

Испитивање одзива високонапонског омског дјелила напона

Младен Бањанин
Електротехнички факултет
Источно Сарајево, Босна и Херцеговина
banjanin@ymail.com

Милан Савић, Ратко Ковачић
Електротехнички факултет
Београд, Србија
savic_ms@eunet.rs

Садржај—У раду се описује начин испитивања одзива и моделовање високонапонског омског дјелила напона. Дата је замјенска шема омског дјелила напона за високе учестаности, као и параметри елемената у шеми. Симулацијама је показано да се преко модела дјелила напона са концентрисаним параметрима не могу моделовати експериментално добијени резултати. Приказане су шеме уређаја помоћу којих могу да се генеришу правоугаони импулси ниског и високог напона који су потребни да би се испитао одзив дјелила. Дати су резултати експерименталних мјерења одзива дјелила напона на високом и ниском напону.

Кључне ријечи—омско дјелило напона; одзив дјелила; високонапонска мјерења;

I. УВОД

Мјерење високих једносмјерних, наизмјеничних и ударних напона поставља посебне захтјеве и проблеме који нису уобичајени у класичним мјерним поступцима примијењеним у другим областима електротехнике. Проблеми се повећавају са повећањем амплитуде и фреквенције мјерених напона. Ови проблеми су најчешће повезани са потребом контроле јачине електричног поља у околини мјерних уређаја које може да изазове појаву короне и појаву прескока између појединих дијелова мјерног круга, као и појаву интерференције у мјерним кабловима која уноси грешку у мјерења. Израда мјерних уређаја који би директно могли мјерити високе напоне није ни економски исплатива, а није ни сигурна за кориснике. Најједноставнији уређаји који се користе за смањење амплитуде мјерених напона су високонапонске сонде. Оне су једноставне за употребу, али је проблем што се углавном израђују да могу да мјере до неколико десетина киловолти ударних, наизмјеничних или једносмјерних напона. За мјерење виших напона мора да се користи дјелило напона.

II. ВРСТЕ ДЈЕЛИЛА НАПОНА

Дјелила напона се израђују од отпорника и/или кондензатора па према томе и носе називе омска, капацитивна или комбинована дјелила напона. Постоје и индуктивна дјелила напона [1] која се веома ријетко користе и то једино за мјерење напона индустријске учестаности. Произвођачи високонапонске мјерне и испитне опреме нуде дјелила напона која су начињена од отпорника и/или кондензатора. Који елементи ће се

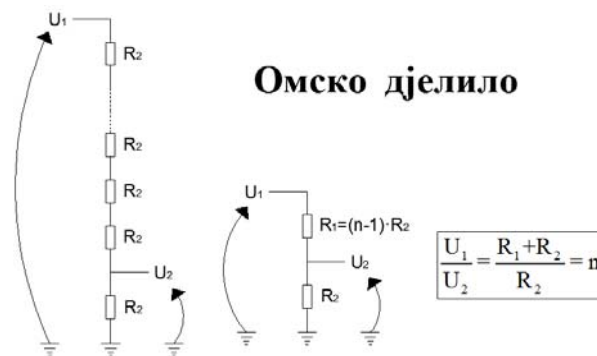
користити за израду дјелила напона зависи од врсте напона који се мјери и напонског нивоа:

- 1) Капацитивно дјелило напона
 - мјерење наизмјеничног напона индустријске учестаности,
- 2) Омско-капацитивно дјелило напона
 - мјерење наизмјеничног напона индустријске учестаности и ударних напона.
 - мјерење ударних напона, напона индустријске учестаности и једносмјерних напона.
- 3) Омско дјелило напона
 - мјерење ударних пуних и сјечених атмосферских таласа (омско дјелило мале отпорности).
 - мјерење једносмјерних напона (омско дјелило велике отпорности).

Омско дјелило напона се не користи за мерење високих наизмјеничне напоне индустријске учестаности (преко 50 kV) због великих губитака снаге и загријавања отпорника. За мјерење сјечених ударних напона капацитивно дјелило напона није погодно због спорог одзива. За једносмјерне напоне може да се користи или омско-капацитивно дјелило напона или омско дјелило напона велике отпорности. За мјерење ударних сјечених таласа користи се ниско-омско дјелило напона због брзог одзива.

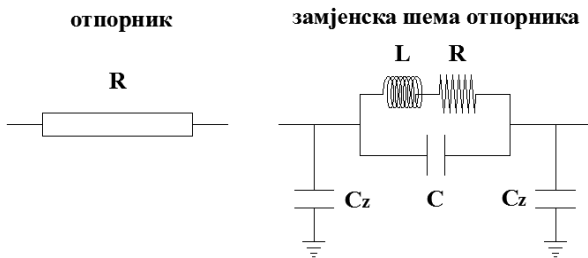
III. ОМСКО ДЈЕЛИЛО НАПОНА

Омско дјелило напона и одговарајућа једначина која дефинише његов преносни однос дати су на слици 1. Ниско-омско дјелило напона се користи за мјерење ударних напона чија фреквенција је у MHz-ном подручју.



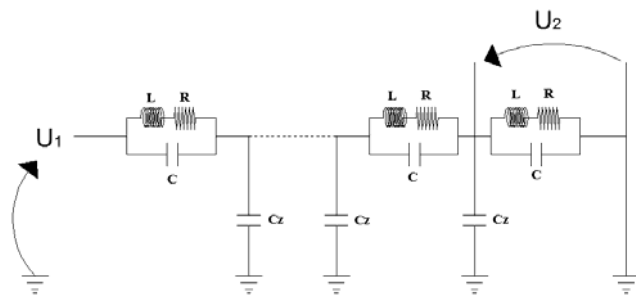
Слика 1. Замјенска шема омског дјелила напона

Због тако високе фреквенције до изражаја долази утицај паразитних капацитета и индуктивности. Еквивалентна замјенска шема отпорника за високе учестаности приказана је на слици 2.



Слика 2. Замјенска шема отпорника за високе учестаности

Посљедица овакве замјенске шеме отпорника унутар дјелила напона су осцилације током мјерења напона и изобличење мјерених пренапонских таласа. Замјенска шема омског дјелила напона које ће се користити за мјерење ударних атмосферских таласа је дата на слици 3.



Слика 3. Замјенска шема омског дјелила напона за високе фреквенције

Ознаке са слика 2. и 3. су сљедеће:

- R је отпорност отпорника,
- L је паразитна индуктивност отпорника,
- C је паразитна подужна капацитивност отпорника,
- Cz је паразитна доземна капацитивност отпорника.
- U₁ - испитни напон,
- U₂ - напон који се води на мјерни уређај.

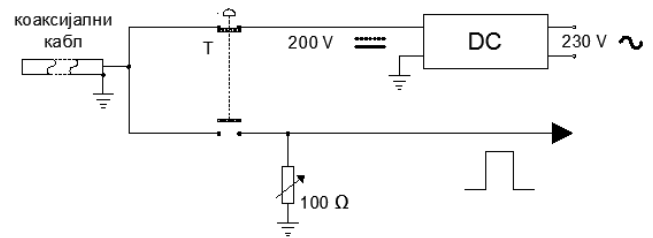
IV. ГЕНЕРИСАЊЕ ПРАВОУГАОНИХ ИМПУЛСА

За испитивање одзива дјелила напона потребно је генерисати правоугаоне импулсе са амплитудом реда неколико kV. Због постојања паразитних капацитета и индуктивности таласни облик напона на улазу и на излазу дјелила напона се разликује. Подешавањем димензија и конструкције дјелила напона, међусобног положаја отпорника унутра дјелила, постављањем прстена за расподјелу потенцијала и постављањем одговарајућих кола за филтрирање потребно је осигурати да напон на нисконапонској страни дјелила напона што боље прати облик напона који је доведен на улаз дјелила напона.

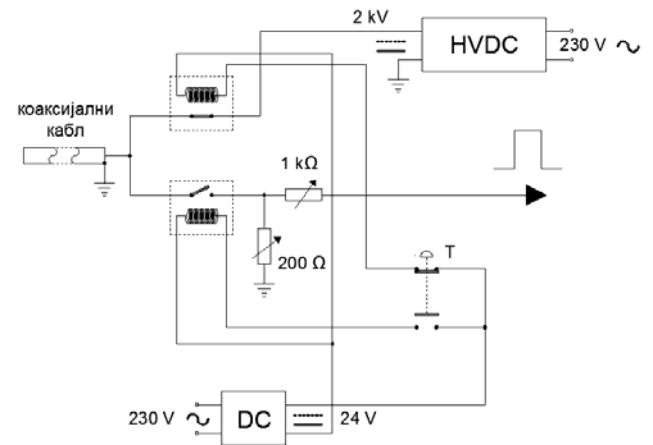
Шема кабловског генератора правоугаоних импулса приказана је на слици 4. Идеја је да се унутрашња жила коаксијалног кабла доводи на повишен потенцијал у односу на плашт кабла који је уземљен. Након тога коаксијални кабл се празни кроз дјелило напона,

генеришући правоугаони импулс који се простире кроз дјелило. При томе коаксијални кабл мора бити затворен карактеристичном импедансом како би се спријечила појава вишеструких рефлексија која деформише улазни правоугаони импулс.

Уређај за добијање правоугаоних импулса ниског напона



Уређај за добијање правоугаоних импулса високог напона

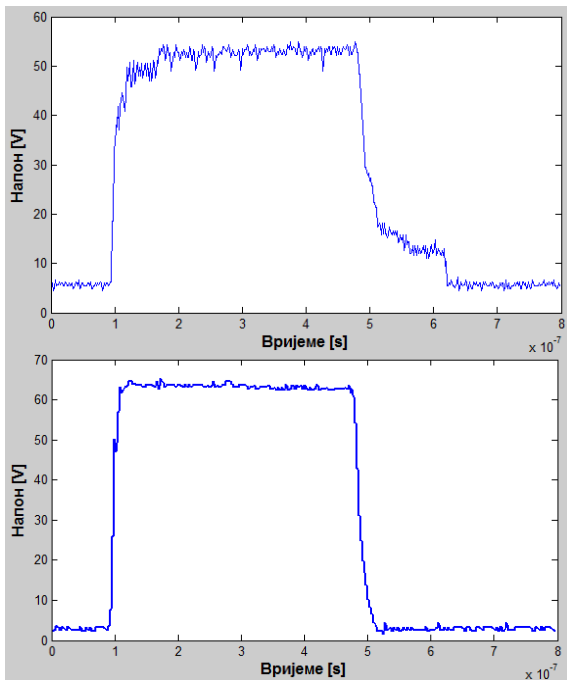


Слика 4. Шема уређаја за добијање правоугаоних импулса за испитивање одзива дјелила напона

Пошто тачна вриједност карактеристичне импедансе коаксијалног кабла није позната (најчешће има вриједност између 50 и 80 Ω) потребно је користити потенциометар који ће се везати између унутрашње и спољашње жиле коаксијалног кабла. Подешавањем вриједности отпорности потенциометра могуће је спријечити појаву рефлексија.

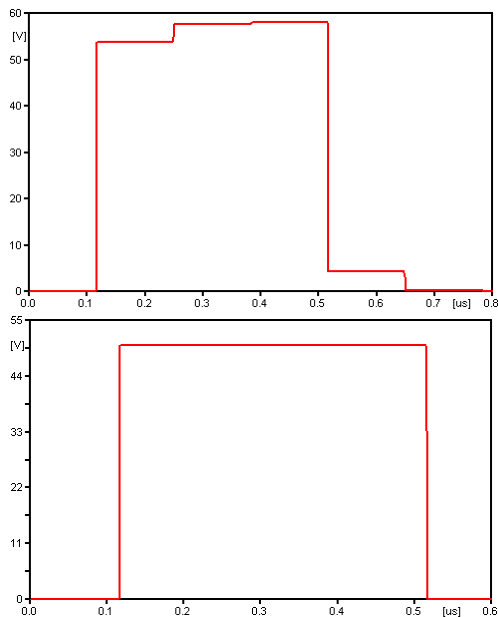
Експериментални резултати утицаја вриједности отпорности потенциометра на облик пренапона приказан је на слици 5.

На слици 6. приказани су резултати симулације урађени у програмском пакету EMTP-ATP (The Electromagnetic Transients Program - The Alternative Transients Program) [2] који симулирају експериментално добијене резултате приказане на слици 5. У случају када се талас прелама са мање на већу вриједност карактеристичне импедансе на зачељу таласа се добија рефлексија у позитивну страну и долази до повећања максималне вриједности напона, као што је приказано на сликама 5. и 6. Ако се талас прелама са веће на мању вриједност карактеристичне импедансе рефлексија ће бити у негативну страну и амплитуда напона ће се смањити.



Слика 5. Таласни облик напона на излазу из уређаја за добијање правоугаоних импулса када коаксијални кабл није (горе), јесте (доле) затворен карактеристичном импедансом

Приликом рада са високим напонима није могуће користити обични тастер за ниски напон јер долази до искрења између контаката тастера прије него што се контакти споје.

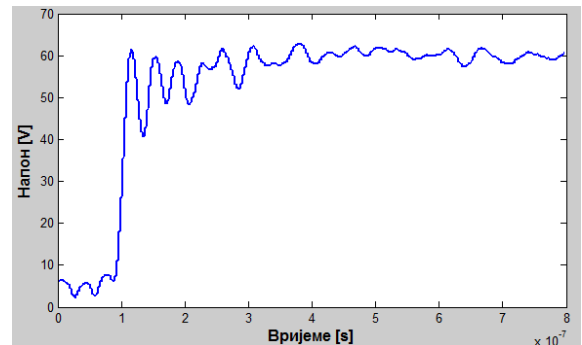


Слика 6. Симулација таласног облика напона на излазу из уређаја за добијање правоугаоних импулса када коаксијални кабл није(горе), јесте (доле) затворен карактеристичном импедансом

Такође, употреба тастера који је конструисан за ниски напон при раду са високим напонима није сигурна за особље и мора се избјећи јер је изолација нисконапонске опреме испитана напонам до 1 kV. Када се ради са вишим

напонима могу да се користе мали вакуумски прекидачи. У овом случају додат је још један промјењљиви отпорник отпорности 1000 Ω којим се пригушују осцилације на правоугаоном импулсу. Осцилације се јављају услед паразитних капацитета и подужних индуктивитета проводника. Веома је битно да се при повезивању елемената проводницима који нису коаксијални каблови све петље смање на најмање могуће димензије. Свака петља садржи индуктивност која производи осцилације јер се у RC колу осцилације не могу јавити.

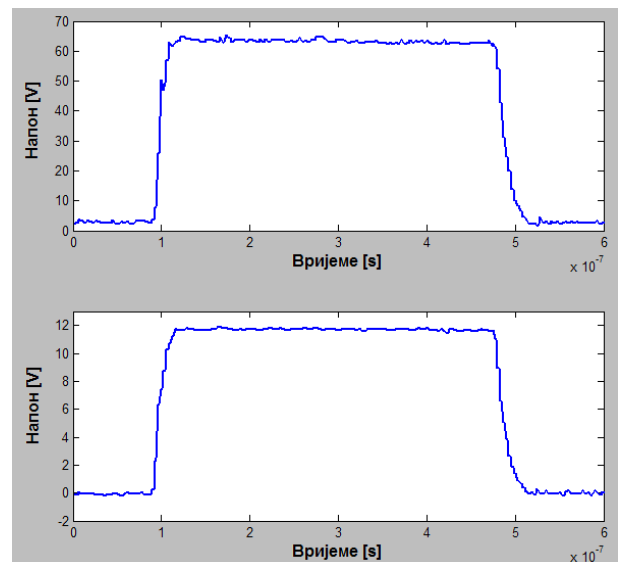
У случају када се направе велике петље унутар круга у коме се генеришу правоугаони импулси индуктивност кола знатно расте и јављају се осцилације напона које су приказане на слици 7.



Слика 7. Експериментално добијене осцилације на челу правоугаоног таласа услед повећане индуктивности у колу за генерисање правоугаоних импулса

V. ИСПИТИВАЊЕ ОДЗИВА ОМСКОГ ДЈЕЛИЛА НАПОНА

Применом безиндуктивних отпорника за израду дјелила напона добијен је добар одзив дјелила који је приказан на слици 8. Примјећује се практично идеално слагање улазног напонског сигнала и сигнала који се добија на ниженапонској страни дјелила напона.



Слика 8. Одзив омског дјелила напона у случају примјене безиндуктивних отпорника за израду дјелила напона

На слици 9. приказани су безиндуктивни отпорници примјеном којих је добијен одговарајући одзив дјелила напона приказан на слици 8.

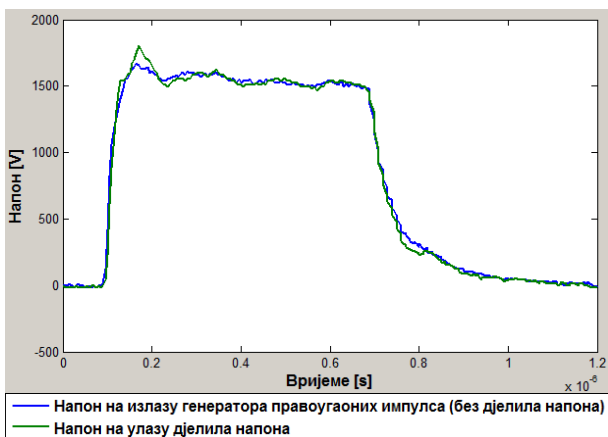


Слика 9. Безиндуктивни отпорници за ниски напон (лијево) и високи напон (десно) примјеном којих се добије добар одзив дјелила напона

Отпорнике велике отпорности не треба користити за израду омског дјелила напона за високе учестаности јер се у том случају сигнал затвара капацитивно према нисконапонском крају дјелила напона који се у овом случају понашао као антена.

За израду високонапонског дјелила напона изабран је отпорник произвођача Carborundum Co отпорности $3900 \Omega \pm 20\%$ који је приказан на слици 9. Ово су безиндуктивни отпорници који се добијају посебним технолошким процесима.

На слици 10. приказан је правоугаони импулс високог напона на излазу из генератора правоугаоних таласа у случају када је дјелило напона прикључено и када није прикључено на генератор импулса са слике 4. У случају када се дјелило напона прикључи на уређај појављује се већа осцилација на челу таласа јер дјелило напона уноси паразитну индуктивност у електрични круг на који је везан уређај услед чега долази до појаве осцилације на челу таласа.

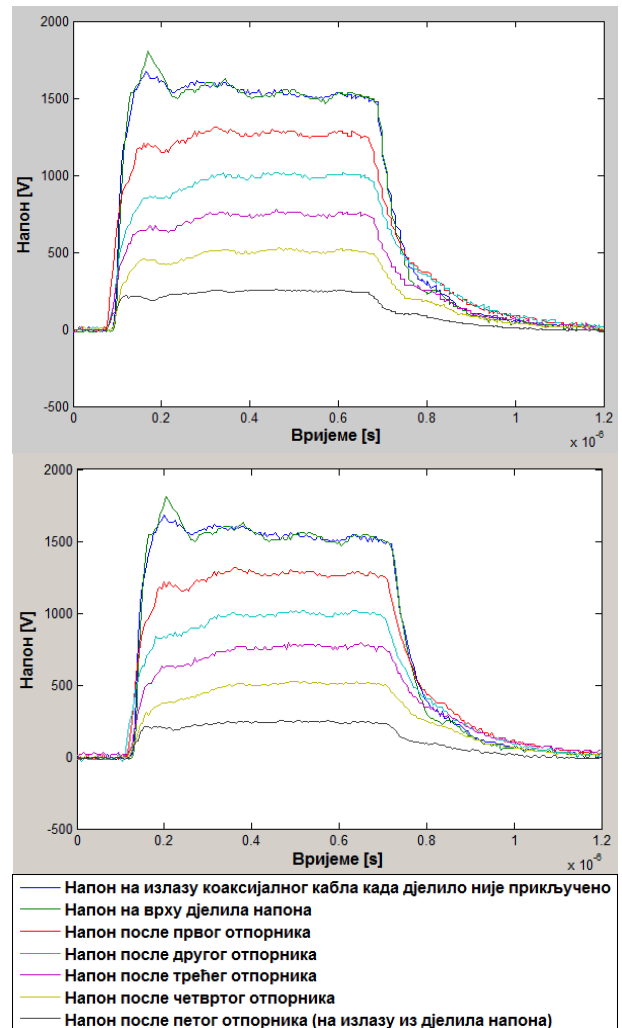


Слика 10. Правоугаони импулс на излазу уређаја за њихово генерисање у случају када дјелило напона није и када оно јесте прикључено на излаз уређаја

На слици 11. приказани су таласни облици пренапона након сваког отпорника, као и правоугаони импулс са и без дјелила напона. Експеримент је рађен за случај када је доводни кабл правоугаоног импулса одмакнут и примакнут дјелилу напона, као што је приказано на слици 12.

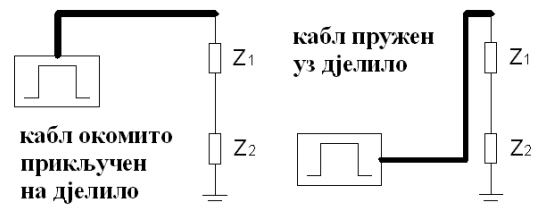
Велики проблем код примјене и реализације дјелила напона се јавља услед интерференције између високонапонског и нисконапонског краја дјелила.

Индукване сметње имају амплитуду која је реда величине мјереног сигнала и оне се морају елиминисати како би се могла постићи одговарајућа тачност мјерења.



Слика 11. Смањење амплитуде правоугаоног импулса на појединим степенима дјелила напона када је кабл који доводи импулс окомит на дјелило напона (горе) и када је пружен уз дјелило напона (доле)

У случају када се кабл пружи уз дјелило напона мијења се вриједност паразитних капацитета појединих чланака унутар дјелила напона тако да се могу примијетити мале промјене на одзиву дјелила напона. Оне се најбоље могу уочити на таласном облику напона на трећем и четвртом чланку. У овом случају утицај није тако изражен, али је током експерименталних мјерења уочен велики утицај околних објеката на одзив дјелила напона.



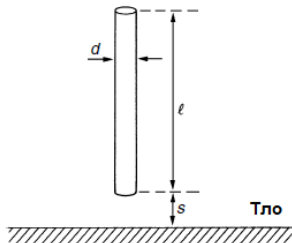
Слика 12. Положај доводног кабла правоугаоног импулса код испитивања одзива дјелила напона

VI. СИМУЛАЦИЈЕ

Симулације рада дјелила напона урађене су у програмском пакету ЕМТР-АТР. Циљ симулације је да се одреде вриједности паразитних параметара L , C и C_z на основу којих могу да се добију одзиви дјелила напона слични мјереним. Отпорност отпорника који су се користили за израду дјелила напона је била 3900Ω тако да се ова вриједност узима као познат параметар. У [4] је дата формула којом се на једноставан начин, у зависности од димензија дјелила напона, може израчунати његова доземна капацитивност. При томе се дјелило напона посматра као цилиндрично тијело које је постављено вертикално изнад површине тла.

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{1.15l}{d}} \quad (1)$$

гдје су: ϵ - диелектрична пермеабилност средине,
 l - висина дјелила напона [m],
 s - висина дјелила напона изнад тла [m],
 d - пречник дјелила напона [m].



Слика 13. Посматрање дјелила напона као цилиндричног проводника изнад тла

Све величине из формуле (1) графички су приказане на слици 13. Формула (1) се користи у случају када је $s \ll d$ што је код свих дјелила напона за више називне напоне испуњено.

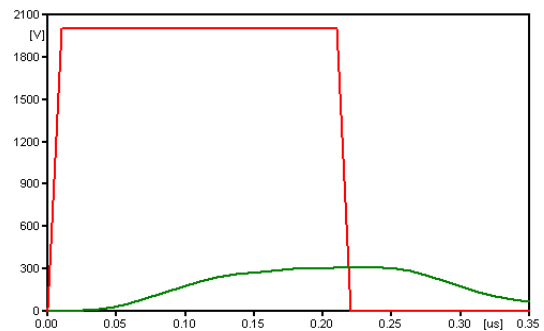
У [4,5] је показано да се примјеном тачнијих израза за прорачун доземних капацитета дјелила напона у односу на израз (1) добијају практично исте вриједности. У [3] је показано да вриједност доземних капацитета дјелила напона износи од 10 до 15 pF/m. Према [7] доземни капацитет дјелила напона износи 5 pF/ft односно 16.4 pF/m. Капацитет појединих отпорника према [3] износи 1 pF. У [6] је рађен детаљан прорачун паразитних параметара омског дјелила напона велике отпорности које се користи за мјерење једносмјерних напона. Сопствене капацитивности појединих отпорника нису константан параметар, него се мијењају од отпорника до отпорника. Средња вриједност сопствених капацитета појединих отпорника је према [6] једнака 0.96 pF (креће се од 0.9996 pF за тридесети отпорник до 0.8692 pF за четрдесети отпорник) што значи да се може усвојити вриједност од 1 pF. Подужна индуктивност појединих отпорника унутар омског дјелила напона према [3] може се рачунати као $L=10^{-8} \times R$ [H]. У [7] је усвојено да подужна индуктивност отпорника износи 5 $\mu\text{H}/\text{ft}$ односно 16.4 $\mu\text{H}/\text{m}$.

На основу претходно реченог параметри еквивалентне замјенске шеме отпорника са слике 3. имају сљедеће вриједности:

$$R=3900 \Omega, L=10^{-8} \times R \approx 40 \mu\text{H}, C=1 \text{ pF},$$

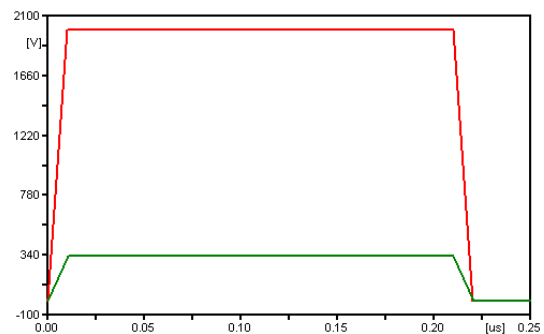
$$C_z=15 \text{ pF}/\text{m} \times 0.3 \text{ m}=4.5 \text{ pF}$$

Одзив модела дјелила напона са слике 3. са претходно наведеним вриједностима параметара приказан је на слици 14. Одзив дјелила напона не одговара експериментално добијеним графицима са слике 11. Добијен је одзив какав се добија у случају када је паразитна индуктивност отпорника велика. Када се занемаре сви паразитни капацитети и у случају када се у обзир узму само подужни паразитни капацитети појединих отпорника добија се одзив дјелила напона који је приказан на слици 15.



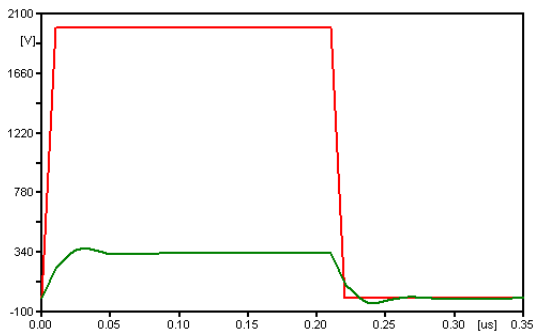
Слика 14. Одзив дјелила напона са претходно наведеним вриједностима параметара појединих елемената

Подужни паразитни капацитети унутар дјелила напона имају занемарив утицај на резултате симулација.



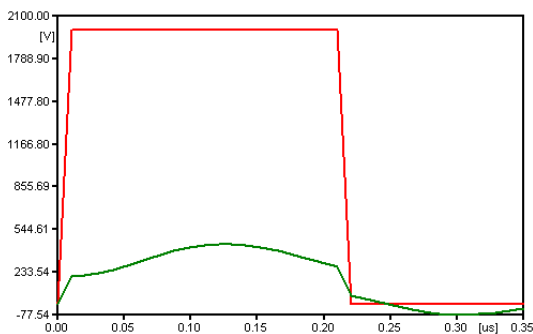
Слика 15. Одзив дјелила напона са када се занемаре паразитни доземни капацитети појединих отпорника без обзира да ли су подужни капацитети отпорника узети у обзир или не

На слици 16. приказан је одзив дјелила у случају када је доземни капацитет отпорника једнак 0.1 pF што је знатно мање од прорачунатих 4.5 pF. Овај одзив дјелила је доста добар и приближан реалном.



Слика 16. Одзив дјелила напона са када паразитни доземни капацитети појединих отпорника износе 0.1 pF

Повећање индуктивности отпорника унутар дјелила напона не даје очекиване резултате. На слици 17. приказан је одзив дјелила напона код кога доземни паразитни капацитети износе 0.1 pF, а подужна индуктивност сваког отпорника 1 mH. Утицај паразитних доземних капацитета на одзив дјелила напона према резултатима симулација је много израженији него утицај подужних паразитних индуктивитета, што у реалности није случај.



Слика 17. Одзив дјелила напона када паразитни доземни капацитети појединих отпорника износе 0.1 pF а подужне индуктивности 1 mH

ЗАКЉУЧАК

Одзив дјелила напона, моделован преко елемената са концентрисаним параметрима, не даје одговарајућа слагања са експериментално добијеним резултатима. У будућем раду потребно је рачунати одзив дјелила напона преко елемената са расподјељеним параметрима како би се утврдило да ли се добијају боља слагања мјерених и рачунаних резултата. У том случају проблем представља одређивање карактеристичних импеданси елемената. Одзив дјелила напона могуће је моделовати и примјеном Лапласове трансформације и Фуријеове анализе [3], или примјеном специјализованих софтвера базираних на прорачунима електромагнетних поља, како би се одредио оптималан начин прорачуна одзива дјелила напона.

ДОДАТАК

Опрема која је кориштена за мјерење:

- 1) мјерења на ниском напону
осцилоскоп Hantek DSO-5200A USB, 200 MHz, 250 MS/s.
сонда Tektronix P5122, 100X, 200 MHz.
- 2) мјерења на високом напону
осцилоскоп Tektronix TDS 320, 100MHz, 500 MS/s.
сонда Tektronix P6015, 1000X, 75 MHz.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад настао је у оквиру пројекта „Развој и израда ударних напонских генератора“ кога спонзоришу Друштво за производњу и инжењеринг «ЕЛБИ» из Ваљева и Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. Schnell (Editor): Technology of Electrical Measurements, John Wiley and Sons Ltd. Chichester, 1993.
- [2] Canadian-American EMTP User Group: ATP Rule Book, distributed by the European EMTP-ATP Users Group Association, 2011,
- [3] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel: High Voltage Engineering - Fundamentals, Second Edition 2000, published by Butterworth-Heinemann.
- [4] W. Zaengl. Arch. Techn. Messen (ATM), Blatt Z 130-3, 1969.
- [5] H. Luehrmann: ETZ-A Vol. 91, pp. 332-335, 1971.
- [6] Jinliang He, Shanqiang Gu, Shejiao Han, Shuiming Chen, Guozheng Xu, "Voltage Distribution Analysis of 500-kV DC Transmission-Line Voltage Divider Under Impulse Voltages: Stray Parameter Extraction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, NO. 2, April 2006.
- [7] S. B. Griscom, B. L. Lloyd, A. R. Hileman "Voltage Divider for Measuring Impulse Voltages on Transmission Lines", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Part III, Vol. 73, Issue 1, Page(s) 229-237, January 1954.

ABSTRACT

In this paper the step response of resistive voltage divider is analyzed. High frequency model of resistive voltage divider based on lumped parameters is given. Calculation results does not fully agree with experimentally obtained results. Elements with lumped parameters should be used for accurate modeling of step response of resistive voltage divider. Electrical circuits for step voltage generation are given. Examples of voltage divider step response with influence of different parameters are given to.

STEP RESPONSE ANALYSIS OF RESISTIVE VOLTAGE DIVIDER

Mladen Banjanin, Milan Savić, Ratko Kovačić