KHz-დან 50 MHz-მდე სიხშირულ დიაპაზონში. ეკრანებში გამოყენებული ნივთიერებების სწორად შერჩევა მნიშვნელოვანია. ნივთიერებების მშთანთქმელი თვისებები დამოკიდებულია მის გამტარებლობაზე, მაგნიტურ შეღწევადობაზე და სისქეზე. ეკრანის კორპუსები შესაძლებელია დამზადებულ იქნას თუთიისგან დაფარული ფოლადით, უჟანგავი ფოლადით, სხვადასხვა მინარევის ალუმინის ფირფიტებით ან სხვა შესაბამისი ელექტრომაგნიტური თვისებების მქონე მეტალური ნივთიერებებით.

თანამედროვე ავტოწარმოებაში ავტომობილის საერთო წონის შესამცირებლად კორპუსებში სულ უფრო ნაკლებ მეტალურ ფირფიტებს იყენებენ. ეს ტენდენცია კი განსაკუთრებით ჰიბრიდულ და ელექტრო ავტომობილებში იგრძნობა. მოცემული გარემოება ართულებს ელექტრომაგნიტური ხმაურებისგან ეკრანირების ამოცანას. ავტო-კონსტრუქტორებს სულ უფრო ნაკლები საშუალება აქვთ გამოიყენონ მეტალური ფირფიტები ეკრანირების დროს, ამავდროულად ეკრანები უნდა იყოს ხარისხიანი და ადექვატური ღირებულების.

ელექტრო თუ ჰიბრიდულ ავტომობილებში მაღალი სიმძლავრის მოდულები ერთმანეთთან დაკავშირებულნი არიან კაბელებით. მსგავსი კალებელის სიგრძეები 10 მეტრამდე შეიძლება მერყეობდეს. კაბელის სიგრძე დამოკიდებულია ავტომობილის ზომებსა და სისტემების მონტაჟის სტილზე (იხ. ნახ. 2). გამოსხივებული ველებისთვის კაბელები მუშაობენ ანტენების მსგავსად. ასევე სასიგნალო კაბელებში შესაძლოა შეაღწიოს მაღალი ძაბვის კაბელებიდან გამოსხივებულმა ელექტრომაგნიტურმა შეფერხებებმა. სწორედ ამიტომ მნიშვნელოვანია, როგორც მაღალი სიმძლავრის მოდულების ასევე მათი დამაკავშირებელი კაბელების ეკრანირება.

ელექტრომობილების მაღალი ძაბვის კაბელებისთვის გამოიყენება რთული სტრუქტურის მქონე მრავალფენოვანი ეკრანები. ეს ეკრანები შედგება დიელექტრიკის თხელ ფენაზე დაფენილი მეტალის ლენტისგან ან მეტალის დაწნული ბადისგან. ხშირ შემთხვევაში გამოიყენება ალუმინის თხელი ლენტი და ის კაბელის 100% ს ფარავს. დაწნული ბადის შემთხვევაში კი გამოიყენებენ სპილენძს. დაწნული სპილენძის ბადე კაბელის 70%-დან 95%-მდე დაფარვას უზრუნველყოფს. სპილენძს ბევრად კარგი გამტარებლობა აქვს ვიდრე ალუმინს, ამიტომ სხვადასხვა შემთხვევისთვის, სხვადასხვა სახის ეკრანს იყენებენ. განსაკუთრებული შემთხვევებისთვის კი იყენებენ რამდენიმე ფენიან ეკრანებს. მსგავსი ეკრანები შედგება სპილენძის ბადისგან და მასზე დახვეული ალუმინის ლენტისგან.

## ავტომობილში ელექტრონული და ელექტრული სისტემების მონტაჟის და დამიწების ზეგავლენა ეკრანირების ეფექტურობაზე

სისტემების დამიწებას გააჩნია რამდენიმე ფუნქცია. დამიწებით უზრუნველყოფილი უნდა იყოს ელექტრული მოდულების და აღჭურვილობის უსაფრთხოება. დამიწების ეფექტებს ელექტრომაგნიტური გამოსხივების შემცირებისთვის, გააჩნიათ შემდეგი მიზნები:

* ელექტრული მოწყობილობების კორპუსებს შორის არსებული პოტენციალთა სხვაობების შემცირების გზით, ცირკულირებადი დენების გავლენის შესუსტება
* ექვიპოტენციური ზედაპირის უზრუნველყოფა
* CM (Common Mode) ურთიერთქმედების შემცირება
* ოპტიმალურად შერჩეული დამიწება

ავტომობილებში ელექტრონული მოდულები დამიწებულნი არიან ავტომობილისი ძარაზე. არსებობს სამი მთვარი დამიწების მეთოდი:

* (Single-Point Grounding) ერთ წერტილში დამიწების მეთოდი

გამოირჩევა დამიწების წერტილში ყველაზე დიდი ჯამური დენით და საუკეთესო შედეგს იძლევა 1 MHz-მდე სიხშირულ დიაპაზონში.

* (Multi-Point Grounding) მრავალ წერტილში დამიწების მეთოდი

გამოირჩევა დამიწების წერტილებისთვის მინიმალური ჯამური დენით და საუკეთესო შედეგს იძლევა 1 MHz-ზე მაღალ სიხშირულ დიაპაზონში. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების ჩახშობისთვის საუკეთესო დამიწების მეთოდია.

* (Hybrid) შერეული დამიწების მეთოდი

ერთი და იგივე სისტემისთვის გამოყენებულია ორივე სახის დამიწების სინთეზური მეთოდი.

იდეალურ შემთხვევაში დამიწების სისტემამ უნდა შეუქმნას ნულოვანი წინაღობის გზა ყველა სიგნალს მიწისკენ. ეს იქნებოდა შემთხვევა, როცა სხვადასხვა წრედების თუ სისტემების შექმნილი დენები დაბრუნდებოდნენ საკუთარ წყაროში ისე რომ არ შექმნიდნენ არასასურველ ურთიერთქმედებებს სხვა კაბელებთან ან მოწყობილობებთან. ბევრი პრობლემა იქმნება სწორედ იმის გამო, რომ კონსტრუირების პროცესში მიწა და დამიწების ხაზები განხილულნი არიან იდეალურ გამტარებად. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების პრობლემების გადასაჭრელად კი აუცილებელია განვიხილოთ მიწა და დამიწების მავთულები, როგორც არაიდეალური (რეალური) გამტარები. დამიწების ნებისმიერ ელემენტს გააჩნია რეზისტიულობა, ტევადობა და ინდუქტიობა. დამიწების გზის რეზისტიულობა განსაზღვრულია მისი შემადგენელი ნივთიერების თვისებებით, სიგრძით და კვეთის ფართით. ტევადობა რომელიც დაკავშირებულია დამმიწებელ გამტართან, განსაზღვრულია გამტარის გეომეტრიული ფორმით, გამტარის დაშორებით სხვა გამტარებთან და მათ შორის არსებული დიელექტრიკული ფენის თვისებებით. ინდუქტიობა კი განსაზღვრულია გამტარის გეომეტრიითა და ნივთიერების თვისებებით (იხ. ნახ. 3). აღსანიშნავია რომ დამიწების მავთულების და ასევე მიწის ფირფიტის იმპედანსი სიხშირის ზრდასთან ერთად იცვლება და ეს გასათვალისწინებელია ხდება მაღალი სიხშირეებისთვის.

|  |
| --- |
|  |
| 1. დამიწების კაბელები |

ზოგადად ავტომობილებში მექანიკური ვიბრაციების ჩასახშობად ელექტრული სისტემები დამონტაჟებულია დიელექტრიკულ ზედაპირებზე და არა პირდაპირ ავტომობილის კორპუსზე. დამიწების ხაზები კი გატარებულია მიწის გასწვრივ (იხ. ნახ. 4, ნახ. 5).

|  |
| --- |
|  |
| 1. იდეალიზებუ`ლი დამიწება |
|  |
| 1. დამიწების ხაზის ექვივალენტური წრედი |

წრედის რესიზისტიული ელემენტების ეფექტი თავს იჩენს ძალიან დაბალი სიხშირეებისთვის. რეაქტიული ელემენტების ეფექტები კი სიხშირის ზრადსთან ერთად უფრო ძლიერდება. გარკვეულ სიხშირეზე ინდუქტიური და ტევადური წინაღობის მაგნიტუდები (jωL და 1/jωC) ერთმანეთის ტოლები გახდებიან, რაც გამოიწვევს წრედში რეზონანსული ეფექტების გაჩენას. პირველი რეზონანსის გამოსათვლელი ფორმულაა:

 (1)

სადაც L არის მთლიანი კაბელის ინდუქტიობა, ხოლო C იქნება ქსელის საერთო ტევადობა მიწასთან. რეზონანსულ სიხშირეზე დამიწების ხაზის იმპედანსი იქნება ან ძალიან დიდი ან ძალიან მცირე. მიმდევრობითი ჩართვის რეზონანსის დროს იქნება მცირე იმპედანსი, ხოლო პარალელურის დროს დიდი.

პარალელური რეზონანსის დროს, კაბელის ერთ ბოლოზე იმპედანსი იქნება მოსალოდნელ R + jωL- ზე ბევრად დიდი. პარალელური რეზონანსი:

 (2)

სადაც Q არის ხარისხის ფაქტორი:

 (3)

და  არის კაბელის რეზისტიულობა რეზონანსის სიხშირეზე,

საბოლოოდ ვიღებთ:

 (4)

მთავარ პირველად რეზონანს მოყვება, როგორც პარალელური ისე მიმდევრობითი რეზონანსები. ეს რეზონანსები გამოწვეული იქნება ინდუქტიური და ტევადური ელემენტების კომბინაციებისა და პარაზიტული ელემენტების მიერ შექმნილი რეზონანსული წრედების ზეგავლენით.

მიმდევრობითი (Zs) იმპედანსი რეზონანსის დროს:

 (5)

აქედან,

 (6)

მიმდევრობითი რეზონანსის იმპედანსი განხილულია შემდეგნაირად (6) და ტოლია რეზონანსის სიხშირეზე კაბელის რეზისტიულობისა. დამიწების გზის მაღალსიხშირული ქცევის აღწერა შესაძლებელია მისი გამარტივებით, გადამცემი ხაზების თეორიის მეშვეობით (იხ. ნახ. 5).

თუ რეზისტიული ელემენტები რეაქტიულ ელემენტებთან შედარებით მცირეა (იხ. ნახ. 4) მაშინ დამიწების ხაზის ტალღური წინაღობა იქნება Zo=. სადაც L და C არიან სიგრძის ერთეულზე ნორმირებული სიდიდეები. დამიწების ხაზის შესავალი იმპედანსი შეგვიძლია ავღწეროთ შემდეგი ფორმულით:

 (7)

სადაც:

 - არის ფაზური კონსტანტა გადამცემი ხაზისთვის

 - არის დამიწების ხაზის სიგრძე

როდესაც  ნაკლებია π/2 რადიანზე და დამიწების ხაზის ელექტრული სიგრძე ასევე ნაკლებია ტალღის სიგრძის მეოთხედზე (λ/4), მაშინ ხაზის შესავალ იმპედანსს გააჩნია ინდუქტიური ხასიათი. ამდროს  იცვლება 0 დან π/2-მდე. როცა  იზრდება და ხდება π/2-ზე დიდი მაშინ დამიწების ხაზის იმპედანი იცვლება და ღებულობს როგორც ღია, ასევე ჩაკეტილი წრედის მნიშვნელობებს (იხ. ნახ. 6).

გადამცემი ხაზების ენაზე მოწყობილობის დამიწება ნიშნავს იმას, რომ  და დამიწების ხაზის იმპედანსი იქცევა უდანაკარგო LC რხევითი კონტურის სახით. რეზონანსის ქვედა სიხშირეებზე იმპედანსს გააჩნია ინდუქტიური ხასიათი, ხოლო რეზონანსის ზედა სიხშირეებზე გააჩნია ტევადური ხასიათი. რეზონანსი კი ხდება მაშინ როცა -ს მნიშვნელობა უტოლდება ტალღის სიგრძის მეოთხედის ნამრავლს მთელ რიცხვებზე (იხ. ნახ. 6).

|  |
| --- |
|  |
| 1. დამიწების იმპედანსის სიხშირეზე დამოკიდებული ტიპიური ქცევა |

დამიწების ხაზებში რეზონანსული ეფექტები პირდაპირ დაკავშირებულია ხაზების იმპედანსის ბუნებასთან.

# სამაგისტრო ნაშრომის მიზნები და სტრუქტურა

ჰიბრიდულ და ელექტრო ავტომობილებში მაღალი სიმძლავრის მოდულები მუშაობენ იმპულსურ რეჟიმებში და გააჩნიათ მძლავრი ფართოზოლოვანი EM გამოსხივება. ოპტიმალურ ეკრანირებას მოითხოვს, როგორც აქტიური მოდულები ასევე მათი შემაერთებელი კაბელები.

სამაგისტრო ნაშრომის შესრულება შემდეგ მიზნებს ისახავდა:

* რთული ეკრანების მქონე მაღალი ძაბვის კაბელების გადაცემის წინაღობის მიღების მეთოდოლოგიის გაუმჯობესება
* ადვილად გადაწყობადი გამზომი სტენდის შექმნა დამიწების და ეკრანირების ეფექტების შესასწავლად
* კომპიუტერული მოდელირების, როგორც დამხმარე ინსტრუმენტის გამოყენება დამიწების იმპედანსის ბუნების და მისი გავლენების გამოსაკვლევად.
* კომპიუტერული მოდელირების დროს გამოყენებული მეთოდებისა და მოდელირების გზის აღწერა.

პირველ თავში დასაბუთებულია ამოცანის აქტუალობა, მე-2 თავში კი სამაგისტრო ნაშრომის მიზნები. მე-3 თავში განხილულია გაზომვებისა და მოდელირების მეთოდები, ხოლო მე-4 თავში დეტალურად არის აღწერილი სამუშაოს შესრულების პროცესი და შედეგები.

# თეორიის მიმოხილვა

## ეკრანირებული კაბელების გამოსხივებით შექმნილი ელექტრომაგნიტური ველის მოდელირების მეთოდოლოგია

ტექნოლოგიურად განვითარებად სამყაროში კაბელების და მათ მიერ შექმნილი სისტემების პროექტირება ხდება უფრო და უფრო მნიშვნელოვანი. კომპლექსური ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემების გადაჭრისას გაზომვებთან ერთად, მოდელირების გამოყენება საგრძნობლად ამცირებს პროქტირებასთან დაკავშირებულ დროს. მსგავსი სიმულაციებისთვის შემუშავებულია რიცხვით მეთოდებზე დაფუძნებული სხვადასხვა ამომხსნელი ალგორითმები, ზოგადად კაბელებისთვის კი გამოიყენება მრავალგამტარიან გადამცემ ხაზთა თეორიის (multi-conductor transmission line) მოდელები. ნაშრომში განხილულ მიზნებს შორის ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა ელექტრომაგნიტური მოდელირების ჩატარება HybridMTL მეთოდების მეშვეობით. HybridMTLმეთოდები შემუშავებულია კომპანია EMCoS-ში [10].

HybridMTLმეთოდების გამოყენებით შესაძლებელია წრედული მოდელირება, cross-talk მოდელირება კაბელებისთვის, EM მოდელირება კაბელებსა და მათ გარემომცველ 3D პასიურ თუ აქტიურ სტრუქტურებს შორის.

გადამცემი ხაზების გასწვრივ ძაბვებისა და დენების მოდელირებისთვის LCTL ერთ-ერთი ცნობილი ტექნიკაა. HybridMTL-ში კომბინირებულად არის გამოყენებული LCTL ტექნიკა და მომენტების მეთოდზე დაფუძნებული სრულტალღოვანი TriD ამომხსნელი მეთოდი. ამ ორი მეთოდის კომბინირებულად მუშაობა უზრუნველყოფს წრედული გადამცემი ხაზების ელემენტების და გარე 3D მეტალურ-დიელექტრიკული ობიექტების ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების მოდელრიებას. მეთოდების მსგავსი ჰიბრიდიზაციით თითოეული მათგანის ძლიერი მხარეების კომბინირებულად გამოყენებაა შესაძლებელი. მომენტების მეთოდი 3D სტრუქტურების მოდელირებისთვის ეფექტურია, მჭირდროდ განლაგებული კაბელებისთვის კი არა. LCTL მოსახერხებელია კაბელების მოდელირებისთვის, მაგრამ არ შეუძლია 3D სტრუქტურებში ველების გამოთვლა. მოდელების მსგავსი ჰიბრიდიზაციით მაინც არ ხდება მრავალმხრივი ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებების გათვალისწინება კაბელებსა და 3D გარემომცველ სტრუქტურებს შორის.

HybridMTLამომხსნელი მეთოდის მუშაობის პროცესი შეგვიძლია დავყოთ რამდენიმე ეტაპად:

• კაბელების სეგმენტებად დაყოფა და 2D ჭრილში სიგრძის ერთეულზე ნორმირებული პარამეტრების დათვლა

• LCTL წრედების შექმნა კაბელის თვითოეული სეგმენტისთვის,

• კაბელის გასწვრივ დენების დათვლა, სეგმენტებში შექმნილი წრედების Spice ამომხსნელი მეთოდით ან Telegraph-ის განტოლებების პირდაპირი მეთოდით დათვლა,

• კაბელის გასწვრივ შექმნილი დენების გადაყვანა წრედული სახიდან 3D სამყაროში დენის წყაროების სახით ,

• სრულტალღოვანი 3D TriD მეთოდით ამოცანის დათვლა,

დიაგრამაზე შესაძლებელია HybridMTLამომხსნელი მეთოდის მუშაობის პროცესის ეტაპების ნახვა (იხ. ნახ. 7.)

|  |
| --- |
|  |
| 1. HybridMTLამომხსნელი მეთოდის მუშაობის პროცესი |

შემდეგ პარაგრაფში დეტალურად არის განხილული HybridMTL-ში გამოყენებული მთავარი გამომთვლელი მეთოდები.

### მრავალგამტარიან გადამცემ ხაზთა მეთოდი - Multiconductor transmission line approach (MTL).

3-განზომილებიანი კაბელების დასათვლელად გამოიყენება MTL მეთოდი, რომელიც იყენებს კონცენტრირებული ელემენტებისგან შემდეგარ მოდელს (LCTL მოდელს) [11]. ეს ტექნიკა შესაძლებელს ხდის აიგოს და დაითვალოს რეალური კაბელების და მათ მიერ შექმნილი სისტემების მოდელები. MTL შეიძლება გამოყენებულ იქნას კაბელების 2D ჭრილებში მუხტების არასიმეტრიული განაწილების დროსაც. სრულტალღოვანი ამომხსნელი მეთოდების გამოყენებისას კაბელების რაოდენობა და მათი ერთმანეთთან ახლოს განლაგება ზრდის კომპიუტერული რესურსების მოთხოვნებს. აქედან გამომდინარე LCTL მოდელი იძლევა სწრაფ და მისაღებ შედეგებს ინდუსტრიული EMC ამოცანებისთვის.

საკაბელო სისტემის MTL მოდელი განივი ელექტრომაგნიტური ტალღების (TEM ტალღების) გავრცელების პირობებში წარმოდგენილია შემდეგი სიდიდეების მეშვეობით [12]:

 (8)

 (9)

სადაც I(z,t) და V(z,t) წარმოადგენენ დენებს და ძაბვებს ორ გამტარს შორის. კოეფიციენტები r-რეზისტიულობა, c-ტევადობა და l-ინდუქტიობა წარმოადგენენ სიგრძის ერთეულზე ნორმირებულ პარამეტრებს ორი გამტარისათვის. თუ გამტარების გარშემო არსებულ დიელექტრიკულ ფენას გააჩნია არანულოვანი გამტარებლობა მაშინ შემოდის კიდევ ერთი სიგრძის ერთეულზე ნორმირებული პარამეტრი g.

ზოგადად მრავალგამტარიანი არაერთგვაროვანი გამტარი ხაზის მოდელირებისას ხდება მისი სეგმენტებად დაყოფა. თითოეული სეგმენტი კი წარმოადგენს ერთგვაროვან გამტარ ხაზსს წინასწარ განსაზღვრული პარამეტრებით, შემდეგ კი ერთეულოვან პარამეტრთა მატრიცების დათვლა ხდება დამხმარე გამომსხივებელი მეთოდების და მომენტების მეთოდის კომბინირებული მუშაობით [13].

|  |
| --- |
|  |
| 1. MTL-ის სეგმენტაცია |

სეგმეტაცია ხდება გარკვეულ ფიზიკურ პარამეტრებზე დამოკიბულებით, რომლებიც არიან ტალღის სიგრძე, გადამცემი ხაზის არაერთგვაროვნება , გადამცემი გახის 3D გარემომცველი სტრქუტურები და დამაბოლოებელი დატვირთვები. სეგმენტაციის შემდეგ წრედული მოდელი მზად არის და Spice-ის ტიპის ამომხსნელი მეთოდით შესაძლებელია მისი დათვლა.

თვითოეულ სეგმენტს გააჩნია საკუთარი ტალღური იმპედანსის მატრიცა. ნახ. 9-ზე განხილულია ორ კაბელიანი სეგმენტი ტალღის  სიგრძითა და T-ტიპის წრედული სქემით [12],[14].

|  |
| --- |
|  |
| 1. ორკაბელიანი სეგმენტის ექვივალენტური წრედი |

გამტარებისთვის რომლებსაც გააჩნიათ სასრული გამტარებლობა, DC რეზისტიულობა გამოითვლება შემდეგნაირად:

 (10)

გამტარების გარშემო არსებულ გარემოს თუ გააჩნია დანაკარგები, გამტარებლობა გამოითვლება შემდეგნაირად [12]:

 (11)

სადაც არის ტანგენციალური დანაკარგები ორ გამტარს შორის ან გამტარსა და მიწას შორის (რეალისტური გარემომცველი პირობების გამო). , სადაც დაკვირვების სიხშირეა. სპეციალური ტექნიკა გამოიყენება ტანგენციალური დანაკარგის გამოსათვლელად. ყველა გამტარის გარშემო უნდა მოიძებნოს ეფექტური გარემომცველი ზოლი და ამ ზოლში გასაშუალდეს მთელი დიელექტრიკული დანაკარგები.

მაღალი სიხშირეებისთვის კი ზედაპირული ეფექტიც (ე.წ. სკინ ეფექტი) უნდა იყოს გათვალისწინებული. ეს კი სქემაში გათვალისწინებულია იმპედანსის სახით, რომელიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით [15]:

 (12)

, ,  (13)

ზემოთ აღწერილი მოდელის საშუალებით შესაძლებელია ეკრანირებული კაბელების მოდელირება. გარე ელექტრულ და მაგნიტურ ველს შეუძლია შეაღწიოს ეკრანში და შექმნას შემაშფოთებელი დენები და ძაბვები შიდა გამტარზე. ეკრანირებული კაბელებისთვის შიდა გამტარსა და გარე ელექტრომაგნიტურ ველს შორის ურთიერთქმედება ხდება სამი ფიზიკური ფენომენის გამო: ელექტრული და მაგნიტური ველების დიფუზიით ეკრანის მეტალურ ფენაში, ველის შეღწევით დაწნული ეკრანის ხვრელებში და მესამე, უფრო რთული მოვლენა, რაც გამოწვეულია დაწნული ეკრანის ლენტების ურთიერთგადაფარვის გამო. ბოლო ორი ფენომენი ხდება დაწნული ეკრანების შემთხვევაში. ინდუცირებული დენების გამოძახილი შიდა გამტარზე შეიძლება აღიწეროს გადაცემის წინაღობის და გადაცემის გამტარებლობის ტერმინებით. ეკრანირებული კაბელის ექვივალენტური სქემა წარმოდგენილია ნახ. 10-ზე.

|  |
| --- |
|  |
| 1. კოაქსიალური კაბელის ექვივალენტური წრედი |

სადაც  არის დენი ეკრანზე, - დენი შიდა გამტარზე, - გადაცემის წინაღობა და  გადაცემის გამტარებლობა. გადაცემის წინაღობის გამოთვლა შესაძლებელია ცნობილი ფორმულებით [16] და [17]. გადაცემის წინაღობის გაზომვებისა და ანალიტიკური მოდელების დეტალური დახასიათება აღწერილია პარაგრაფ 3.2-ში.

### მომენტების მეთოდი - Method of Moments (MoM)

მომენტების მეთოდი იყენებს ტექნიკას, რომელიც საშუალებას იძლევა კომპლექსური ინტეგრალური განტოლებები ამოვხსნათ მათი წრფივი განტოლებათა სისტემაზე დაყვანით. რ. ჰარინგტონმა დიდი წვლილი შეიტანა ამ მეთოდის და ტერმინის პოპულარიზაცში. პირვველად მან წარმოადგინა ამ ტექნიკის სიძლიერე და მოქნილობა ელექტრომაგნეტიზმის ამოცანების ამოსახსნელად [18].

სასრული ელემენტების მეთოდის ვარიაციული მიდგომისგან განსხვავებით, მომენტების მეთოდი იყენებს წონით ცდომილებათა მეთოდს. მომენტების მეთოდი და წონითი ცდომილებათა მეთოდი სინონიმებია.

ყველა წონითი ცდომილების მეთოდი იყენებს საცდელი ამოხსნის ფუნქციათა ნაკრებს, რომელსაც გააჩნია ერთი ან რამდენიმე ცვლადი პარამეტრი. ცდომილება წარმოადგენს საცდელ და ზუსტ ამონახსნას შორის განსხვავების საზომს. ამოხსნის მიზანია შერჩეული იქნას ისეთი ცვლადი პარამეტერების მნიშვნელობები რომლებიც უზრუნველყოფენ მინიმალურ ცდომილებას.

განტოლობები რომლებიც იხსნება მომენტების მეთოდის მეშვეობით წარმოადგენენ ელექტრული ველის ინტეგრალურ განტოლებას (Electric Field Integral Eqcuation-EFIE) ან მაგნიტური ველის ინტეგრალურ განტოლებას (Magnetic Field Integral Eqcuation-MFIE). ორივე განტოლება შეიძლება გამოსახული იყოს მაქსველის განტოლებებიდან თუ დავუშვებთ რომ ველის გაბნევა ხდება იდეალურად გამტარ (ან იდეალურ დიელექტრიკულ) სზეულზე:

 (14)

 (15)

სადაც მარცხენა მხარე არის დაცემული ველი და არის ინდუცირებული დენები. ინტეგრალური განტოლების ფორმის შერჩევა ხდება დასმული ამოცანის მიხედვით.

მაგალითად ელექტრული ველის ინტეგრალური განტოლების ერთ-ერთი ფორმა შეიძლება საუკეთესოდ გამოგვადგას წვრილი მავთულების დასამოდელირებლად მაშინ, როცა მეორე ფორმა უკეთესია მეტალური ზედაპირებისათვის. როგორც წესი ეს განტოლებები მოცემულია სიხშირულ არეში, თუმცა მომემტების მეთოდის გამოყენება შესაძლებელია ასევე დროით არეში.

მომენტების მეთოდის პირველ ეტაპზე უნდა გავშალოთ ბაზისური ფუნქციების სასრულ ჯამად:

 (16)

სადაც არის იური ბაზისური ფუნქცია და არის უცნობი კოეფიციენტი.

შემდგომ უნდა განვსაზღვროთ წრფივად დამოუკიდებელი წონითი (ან სატესტო) ფუნქციათა () ნაკრები. შემდეგ ჩაიწერება თითოეული წონითი ფუნქციის სკალარული ნამრავლი განტოლების ორივე მხარესთან. მაგნიტური ველის ინტეგრალური განტოლების შემთხვევაში მივიღებთ შემდეგ განტოლებათა სისტემას:

 (17)

სადაც 

-ს გაშლით (16) ვღებულობთ M განტოლებათა სისტემას M უცნობით.

 (18)

რომელიც შეგვიძლია ჩავწეროთ მატრიცის სახით,

 (19)

სადაც

 (20)

 (21)

 (22)

ვექტორი შეიცავს ცნობილ დაცემულ ველს და Z მატრიცის წევრები წარმოადგენენ გეომეტრიის ფუნქციებს. ინდუცირებული დენის უცნობი კოეფიციენტები წარმოადგენენ ვექტორის წევრებს. ეს სიდიდეები მიიღება განტოლებათა სისტემის ამოხსნით. სხვა პარამეტრები, გაბნეული ელექტრული და მაგნიტური ველები შეიძლება პირდაპირ გამოითვალოს ინდუცირებული დენებიდან.

## ეკრანირებული კაბელის გადაცემის წინაღობის დადგენის მეთოდები

ელექტრომობილების მაღალი ძაბვის კაბელებისთვის გამოიყენება რთული სტრუქტურის მქონე მრავალფენოვანი ეკრანები. ეს ეკრანები შედგება დიელექტრის თხელ ფენაზე დაფენილი მეტალის ლენტისგან, რომელიც შემოხვეულია ასევე მეტალის დაწნულ ბადეზე (იხ. ნახ. 11).

|  |
| --- |
| 5.jpg  6.jpg |
| 1. მაღალი ძაბვის კაბელების რთული სტრუქტურის მქონე მრავალფენოვანი ეკრანი |

ასეთი ეკრანის რთული სტრუქტურის გამო მისი გადაცემის წინაღობის აღწერა მხოლოდ ანალიტიკური მოდელებით ხშირად არ არის საკმარისი [19]. გადაცემის წინაღობის განსაზღვრის ერთ-ერთი ზუსტი მეთოდი არის მისი გაზომვა. გაზომვის ხშირად გამოყენებად მეთოდებს შორის მოიაზრება Line Injection Method-ი, Triaxlial მეთოდი, Ground Plate Method-ი [20]. Triaxial Method-ის გამოყენების სიზუსტე დამოკიდებულია კაბელის ეკრანის დიამეტრზე და ფორმაზე. თვითოეული განსხავებული კაბელისთვის უნდა შეირჩეს და დამზადდეს შესაბამისი დიამეტრის მქონე გამზომი მილი. მოყვანილი გარემოება ართულებს ამ მეთოდის გამოყენებას, როდესაც LIM-ი შედარებით ადვილი გამოსაყენებელია. გადაცემის წინაღობის გასაზომად ასევე იყენებენ GPM-ს. სამივე ზემოხსენებულ მეთოდს გააჩნია ერთნაირი შიდა წრედული დახასიათება, მაგრამ ისინი განსხვავდებიან ფიზიკური კონსტრუქციით და აქედან გამომდინარე დენის დაბრუნება წყაროში ხდება განსხავებული გზებით. Triaxlial მეთოდი იყენებს ცილინდრულ კონსტრუქციას დენის დასაბრუნებლად, LIM-ში დაბრუნებული დენი მიედინება პარალელურ მავთულში ხოლო GPM-ში დენი ვრცელდება ჰორიზონტალური დამიწების სპილენძის ფირფიტის მეშვეობით (იხ. ნახ. 12).

|  |
| --- |
|  |
| 1. გამზომი მეთოდების შედარება (a) Triaxial Method, (b) Line Injection Method and (c) Ground Plate Method (GPM). |

მარტივი ეკრანირებული კაბელი შეგვიძლია ელექტრომაგნიტური (წრედული) მოდელირების თვალსაზრისით განვიხილოთ როგროც შიდა და გარე წრედის კომბინაცია [21],[22] (იხ. ნახ. 13).

|  |
| --- |
|  |
| 1. ეკრანირებული კაბელის ექვივალენტური წრედი |

ინდუქტიური ურთიერთქმედება წარმოდგენილია Zt გადაცემის წინაღობით და ტევადური ურთიერთქმედება კი Yt გადაცემის გამტარებლობით. ელექტრული (ტევადური) და მაგნიტური (ინდუქტიური) ურთიერთქმედება განსაზღვრულია შემდეგნაირად (23):

 (23)

ბევრ შემთხვევაში გადაცემის წინაღობა არის მცირე, მაგრამ დაწნული ეკრანის მქონე კაბელებში შეიძლება ქონდეს დიდი მნიშვნელობა. სიხშირეების ზრდასთან ერთად ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს უფრო მარტივად შეუძლიათ დაწნული ეკრანის ხვრელებში შეღწევა, ამიტომ Zt-ს და Yt-ს განსაზღვრა არის მნიშვნელოვანი. LIM-ს გამოყენებით კი შეიძლება ორივე ეფექტის გაზომვა.

განვიხილოთ დეტალურად ყველაზე ხშირად გამოყენებადი გაზომვის მეთოდები.

### გაზომვის მეთოდები

* **Triaxial მეთოდი**

როგორც განხილულია ნაშრომში [21], Triaxial მეთოდი შეიძლება გამოყენებული იყოს ეკრანირებული კაბელების გადაცემის წინაღობის გასაზომად 30 MHz-მდე [23]. განვიხილოთ Triaxial მეთოდის ექვივალენტური წრედი (იხ. ნახ. 14), რომელიც შედგება შიდა წრედის, გარე წრედის და Triaxial ცილინდრისგან. სიგნალი იზომება port 2-ში.

|  |
| --- |
|  |
| 1. Triaxial მეთოდის ექვივალენტური წრედი |

სადაც:

R1N,R1F: შიდა წრედის ახლო და შორი დატვირთვების რეზისტიულობა

R2F,R2N: გარე წრედის შორი და ახლო დატვირთვების რეზისტიულობა

U1N: შიდა წრედის კვება

U2N,U2F: გარე წრედში ახლო და შორ ბოლოებზე ძაბვები

 (24)

გაზომილი S-პარამეტრებით კერძოდ კი S21-ით შემდეგნაირად გამოითვლება გადაცემის წინაღობა

 (25)

გამარტივებული შემთხვევიშთვის R2F შეგვიძლია ვუგულვებელყოთ და მივიჩნიოთ რომ R1F არის 50 Ω, მაშინ ფორმულა (25) გამარტივდება და მივიღებთ ფორმულა (26)-ს.

 (26)

* **Line Injection Method (LIM)**

ნახ. 15-ზე განხილულია LIM-ის ექვივალენტური წრედი, რომელიც შედგება დამსხივებელი გამტარი ხაზისგან, ეკრანირებული კაბელის გარე და შიდა წრედისგან [21]. Port 2-ის მხრიდან სისტემა იკვებება, ხოლო სიგნალი იზომება Port 1-ში. თუმცა ამოცანის სპეციფიკიდან გამომდინარე მკვებავ-გამზომი მხარეები შესაძლებელია შეიცვალოს. Triaxial მეთოდისგან განსხვავებით LIM-ს აქვს შესაძლებლობა გაზომვის დროს გაითვალისწინოს გადაცემით იმპედანსში შემავალი, როგორც ინდუქტიური ასევე ტევადური ურთირთქმედებები. ზემოხსენებული ფაქტი შესაძლებელს ხდის გაიზომოს ექვივალენტური გადაცემის წინაღობა.

|  |
| --- |
|  |
| 1. LIM-ის ექვივალენტური წრედი |

სადაც:

- ექვივალენტური გადაცემის წინაღობაა, - ტევადური ურთიერთქმედების იმპედანსი,-  გადაცემის წინაღობა

 (27)

 (28)

 (29)

* **Ground Plate Method (GPM)**

Triaxial მეთოდის გამარტივებით შემუშავდა GPM [21]. Triaxial Method-ის გამოყენებისას თვითოეული განსხავებული კაბელისთვის უნდა შეირჩეს და დამზადდეს შესაბამისი დიამეტრის მქონე გამზომი მილი. მოცემული გარემოებიდან გამომდინარე გარე წრედის შემქმნელი გამზომი მილი, რომლის მეშვეობითაც დენი ბრუნდება წყაროში GPM-ში შეცვლილია სპილენძის ფირფიტით (დამიწების ფირფიტა). ამ ორი მეთოდის ექვივალენტური წრედი კი იგივე რჩება (იხ. ნახ. 14.)

ექვივალენტური წრედის მათემატიკური ანალიზის პროცესში გათვალისწინებულია შემავალი და არეკვილი ტალღები Port 1 სა და Port 2 ში (იხ. ნახ. 14).

 (30)

სადაც S21(S-Parameters)= 

 (31)

გადაცემის წინაღობის ზოგადი გამოსახულება მოცემულია (31)-ში. გამარტივების შედეგად როდესაც ,  -ს გამოთვლა შესაძელბელია გამოსახულება (32)-ის დახმარებით.

 (32)

თუ  და , მაშინ გამოსახულება უფრო გამარტივდება და მიიღებს შემდეგ ფორმას (33).

 (33)

### ანალიტიკური მეთოდები

ეკრანირებული კაბელების გადაცემის წინაღობის დათვლის მრავალი ანალიტიკური მოდელი არსებობს. თვითოეულ მათგანში გათვალისწინებულია სხვადასხვა ფიზიკური ეფექტები და მათი გამოყენება ხდება დასმული ამოცანების სპეციფიკიდან გამომდინარე. ნაშრომის ფარგლებში განხილულია შემდეგი მოდელები: Vance [24,25], Tyni [22,26,27,28] და Kley [29,30].

|  |
| --- |
|  |
|  |
| 1. ეკრანის ფენები და ეკრანირებული კაბელის კვეთა |

|  |  |
| --- | --- |
| Parameters | Notation |
| Core diameter, [mm] | Dl |
| Shield inner diameter, [mm] | Di |
| Shield filament diameter, [mm] | d |
| Shield thickness, [mm] | Ts |
| Outer insulation thickness, [mm] | To |
| Number of filaments in carrier | N |
| Number of carriers | L |
| Weave Angle, [°] | ψ |
| Optical coverage, [%] | K |
| Shield Conductivity, [S/m] | σ |

|  |
| --- |
|  |
|  |
| 1. დაწნული ეკრანის სტრუქტურა |

* **ანალიტიკური მოდელო Vance**

კაბელის დაწნული ეკრანის თვისებები დამოკიდებულია შემდეგ სიდიდეებზე: ეკრანის შიდა რადიუსი , გამტარი ლენტების რაოდენობა ეკრანის ბადეში , ლენტაში შემავალი მავთულის დიამეტრი , მავთულების რაოდენობა ლენტაში  და ბადის ნაწნავის კუთხე . აღნიშნული სიდიდეები აღწერენ ეკრანის ბადის შევსების ფაქტორ -ს და ოპტიკურ დაფარვა -ს.

 (34)

 (35)

გადაცემის წინაღობის პირველი ანალიტიკური მოდელი ეკუთვნის Vance-ს

 (36)

 (37)

 (38)

სადაც:

 (39)

 არიან სიდიდეები რომელბიც მოყვანილია ცხრილში

- ეკრანის ოპტიკური დაფარვა

 - skin სიღრმე []

 - მართკუთხა ხვრელების ექვივალენტური ელიფსის ექცენტრისიტეტი (eccentricity).

Vance მოდელი გამოიყენება დაბალი სიხშირეებისთვის, სადაც () და (  ). კაბელები რომლებსაც გააჩნიათ ბადის ნაწნავის კუთხე და დაბალი ოპტიკური დაფარვის კოეფიციენტი, შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას გადაცემითი ინდუქტიობა (38),  -ს დასათვლელად. კაბელებს რომლებსაც გააჩნიათ დიდი ან მცირე  და მაღალი  სხვა ანალიტიკური მოდელებია საჭირო დამატებითი ფიზიკური ფენომენების აღსაწერად. Kley და Tyni მოდელები კი დამატებითი ფაქტორების აღწერის საშუალებას იძლევა.

* **ანალიტიკური მოდელი Tyni**

Tyni ანალიტიკური მოდელი გადაცემის წინაღობის გამოთვლისას ითვალისწინებს ეკრანის დაწნული ბადის გარე და შიდა შრეებს შორის მაგნიტურ ურთირთქმედებას.

 (40)

 (41)

სადაც:

*Lp* - არის ურთიერთ ინდუქტიობაა ორ შრეს შორის

 - არის დაწნული ეკრანის გარე დიამეტრი

h1– ეფექტური დაშორება ორ შრეს შორის

 (42)

- აღნიშნავს საშუალო დაშორებას ორ გამტარ ლენტს შორის დაწნულ ეკრანში,  კი ლენტში შემავალი მავთულის დიამეტრს

 (43)

* **ანალიტიკური მოდელი Kley**

Kley ანალიტიკური მოდელი დაფუძნებულია Tyni-ს შრომებზე (მოდელზე) და გაუმჯობესებულია გაზომვებით მიღებული მონაცემების მეშვეობით. გადაცემის წინაღობა Kley მოდელში მოცემულია შემდეგი გამოსახულების სახით.

 (44)

სადაც  არის ეკრანირებული კაბელის დიელექტრიკის თხელ ფენაზე დახვეული დახვრეტილი მეტალის ლენტის ექვივალენტური მოდელის გადაცემის წინაღობა (37). შეღწევადობის  ინდუქტიობა შედგება ორი ნაწილისგან.

 (45)

სადაც ML არის გაუმჯობესებული ხვრელების ინდუქტიობა La, რომელიც ითვალისწინებს ეკრანის სიმრუდეს. MG აღნიშნავს ეკრანში გამტარ ლენტებს შორის ურთიერთ-ინდუქტიობას.

 (46)

 (47)

 (48)

 (49)

 (50)

სადაც:

 - ეკრანის ოპტიკური დაფარვა

F - ეკრანის შევსების ფაქტორი

F0 – მინიმალური შევსების ფაქტორი

Dm - დაწნული ეკრანის საშუალო დიამეტრი

ეკრანში შეღწეული მაგნიტური ველი გამტარ ლენტებს შორის არსებული ხვრელების გარშემო ქმნის წრიულ დენებს, რის შედეგადაც იქმნება (ohmic term) . სხვა წრიული დენები (eddy currents) ინდუცირდებიან შიდა და გარე გამტარ ლენტებს შორის არსებული მაგნიტური ველით, რის შედეგადაც იქნმება - ის (quadrature) კვადრატური კომპონენტი.

 (51)

 (52)

 (53)

 (54)

 (55)

# გაზომვებისა და მოდელირების პროცესების აღწერა და მიღებული შედეგები

## Coroplast-FLRG2GCB2G-35 mm2 მაღალი ძაბვის კაბელის გადაცემის წინაღობის გაზომვა LIM (Line Injection Method) ით

Coroplast-FLRG2GCB2G-35 mm2 მაღალი ძაბვის ეკრანირებული კაბელის გადაცემის წინაღობის გაზომვა ხდება Line Injection Method-ით 300kHz-100MHz სიხშირულ დიაპაზონში. გაზომვის მოსამზადებლად საჭიროა ეკრანირებულ კაბელს ზედაპირის გასწვრივ დავაფინოთ გამტარი ზოლი (იხ. ნახ. 18). გამტარი ზოლი კაბელის ეკრანთან და გარე დიელექტრიკულ ფენასთან ერთად წარმოადგენს 50 ohm იან გადამცემ ხაზს. ეკრანირებული კაბელის ტალღური წინაღობაა 9.5 ohm ხოლო გამზომი ხელსაწყოს პორტის წინაღობაა 50 ohm. კაბელისა და მიმღების დასაკავშირებლად გამოიყენება შემათანხმებელი წრედი (იხ. ნახ. 19, ნახ. 22).

|  |
| --- |
|  |
|  |
| 1. LIM-ის გამზომი სისტემა |

|  |
| --- |
| **IMG_9484.JPG** |
| 1. შემათანხმებელი წრედი |

უკვე მომზადებული კაბელი უნდა ჩაისვას სპეციალურ ლაბორატორიულ გამზომ სტენში (იხ. ნახ. 18). გაზომვების ჩასატარებლად გამოიყენება HP 8752A Network Analyzer-ი (300kHz–3GHz). ეკრანირებულ კაბელზე დაფენილი გამტარი ხაზი დაბოლოებულია 50 ohm იანი წინაღობით. გაზომვების დროს გამტარი ხაზი შეერთებულია ანალიზატორის port-1 თან. ეკრანირებულ კაბელსა და ანალიზატორის port-2 ს შორის ჩასმულია შემათანხმებელი წრედი. კაბელის ბოლოში კი ზის 11 ohm იანი წინაღობა (იხ. ნახ. 20).

გაზომვის გრაფიკული სქემა მოცემულია (იხ. ნახ. 20), მეთოდის დეტალური აღწერა კი მოცემულია პარაგრაფ 3.2-ში.

|  |
| --- |
|  |
| 1. LIM-ის გაზომვის გრაფიკული სქემა |

გაზომილი S-პარამეტრები:

|  |
| --- |
|  |
| 1. LIM S-პარამეტრების გაზომვა (Far end-ში) |

გაზომილი S-პარამეტრებით კერძოდ კი S21-ით შემდეგნაირად გამოითვლება გადაცემის წინაღობა:

 (56)

სადაც:

- 50 ohm იანი კაბელის დაფენილი ხაზის დამაბოლოებელი წინაღობა,

- ძაბვის გამყოფის გადაცემის კოეფიციენტი,

- კაბელის სიგრძე,

შემათანხმებელი დატვირთვები

|  |
| --- |
|  |
| 1. შემათანხმებელი წრედი |

გაზომილი შედეგები შედარებული Kley ანალიტიკური მოდელით მიღებულ შედეგებთან. გადაცემის წინაღობის გამოთვლის ანალიტიკური მოდელები განხილულია პარაგრაფ 3.2.2-ში.

|  |
| --- |
|  |
| 1. გადაცემის წინაღობა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. გადაცემის წინაღობის რეალური ნაწილი |

|  |
| --- |
|  |
| 1. გადაცემის წინაღობის წარმოსახვითი ნაწილი |

## ლაბორატორიული გამზომი სტენდი და სპექტრის გენერატორი

გამზომი სისტემის საკვანძო ნაწილს წარმოადგენს ავტონომიური ფართოზოლოვანი სპექტრის მქონე გენერატორი და დატვირთის მოდული (იხ. ნახ. 26, ნახ. 27). ისინი დაკავშირებულნი არიან უკვე გამოკვლეული და ზემოთ განხილული ეკრანირებული კაბელით. სტენდის კონსტრუქცია იძლევა საშუალებას მარტივად ვცვალოთ მოდულების დამიწების პირობები. სტენდის მეშვეობით შესაძლებელია დამიწების სხვადასხვა კონფიგურაციებში გაიზომოს გამოსხივებული მაგნიტური ველი მარყუჟის ტიპის სენსორით და ასევე ახლო მდებარე კაბელებში აღძრული ძაბვა. აღნიშნული გაზომვებით შესაძლებელია შემოწმდეს სისტემის დამიწებასთან დაკავშირებული რეზონანსული მოვლენები და კომპიუტერული მოდელირების დახმარებით აღიწეროს ისინი. მომდევნო პარაგრაფებში განხილული იქნება დამიწების სხვადასხვა კონფიგურაციების, როგორც გაზომვები ასევე EMCoS Studio-ში შექმნილი 3D და წრედული მოდელები.

|  |
| --- |
|  |
| 1. მარტივად გადაწყობადი ლაბორატორიული გამზომი სტენდი |

|  |  |
| --- | --- |
|  | IMG_1031.JPG |
| 1. სპექტრის გენერატორი და დატვირთვის მოდული | |

სპექტრის გენერატორი წარმოდგენს ავტონომიურ ხელსაწყოს, რომლის ძირითადი ნაწილი კონტროლერით მართვადი მაღალი ძაბვის სიგნალის გენერატორია. სიგნალის გენერატორი საშუალებას იძლევა სპექტრის დონე შეინარჩუნოს 120-100dBuv-მდე 10KHz-50MHz სიხშირულ დიაპაზონში.

* იმპულსის წინა ფრონტის ხანგრძლივობაა 9 ns,
* იმპულსის ამპლიტუდაა 120 V,
* გენერატორს გააჩნია ორი სამუშაო სიხშირე 10KHz და 100KHz,

მოცემული გაზომვებისთვის გამოიყენება გენერატორის 100KHz-იანი მუშაობის რეჟიმი. გაზომვების ჩასატარებულია Agilent-MXA-N9020A (20Hz–8.4GHz) სიგნალების ანალიზატორით 150kHz-30MHz სიხშირულ დიაპაზონში.

## MTL მოდელი

თავდაპირველად მოხდა EMCoS Studio-ში ჰიბრიდული მოდულით გენერატორის, დატვირთვისა და შიდა სადენის მოდელირება. მოდელირება ხდება პარაგრაფ 3.1-სა და პარგარაფ 3.1.1-ში განხილული მეთოდებით.

პირველ ეტაპზე მოხდება მოდელში შეყვანილი კაბელების სეგმენტაცია. თვითოეული სეგმენტის ჭრილისთვის გამოითვლება სიგრძის ერთეულზე ნორმირებული LC პარამეტრები. ამ პარამეტრების გამოყენებით შეიქმნება გადამცემი ხაზების ექვივალენტური წრედები და მათ დაემატებათ დამაბოლოებელი მოწყობილობების წრედები. საერთო წრედი გამოითვლება Spice ტიპის ამომხსენი ალგორითმით. კაბელის გასწვრივ დათვლილი დენები გარდაიქმნება დენის წყაროებად, ჩაიწერება საჭირო ფორმატის ფაილში და მოხდება მისი გამოყენება 3D მოდელირების დროს.

|  |
| --- |
|  |
| 1. MTL გადამცემი ხაზის მოდელის 3D გარემოცვა |
|  |
| 1. MTL მოდელი, სისტემის ექვივალენტური სქემა |

მოდელირება ხდება დროით არეში და სპექტრი მიიღება ფურიე გარდაქმნის გამოყენებით. ამ გრაფიკზე წარმოდგენილია მოდელში დატვირთვაზე მიღებული ძაბვის სპექტრი (ლურჯი გრაფიკი) და შედარებულია ის გაზომილ სპექტრთან.

|  |
| --- |
|  |
| 1. გენერატორის მიერ შექმნილი სიგნალის სპექტრი |

მოდელირების დროს გამოყენებული Coroplast-FLRG2GCB2G-35 mm2 ეკრანირებული მაღალი ძაბვის კაბელის ანალიტიკური დახასიათება ხდება მრავალი პარამეტრის გამოყენებით. მოცემულ პარამეტრებზე დაყრდნობით გამოთვლილია მისი გადაცემის წინაღობა Kley ანალიტიკური მოდელით.

|  |  |
| --- | --- |
| 6.jpg |  |
| 5.jpg |
|  | |
| 1. Coroplast-FLRG2GCB2G-35 mm2 | |

მოდელში ეკრანირებული კაბელის აღწერისთვის გამოყენებულია შემდეგი პარამეტრები:

|  |
| --- |
| Untitled.jpg |
| 1. ეკრანირებული კაბელის ანალიტიკური მოდელის პარამეტრები |

თვითოეული ეკრანირებული კაბელის გადაცემის წინაღობის მიღებისთვის საჭიროა სწორად იყოს შევსებული მოცემული პარამეტრები. გაზომილი გადაცემის წინაღობა კი შესაძლებელია ორიენტირად იყოს გამოყენებული, ანალიტიკურ მოდელში შეყვანილი სიდიდეების სიზუსტის შესამოწმებლად. იმ შემთხვევაში თუ ყველა გეომტრიული პარამეტრი სწორად არის შევსებული და მაინც ანალიტიკურად მიღებული შედეგები არ ემთხვევა გაზომვას, შესაძლებელია Weave angle, Conductivity of material და Thickness of shield სიდიდეების რეგულირება. რთული ეკრანების მქონე მაღალი ძაბვის კაბელების გადაცემის წინაღობის მიღების მეთოდოლოგიის გაუმჯობესება სწორედ ამ გზით არის მიღწევადი.

გამოყენებული Coroplast-FLRG2GCB2G-35 mm2 ეკრანირებული კაბელის გაზომილი და Kley მოდელით დათვლილი გადაცემის წინაღობა მოცემულია ნახ. 33-ზე.

|  |
| --- |
|  |
| 1. გადაცემის წინაღობა |

ელექტრომობილების მაღალი ძაბვის კაბელებისთვის გამოიყენება რთული სტრუქტურის მქონე მრავალფენოვანი ეკრანები. ეს ეკრანები შედგება დიელექტრის თხელ ფენაზე დაფენილი მეტალის ლენტისგან, რომელიც შემოხვეულია ასევე მეტალის დაწნულ ბადეზე. Coroplast-FLRG2GCB2G-35 mm2 კაბელში სწორედ მზგავსი ტიპის ეკრანია გამოყენებული, მაგრამ არსებობენ კაბელები სადაც მხოლოდ დაწნულია ბადეა გამოყენებული ან მხოლოდ მეტალის ლენტი. განსხვავება იგრძნობა გადაცემით იმპედანსში (იხ. ნახ. 34).

|  |
| --- |
|  |
| 1. სხვადასხვა ტიპის ეკრანებისთვის გადაცემის წინაღობა |

## მძლავრი ეკრანირებული ელექტრული სისტემის სამგანზომილებიანი სრულტალღოვანი მოდელირება

EMCoS Studio-ს სამგანზომილებიან მოდულში კაბელის ეკრანის წარდგენა ხდება, სამკუთხედებისგან დაფარული გამტარი მილის სახით. ეკრანის შიგნით კი მოთავსებულია კაბელის გასწვრივ გამოთვლილი დენის წყაროები. პარაგრაფ 3.1 სა და 4.3-ში აღეწერილია როგორ იქმნება დენის წყაროები ჰიბრიდულ მოდულში სამგანზომილებიანი მოდელირებისთვის.

|  |
| --- |
| 50 ohm load |
|  |
| 1. EMCoS Studio-ს სამგანზომილებიან მოდულში კაბელის ეკრანი და  ერთ-ერთი კონფიგურაციის სამგანზომილებიანი მოდელი |

ეკრანს მინიჭებული აქვს სიხშირეზე დამოკიდებული გამტარებლობა (იხ. ნახ. 37), რომლის გამოთვლაც ხდება კაბელის გადაცემის წინაღობიდან. მოცემულ შემთხვევაში გამტარებლობა გამოთვლილია Kley ანალიტიკური მოდელის გადაცემის წინაღობის დახმარებით (იხ. ნახ. 36).

|  |
| --- |
|  |
| 1. გადაცემის წინაღობის მაგნიტუდა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. ექვივალენტური სიხშირეზე დამოკიდებული გამტარებლობა |

ნახ. 35 ნაჩვენებია EMCoS Studio-ში აგებული ერთ-ერთი კონფიგურაციის სამგანზომილებიანი მოდელი. მოდელი შედგება სხვადასხვა მეტალურ-დიელექტრიკული ობიექტებისგან. სამგანზომილებიან მოდელში გამოსხივებული მაგნიტური ველის დათვლა ხდება სპეციალური Near\_Field\_Probe წერტილებში (იხ. ნახ. 38). საბოლოო შედეგის მიღებისას ხდება თვითოეულ წერტილში დათვლილი მაგნიტური ველის გასაშუალოება. ახლომდებარე კაბელში აღძრული ძაბვა კი დაიმზირება კაბელის ბოლოებში დასმულ დატვირთვებზე (იხ. ნახ. 38). ახლომდებარე კაბელის ცენტრიდან ეკრანირებული კაბელის ცენტრამდე მანძილია 5 cm. გაზომვების დროს გამოყენებულ იქნა Aaroni 50mm magnetic field probe PBS-H4 მაგნიტური ანტენა.

|  |
| --- |
| 5 cm  5 cm  Vertical Plates  Table  50 ohm load  Vertical Plates  Load  Generator  Near\_Field\_Probe points. 50 mm magnetic probe |
| 1. 50mm მაგნიტური ანტენის მოდელი |

თვითოეულ მეტალურ ობიექტს გააჩნია რეალობის შესაბამისი სისქე და გამტარებლობა. ნახ. 39-ზე ნაჩვენებია გენერატორისა და დატვირთვის მოდელები. ნახ. 40 -ზე გამზომი სტენდის ფირფიტები. ნახ. 41 -ზე დამიწების მავთული. ნახ. 42 -ზე სტენდის ბოლოები იზოლირებულია მიწისგან 1.6 mm-ის სისქის მქონე დიელექტრიკი Fr\_4-ით.

|  |
| --- |
| Table  Load  Generator |
| 1. გენერატორის და დატვირთვის მოდულების ყუთები |

|  |
| --- |
| Vertical Plates  Vertical Plates  Table |
| 1. გამზომი სტენდის ვერტიკალური ფირფიტები |

|  |
| --- |
| Table  Grounding Cable  **Isolated with 1.6mm FR4 and grounded by wire** |
| 1. დამიწების მავთული |

|  |
| --- |
| Table  **Isolated with 1.6mm FR4 and grounded by wire**  Grounding Cable |
| 1. დიელექტრიკი Fr\_4 |

|  |
| --- |
| Vertical Plate  Table  h=1.6mm  Generator  Generator |
| 1. დიელექტრიკი Fr\_4 მოთავსებულია დამიწების მაგიდასა და სტენდის ფირფიტას შორის |

ცხრილი 2 - ში მოყვანილია თვითოეული ობიექტის სისქე, გამტარებლობა მეტალური ზედაპირებისთვის და დიელექტრიკული შეღწევადობა Fr\_4 დიელექტრიკისთვის.



|  |  |
| --- | --- |
| Parameter | Value |
| **FR-4** \_**Dielectric material** | ɛ=4.8, Dielectric loss=0.01, µ=0 |
| **Thickness of dielectric substrate** | 1.6 mm |
| **Conductivity of wire** | 57.6 MS/m |
| **Diameter of wire** | 1.2 mm |
| **Conductivity of boxes** | 20.3 MS/m |
| **Thickness of boxes** | 3 mm |
| **Conductivity of grounding wire** | 57.6 MS/m |
| **Diameter of grounding wire** | 1.2 mm |
| **Conductivity of table** | 20.3 MS/m |
| **Thickness of table** | 3 mm |
| **Source** | Impressed currents |
| **Loads** | 50 ohm |
| **Number of triangles** | 34707 |
| **Calculation Frequency Range** | 150 kHz – 30 MHz |

ცხრილი 3 -სა და ცხრილი 4 -ში მოყვანილია გამზომი სტენდის სხვადასხვა კონფიგურაციები ეკრანირებული და არაეკრანირებული კაბელების შემთხვევაში.

1. გამზომი სტენდის სხვადასხვა კონფიგურაციები არაეკრანირებული კაბელის შემთხვევაში

|  |  |
| --- | --- |
| კონფიგურაცია 1.1 | გენერატორის და დატვირთვის მხარეები დამიწებულია |
| კონფიგურაცია 1.2 | გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე კი იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით |
| კონფიგურაცია 1.3 | გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით |
| კონფიგურაცია 1.5 | გენერატორის მხარე იზოლირებულია FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით, ხოლო დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან |
| კონფიგურაცია 1.6 | გენერატორის და დატვირთვის მხარეები იზოლირებულნი არიან მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულნი არიან დამატებითი მავთულებით |

1. გამზომი სტენდის სხვადასხვა კონფიგურაციები ეკრანირებული კაბელის შემთხვევაში

|  |  |
| --- | --- |
| კონფიგურაცია 2.1 | გენერატორის და დატვირთვის მხარეები დამიწებულია |
| კონფიგურაცია 2.2 | გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე კი იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით |
| კონფიგურაცია 2.3 | გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით |
| კონფიგურაცია 2.4 | გენერატორის მხარე იზოლირებულია FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით, ხოლო დატვირთვის მხარე დამიწებულია |
| კონფიგურაცია 2.5 | გენერატორის მხარე იზოლირებულია FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით, ხოლო დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან |
| კონფიგურაცია 2.6 | გენერატორის და დატვირთვის მხარეები იზოლირებულნი არიან მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულნი არიან დამატებითი მავთულებით |

ცხრილი 3 -სა და ცხრილი 4 -ში მოყვანილი კონფიგურაციებისთვის გაზომვების სურათები, 3D მოდელები და MTL მოდელები და გაზომილი და მოდელირებული შედეგების შედარება წარმოდგენილია დანართში.

## კვლევის შედეგები და მათი განხილვა

ჰიბრიდულ და ელექტრო ავტომობილებში მაღალი სიმძლავრის მოდულების დამიწებასთან დაკავშირებული რეზონანსული მოვლენების შესასწავლად შეიქმნა ლაბორატორიული გამზომი სტენდი. სხვადასხვა დამიწების კონფიგურაციებისთვის შესრულდა გაზომვები და კომპიუტერული მოდელირება. სისტემის თითოეული დამიწების კონფიგურაციისთვის გამოყენებულ იქნა, როგორც ეკრანირებული, ასევე არაეკრანირებული კაბელები. მოცემულ გრაფიკებში (იხ. ნახ. 46-ნახ. 47) ნაჩვენებია ახლომდებარე კაბელში აღძრული ძაბვა და მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | |  |
|  | |  |
|  | |  |
|  | |  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა | 1. მაგნიტური ველი სენსორში | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა | 1. მაგნიტური ველი სენსორში |

მოყვანილი გრაფიკებიდან კარგად ჩანს კაბელის ეკრანირების ეფექტი. ეკრანს შეუძლია დაახლოებით 60 dB -თი ჩაახშოს გამოსხივებული სიგნალები (იხ. ნახ. 46- ნახ. 47).

|  |
| --- |
| 40 dB (1 MHz) |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |
| 58 dB (1 MHz) |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

კონფიგურაცია x-3 -ის შემთხვევაში (იხ ცხრილი 3, ცხრილი 4) კაბელის ეკრანირებით, 1MHz -ზე გამოსხივებული მაგნიტური ველი 50 მილიმეტრიან მარყუჟულ სენსორში 40 dBT-ით შემცირდა (იხ. ნახ. 48). ახლომდებარე კაბელში აღძრული ძაბვა კი 58 dBµV-ით (იხ. ნახ. 49).

სამაგისტრო ნაშრომის ერთ-ერთი მთავარი მიზანია სისტემის დამიწების ხაზის იმპედანსთან დაკავშირებული რეზონანსული ეფექტების შესწავლა. გაზომვებისა და მოდელირების დროს სისტემის სხვადასხვა კონფიგურაციების ჩართვისას გამოყენებულ იქნა რამდენიმე დამიწების მეთოდი:

* ხელსაწყოს კორპუსი არის ლოკალურად დამიწებული დიდ ფართზე (იხ. ნახ. 50)

სისტემის ლოკალურად დამიწების შემთხვევაში, ექვივალენტურ სქემაში გამოყენებულია პირდაპირი კავშირი მიწასთან.

* ხელსაწყო კორპუსი არის იზოლირებული დამიწების ზედაპირთან (იხ. 0)

სისტემის მიწიდან იზოლირების შემთხვევაში, ექვივალენტურ სქემაში გამოყენებულია ტევადური კავშირი, რომელიც წარმოადგენს ხელსაწყოს კორპუსის ტევადობას დამიწების ფირფიტასთან. ხელსაწყო მიწიდან იზოლირებულია დიელექტრიკული (Fr\_4) ფირფიტით. დიელექტრიკის ელექტრული შეღწევადობისა და გეომეტრიული ზომების გამო ხელსაწყოს მიწასთან გააჩნია 800pF ტევადობა.

* ხელსაწყო არის იზოლირებული, მაგრამ კავშირი დამიწების ფირფიტასთან ხდება მავთულით (იხ. ნახ. 52)

სისტემა მიწიდან იზოლირებულია დიელექტრიკული ფირფიტით და ამავდროულად დამიწებულია დამატებითი მავთულით. ექვივალენტურ სქემაში მიწასთან ტევადური კავშირის გარდა დამატებულია დამიწების მავთულის ინდუქტიობა და მასთან მიმდევრობით ჩართული წინაღობა. დამიწების მავთულს გააჩნია 250nH ინდუქტიობა და 1mΩ წინაღობა.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
| პირდაპირი კავშირი | ტევადური კავშირი | დამატებითი მავთულით კავშირი |

დამიწების სხვადასხვა მეთოდების გამოყენება ცვლის სისტემის დამიწების იმპედანსს. დამიწების იმპედანსის ცვლილებით კი წარმოიქმნება სხვადასხვა პარალელური თუ მიმდევრული რეზონანსული ეფექტები (იხ. პარაგრაფი 1.3). სამაგისტრო ნაშრომის ერთ-ერთი მიზანია რეზონანსული ეფექტების შესწავლა. სისტემის სხვადასხვა კონფიგურაციებში ჩართვის დროს იქმნება განსხავებული რეზონანსული კონტურები და ახლომდებარე კაბელში აღძრული ძაბვა თუ გამოსხივებული მაგნიტური ველი საგრძნობლად შეიძლება შეიცვალოს. ნახ. 53 -ზე ნაჩვენებია ახლომდებარე კაბელში აღძრული ძაბვა სხვადასხვა დამიწების კონფიგურაციებიში (ეკრანირებული კაბელის შემთხვევაში).

|  |
| --- |
|  |
| 1. რეზონანსული ეფექტები სხვადასხვა დამიწების კონფიგურაციებში |

ლურჯი გრაფიკით (ტეხილი) წარმოადგენილია სისტემის 2-1 კონფიგურაცია, როდესაც დამიწებულია გამზომი სტენდის ორივე მხარე. მოცემულ სიხშირულ დიაპაზონში არ ჩანს რეზონანსული ეფექტი. ნახ. 54-ზე ნაჩვენებია სისტემის ექვივალენტური წრედი.

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.1) |

წითელი გრაფიკით წარმოდგენილია სისტემის 2-2 კონფიგურაცია, როდესაც დამიწებულია გამზომი სტენდის გენერატორის მხარე, ხოლო იზოლირებულია დატვირთვის მხარე Fr\_4 დიელექტრიკული ფირფიტით. ახლომდებარე კაბელში აღძრული ძაბვა გაიზარდა დაახლოებით 20 dB-ით და 10MHz-ზე გაჩნდა რეზონანსი. რეზონანსის გაჩენის მიზეზი აღწერილია ექვივალენტური სქემის მეშვეობით (იხ.ნახ. 55 ). დატვირთვის მხარეს ჩასმულია 800pF ტევადობა მიწასთან.

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.2) |

შავი გრაფიკით წარმოდგენილია სისტემის 2-3 კონფიგურაცია. მოცემული შემთხვევისთვის დამიწებულია სტენდის გენერატორის მხარე ლოკალურად, ხოლო დატვირთვის მხარე იზოლირებულია დიელექტრიკული ფირფიტით და მიწასთან კავშირი აქვს დამატებითი მავთულით. რეზონანსის პოზიციამ კონფიგურაცია 2-2 თან შედარებით (წითელი გრაფიკი) ადგილი შეიცვალა, 10MHz-დან გადაიწია 15MHz-ზე. არსებული ხაზის ინდუქტიობასა და მიწასთან ტევადობის პარალელურად ჩასმული დამატებითი ხაზის ინდუქტიობის გაჩენამ გამოიწვია რეზონანსული კონტურის საერთო ინდუქტიობის შემცირება, რის გამოც რეზონანსის პოზიცია მაღალი სიხშირისკენ გადავიდა. ექვივალენტურ სქემაში დატვირთვის მხარეს ჩასმულია 800pF ტევადობა მიწასთან და 250nH ინდუქტიობა მის პარალელურად (იხ. ნახ. 56).

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.3) |

ვარდისფერი გრაფიკით წარმოდგენილია სისტემის 2-5 კონფიგურაცია. მოცემული შემთხვევისთვის იზოლირებულია სტენდის დატვირთვის მხარე მიწიდან, ხოლო გენერატორის მხარე იზოლირებულია და მიწასთან კავშირი აქვს დამატებითი მავთულით. პირველმა რეზონანსის პოზიციამ კონფიგურაცია 2-2 თან შედარებით (წითელი გრაფიკი) ადგილი შეიცვალა, 10MHz-დან გადაიწია 7MHz-ზე. ასევე გაჩნდა მეორე რეზონანსიც. რეზონანსების გაჩენის მიზეზები აღწერილია ექვივალენტური სქემის მეშვეობით (იხ. ნახ. 57). პირველი რეზონანსის დაბალი სიხშირისკენ გადასვლის მიზეზია დატვირთვისა და გენერატორის მოდულებში მიმდევრობით ჩართული ორი ტევადობა.

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.5) |

ცისფერი გრაფიკით წარმოდგენილია სისტემის 2-6 კონფიგურაცია. მოცემული შემთხვევისთვის სტენდის დატვირთვისა და გენერატორის მხარეები იზოლირებულნი არიან დიელექტრიკით და დამიწებულნი არიან დამათები მავთულებით. რეზონანსის პოზიციამ კონფიგურაცია 2-3 თან შედარებით (შავი გრაფიკი) ადგილი შეიცვალა, 15MHz-დან გადაიწია 18.5MHz-ზე. დატვირთვისა და გენერატორის მოდულებში არსებული ხაზის პარალელურად ჩასმულია დამატებითი დამიწების მავთულების ინდუქტიობები. ეს კიდევ უფრო დაბლა წევს რეზონანსული კონტურის საერთო ინდუქტიობას, რის გამოც რეზონანსის პოზიცია მაღალი სიხშირისკენ გადავიდა. ნახ. 58-ზე ნაჩვენებია სისტემის ექვივალენტური წრედი.

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.6) |

# დასკვნა

რთული ეკრანების მქონე მაღალი ძაბვის კაბელის გადაცემის წინაღობის გასაზომად და სისტემის დამიწებასთან დაკავსშირებული რეზონანსული ეფექტების შესასწავლად შეიქმნა ლაბორატორიული გამზომი სტენდი.

გამზომი სტენდის საშუალებით მოხდა ეკრანირებული სისტემების დამიწებასთან დაკავშირებული რეზონანსული ეფექტების გამოკვლევა. გაზომვების დროს დაიმზირებოდა ძაბვა ახლომდებარე კაბელში და მაგნიტური ველი 50 მილიმეტრიან მარყუჟულ ანტენაში.

გაიზომა რთული ეკრანების მქონე მაღალი ძაბვის კაბელების გადაცემის წინაღობა Line Injection Method-ით. გაზომილი გადაცემის წინაღობა გამოყენებულ იქნა როგორც ორიენტირი Kley ანალიტიკური მეთოდისთვის. რთული ეკრანების მქონე მაღალი ძაბვის კაბელების გადაცემის წინაღობის მიღების მეთოდოლოგიის გაუმჯობესება სწორედ ამ გზით არის მიღწეული.

ეკრანირებული სისტემების დამიწებასთან დაკავშირებული რეზონანსული ეფექტების გამოკლვევა და აღწერა მოხდა კომპიუტერული მოდელირებისა და გაზომვების საშუალებით.

ყველა გამოკვლევა ჩატარდა კომპანია EMCoS-ში (თბილისი, საქართველო)

ვუხდი დიდ მადლობას ჩემს ხელმძღვანელებს: დოქ. ანა გეონჯიანსა და პროფ. რომან ჯობავას ამ საინტერესო თემის შერჩევისათვის და ასევე დახმერებისთვისა და რჩევებისთვის.

მინდა მადლობა გადავუხადო ჩემს ხელმძღვანელს დოქ. ანა გეონჯიანს, ბადრი ხვიტიას და დიანა ერემიანს გადაცემის წინაღობის (transfer impedance) გაზომვების მეთოდებისა და ანალიტიკური მოდელირების თეორიული მასალების მოძიებასა და გარჩევაში.

ასევე მინდა მადლობა მოვუხადო ბადრი ხვიტიას, ზვიად კუჭაძესა და მთელს EMCoS-ის ლაბორატორიას, გასაზომი დანადგარების აწყობასა და გაზომვებში მხარდაჭერისთვის.

# ლიტერატურა

[1]. SAE Handbook, *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, USA, 1999.

[2]. SAE EMI Standards Committee, “Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Components and Modules for the Protection of Receivers Used On Board Vehicles,” SAE Standard SAE J1113/41, July, 1995.

[3]. SAE EMI Test Methods and Standards Committee, “Electromagnetic Compatibility – Component Test Procedure – Part 42 – Conducted transient Emissions,” SAE Standard SAE J1113/42, July, 1994.

[4]. CISPR25, “Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats and devices – limits and methods of measurement,” International Electrotechnical Commission (CISPR), March, 2008.

[5]. G. L. Skibinski, R. J. Kerkman and D. Schlegel, “EMI emissions of modern PWM AC drives,” In IEEE Industry Applications Magazine, vol. 5, no. 6, pp. 47 - 80, 1999.

[6]. M. E. Haque, A. A. Bokhari and A. I. Alolah, “Simulink modeling of the problem associated with fast switching PWM IGBT-inverter fed AC motor drive with long cable and its remedies,” IEEE Intl. conference on Systems, Signals & Devices, Sousse-Tunisia, March 21-24, 2005.

[7] M. E. Haque, M. F. Rahman. and T. R. Blackburn, “A study of the over-voltage stress with IGBT inverter waveforms on motor and supply cabling and their remedial measures,” Proc. of AUPEC/EECON Conference, Darwin, Australia, pp. 87-92, Sept. 26-29,1999.

[8]. T. Haider, M .E. Haque, M. F. Rahman, T. R. Blackburn and C. Grantham, “Modeling and experimental studies of effect of steep fronted inverter waveform on motor and supply cabling and their remedies,” IEEE International Conference on Power Electronics and Drives (PEDS'99), Hong Kong, vol. 2, pp. 519-525, July 27-29, 1999.

[9]. K. M. Muttaqi and M. E. Haque, “Electromagnetic Interference Generated from Fast Switching Power Electronic Devices,” International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, vol. 3, no. 1, April, 2008.

[10]. “EMCoS Ltd. EMCoS Studio,” www.emcos.com, 2018.

[11]. C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility,* Second edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.

[12]. C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines,* John Wiley & Sons, New York, 1994.

[13]. D. Karkashadze, R. Jobava, S. Frei and B. Soziashvili, “A fast method of auxiliary sources based calculation of capacitance and inductance matrices,” in Proc. 6th Int. Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED 2001, Lviv, Ukraine, pp. 187-190.

[14]. H. Chobanyan, I. Badzagua, T. Injgia, A. Gheonjian and R. Jobava, “Application of hybrid MoM/MTL method to simulation of interaction between cable harness and antennas,” in Proc. 14th Int. Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED 2009, Lviv, Ukraine, pp. 33-38.

[15]. K. L. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook,* Boca Raton, FL: CRC Press, 2005, ch. 5.

[16]. S. A. Schelkunoff, “Theory of lines and shields,” Bell Syst. Tech. J., v. 13, no. 4, pp. 532-579, 1934.

[17]. F. Tesche, M. V. Ianoz and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models,* John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997, Part V Shielding Models.

[18]. R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods,* New York, Macmillan, 1968.

[19]. L. Qi, X. Cui, and X. Gu, “A simple method for measuring complex transfer impedance and admittance of shielded cable in substations,” 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, 27 February–3 March 2006, pp. 650–653.

[20]. A. Mushtaq and S. Frei, “Transfer impedance simulation and measurement methods to analyze shielding behavior of HV cables used in Electric-Vehicles and Hybrid-Electric-Vehicles,” Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013), Brugge, Belgium, September 2-6, 2013, pp. 241-246.

[21]. A. Mushtaq and S. Frei, “Analysis of Shielding Effectiveness of HV Cable and Connector Systems used for Electric Vehicles,” open access proceedings of Advances in Radio Science, 14, 139–145, 2016

[22]. F. Tesche, M. V. Ianoz and T. Karlsson, “EMC Analysis Methods and Computational Models”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.

[23]. Communication cables – Specification for test methods Part1-6 of EN50289: Electrical test methods of Part 1-6 – Electromagnetic performance (English version).

[24]. E. F. Vance, “Shielding Effectiveness of Braided-Wire Shields,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-17. no. 2. May 1975.

[25]. E. F. Vance, *Coupling to Shielded Cables,* John Wiley & Sons, Inc., 1978.

[26]. M. Tyni, “The Transfer Impedance of Coaxial Cables with Braided Outer Conductor,” Digest of the 10th International Wroclaw Symposium on EMC, 1976.

[27]. S. Sali, “An improved Model for the Transfer Impedance Calculations of Braided Coaxial Cables,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.32, no. 2, 1991.

[28]. F. A. Benson, P. A. Cudd and J. M. Tealby, “Leakage from coaxial cables,” IEE Proc-A, vol. 139, no. 6, 1992, pp 285-303.

[29]. T. Kley, “Optimized Single-braided Cable Shields,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.35, no. 1, 1993.

[30]. H. Schippers, J. Verpoorte, R. Otin, “Electromagnetic analysis of metal braids,” Proc. of the 10th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2011), York, UK, September 26-30, 2011, pp 543-548.

# დანართი

## არაეკრანირებული კაბელის გამოსხივებით შექმნილი ელექტრომაგნიტური ველი

* კონფიგურაცია 1.1 – გენერატორის და დატვირთვის მხარეები დამიწებულია

|  |
| --- |
| IMG_0378.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 1.1 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.1) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.1) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 1.2 – გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე კი იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით

|  |
| --- |
| IMG_0370.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 1.2 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.2) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.2) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 1.3 გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით

|  |
| --- |
| IMG_0356.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 1.3 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.3) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.3) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 1.5 – გენერატორის მხარე იზოლირებულია FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით, ხოლო დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან

|  |
| --- |
| IMG_0386.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 1.5 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.5) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.5) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 1.6 – გენერატორის და დატვირთვის მხარეები იზოლირებულნი არიან მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულნი არიან დამატებითი მავთულებით

|  |
| --- |
| IMG_0349.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 1.6 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.6) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-1.6) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

## ეკრანირებული კაბელის გამოსხივებით შექმნილი ელექტრომაგნიტური ველი

* კონფიგურაცია 2.1 – გენერატორის და დატვირთვის მხარეები დამიწებულია

|  |
| --- |
|  |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 2.1 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.1) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.1) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგრუაცია 2.2 – გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე კი იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით

|  |
| --- |
|  |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 2.2 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.2) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.2) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 2.3 – გენერატორის მხარე დამიწებულია, დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით

|  |
| --- |
|  |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 2.3 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.3) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.3) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 2.4 – გენერატორის მხარე იზოლირებულია FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით, ხოლო დატვირთვის მხარე დამიწებულია

|  |
| --- |
| IMG_0295.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 2.4 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.4) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.4) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 2.5 – გენერატორის მხარე იზოლირებულია FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულია დამატებითი მავთულით, ხოლო დატვირთვის მხარე იზოლირებულია მაგიდიდან

|  |
| --- |
| IMG_0335.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 2.5 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.5) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.5) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |

* კონფიგურაცია 2.6 – გენერატორის და დატვირთვის მხარეები იზოლირებულნი არიან მაგიდიდან FR\_4 დიელექტრიკით და დამიწებულნი არიან დამატებითი მავთულებით

|  |
| --- |
| IMG_0339.JPG |
| 1. გამზომი კონფიგურაცია 2.6 ძაბვა გაზომილია ახლომდებარი კაბელში, მაგნიტური ველი გაზომილია მარყუჟული სენსორით |

|  |
| --- |
|  |
| 1. 3D მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.6) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. წრედული მოდელი EMCoS Studio-ში (კონფ-2.6) |

|  |
| --- |
|  |
| 1. კაბელში აღძრული ძაბვა |

|  |
| --- |
|  |
| 1. მაგნიტური ველი მარყუჟულ სენსორში |