**ივანე ჯავახიშვილის სახელობის**

**თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი**



***გიორგი კაპანაძე***

**არადანი**

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი  
ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერია

სადოქტორო ნაშრომი

სადოქტორო ნაშრომის ხელმძღვანელი : **არჩილ ბოლქვაძე**

აბასთუმნის ობსერვატორია 2021

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)

# არადანი

კითხვები:

1. რა არის არადანი?
2. გადაბმის მექანიზმები, მანქანური ენა
3. მანქანური სიტყვების თქმის განზომილება. განზომილებები
4. ახალი ენა
   1. აენის განზომილება
5. ახალი გადაბმის მექანიზმი
   1. მექანიზმის აღწერა oars (ო სიგმა)
   2. გულგული
6. ოპერაციული სისტემის (მრავალამოცანიანობის) იმპლემენტაცია სიტყვებად (ახლებურად)
   1. ვიდეო
   2. ციკლი სამმაგი (3დ) ვაილის გარეშე (ახლებურად)
   3. გამოყენება
   4. უპირატესობები
   5. ნაკლები
   6. დასვნა
7. ოპერაციული სისტემები
   1. აღწერა
   2. ნაკლები
   3. უპირატესობები
   4. ოპერაციული სისტემა oars (ახლებურად)
   5. დასვნა
8. C ენა. კოდის იმპლემენტაცია (არადანი)
   1. მექანიზმის აღწერა (იმპლემენტაცია კოდი)
   2. Gaming (თამაშების იმპლემენტაცია, ახლებურად)
   3. HTTP პარსერი (ახლებურად)
9. უფრო ლამაზი გახდება თუ უფრო სწრაფი და ჩახლართული?
10. რატომაა საჭირო არსებულის შეცვლა?
11. რა უპირატესობას მომიტანს?
12. რა საშენი მასალა მაქვს?
13. რა წესებით შემიძლია გადაბმების გაკეთება?
14. რისი შეცვლაა შესაძლებელი?
15. და რა ვერ შეიცვლება?
16. რის ოპტიმიზირებას ცდილობთ? (ოპტიმიზირებას?)
17. რატომ არ მოგწონთ აქამდე არსებული?

პასუხები:

როცა return ზე ორიენტირებული გადაბმის სისტემა გვაქვს. რთული ლოგიკური კომპოზიციის წარმოსადგენად საჭიროა ბევრი “if” - „თუ“ - ების გამოყენება.   
ლოგიკური კომპოზიციები უფრო სწრაფად გადაებმება ახალი გადაბმის მექანიზმით, რადგან გადაბმის დროს „თუ“ ინსტრუქციები (გადახტომები, CPU ს მუშაობის დროს, სტეკის გამოყენება) აღარ იქნება საჭირო. მივდივართ სულ წინ. (დასაზუსტებელია პასუხი)!

# ანოტაცია

# შესავალი

## მაღალი ძაბვის ეკრანირებული სისტემების აქტუალობა საავტომობილო წარმოებაში

(იხ. ნახ. 1, ნახ. 2).

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

## ელექტრომაგნიტური თავსებადობის პრობლემები და ეკრანირების მნიშვნელობა

(იხ. ნახ. 2, HV ელემენტი).

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

(იხ. ნახ. 2).

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

(იხ. ნახ. 3).

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

(იხ. ნახ. 4, ნახ. 5).

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

 (1)

 (2)

 (3)

და  არის კაბელის რეზისტიულობა რეზონანსის სიხშირეზე,

საბოლოოდ ვიღებთ:

 (4)

 (5)

აქედან,

 (6)

შემდეგნაირად (6) და (იხ. ნახ. 5).

მცირეა (იხ. ნახ. 4) Zo=.

 (7)

სადაც:

 -

 -

   (იხ. ნახ. 6).

 (იხ. ნახ. 6).

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

# 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

• 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).

 (8)

 (9)

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

მატრიცა. ნახ. 9-ზე .

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

 (10)

 (11)



 (12)

, ,  (13)

ნახ. 10-ზე.

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

  პარაგრაფ 3.2-ში.

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

 (14)

 (15)

უნდა გავშალოთ ბაზისური ფუნქციების სასრულ ჯამად:

 (16)

()

 (17)

სადაც 

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

 (18)

რომელიც შეგვიძლია ჩავწეროთ მატრიცის სახით,

 (19)

სადაც

 (20)

 (21)

 (22)

## ეკრანირებული კაბელის გადაცემის წინაღობის დადგენის მეთოდები

(იხ. ნახ. 11).

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

(იხ. ნახ. 12).

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

(იხ. ნახ. 13).

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

Zt კი Yt (23):

 (23)

### გაზომვის მეთოდები

* **Triaxial მეთოდი**

(იხ. ნახ. 14)

|  |
| --- |
|  |
| 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)

 (26)

* **Line Injection Method (LIM)**

ნახ. 15-ზე

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

სადაც:

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

 (27)

 (28)

 (29)

* **Ground Plate Method (GPM)**

(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

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**

, , ,  . -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).

() და (  ). (38),  -ს  

* **ანალიტიკური მოდელი Tyni**

 (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**

 (44)

სადაც  ს 

 (45)

 (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

(იხ. ნახ. 18). (იხ. ნახ. 19, ნახ. 22).

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

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

(იხ. ნახ. 18 (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 |

პარაგრაფ 3.2.2-ში.

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

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

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

## ლაბორატორიული გამზომი სტენდი და სპექტრის გენერატორი

(იხ. ნახ. 26, ნახ. 27).

|  |
| --- |
|  |
| 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

მოდელირება ხდება პარაგრაფ 3.1-სა და პარგარაფ 3.1.1-ში განხილული მეთოდებით.

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

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

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

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

Weave angle, Conductivity of material და Thickness of shield ნახ. 33-ზე.

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

(იხ. ნახ. 34).

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

## მძლავრი ეკრანირებული ელექტრული სისტემის სამგანზომილებიანი სრულტალღოვანი მოდელირება

პარაგრაფ 3.1 სა და 4.3-ში

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

(იხ. ნახ. 37 (იხ. ნახ. 36).

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

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

ნახ. 35 (იხ. ნახ. 38). (იხ. ნახ. 38).

|  |
| --- |
| 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 |

ნახ. 39-ზე ნახ. 40 ნახ. 41 ნახ. 42

|  |
| --- |
| 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

## კვლევის შედეგები და მათი განხილვა

(იხ. ნახ. 46-ნახ. 47)

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

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

(იხ. ნახ. 46- ნახ. 47).

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

(იხ ცხრილი 3, ცხრილი 4) (იხ. ნახ. 48). (იხ. ნახ. 49).

* (იხ. ნახ. 50)
* (იხ. 0)
* (იხ. ნახ. 52)

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

(იხ. პარაგრაფი 1.3). ნახ. 53

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

ნახ. 54

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

(იხ.ნახ. 55 )

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

(იხ. ნახ. 56).

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

(იხ. ნახ. 57).

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

ნახ. 58

|  |
| --- |
|  |
| 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.