



**Универзитет “Св. Кирил и Методиј” - Скопје**  
**Факултет за електротехника и информациски технологии**



# **Транзиентни карактеристики на заземјувачи**

М-р Благоја Марковски

Скопје, 2016 година

## Вовед

- Ударот на гром во заземјена структура го подига потенцијалот на земја во нејзина околина што може да резултира со опасни напони на чекор и допир, или опасни напони помеѓу различни делови во системот.
- Улогата на заземјувачот како дел од системот за громобранска заштита е да ја спроведе струјата на гром во земја, а притоа да ја осигури безбедноста на луѓето и да ја заштити електричната опрема од оштетување
- Перформансите на заземјувачот во голема мера зависат од брановиот облик на струјата на гром, од карактеристиките на земјата во која е поставен заземјувачот и од неговата изведба
- При удар на гром во заземјена структура, можно е иницирање на два физички процеси со меѓусебно спротивни ефекти врз динамичките перформанси на заземјувачот
  - индуктивниот карактер на транзиентната импеданса
  - ефектот на јонизација на земја



## Релевантни стандарди за анализа и изведба на систем за громобранска заштита

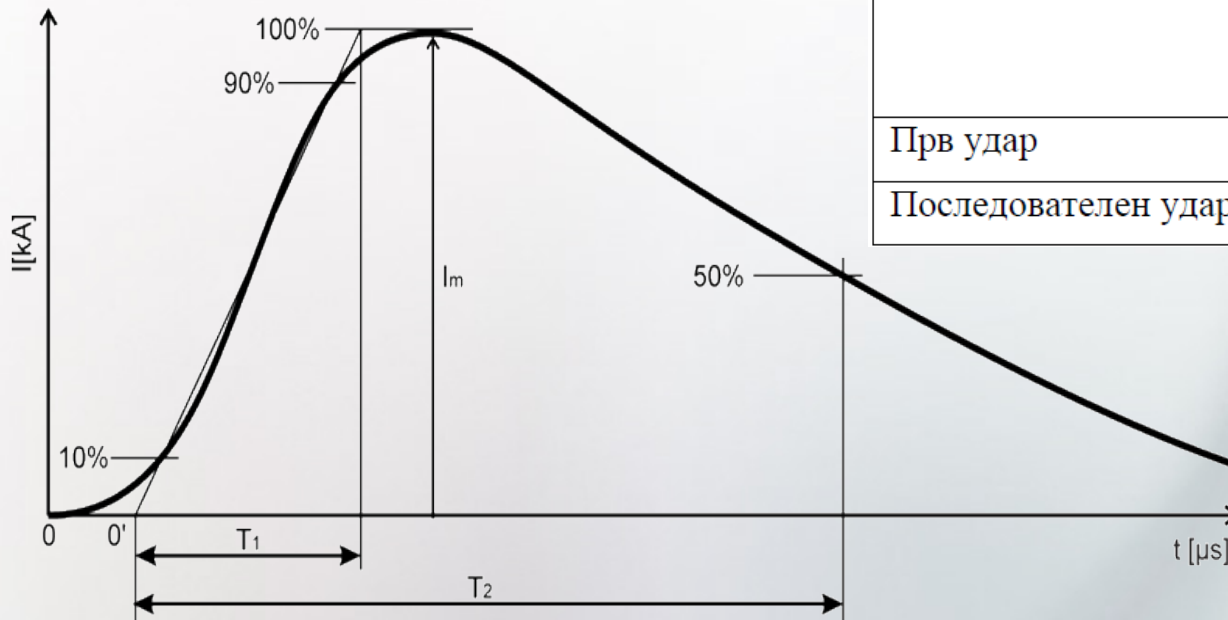
- IEC 62305-1:2010, *Protection Against Lightning – Part I: General Principles*
- IEC 62305-2:2010, *Protection Against Lightning – Part II: Risk Management*
- IEC 62305-3:2010, *Protection Against Lightning – Part III: Physical Damage to Structures and Life Hazard*
- IEC 62305-4:2010, *Protection Against Lightning – Part IV: Electrical and Electronic Systems*
  
- IEC 61400-24:2010, *Wind Turbine Generator Systems - Part 24: Lightning Protection Within Structures.*
  
- IEEE Std. 80-2000, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*
  
- IEC TR 60479-4:2004, *Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 4: Effects of Lightning Strokes*
  
- ANSI/IEEE Std. 81-1983, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*

# Карактеристики на атмосферски празнења

- Поделба на на електрични празнења зависно од иницијаторот:
  - Надолни (доколку се иницирани од облак спрема земја)
  - Нагорни (доколку се иницирани од земја спрема облак)
- Поделба на на електрични празнења зависно од поларитет на пренесен полнеж:
  - Негативни (облакот е негативно наелектризиран, електроните се пренесуваат од облак кон земја)
  - Позитивни (облакот е позитивно наелектризиран, електроните се пренесуваат од земја кон облак)
- Статистика
  - нагорните празнења најчесто се иницирани од објекти со висина над 100 m
  - 90% од надолните атмосферски празнења се негативни,
  - кај негативните празнења карактеристична е поголема стрмнина на струјниот импулс
  - надолните негативни празнења се состојат од прв удар, 2-3 последователни удари

## Стандардизирани карактеристики на струја на гром

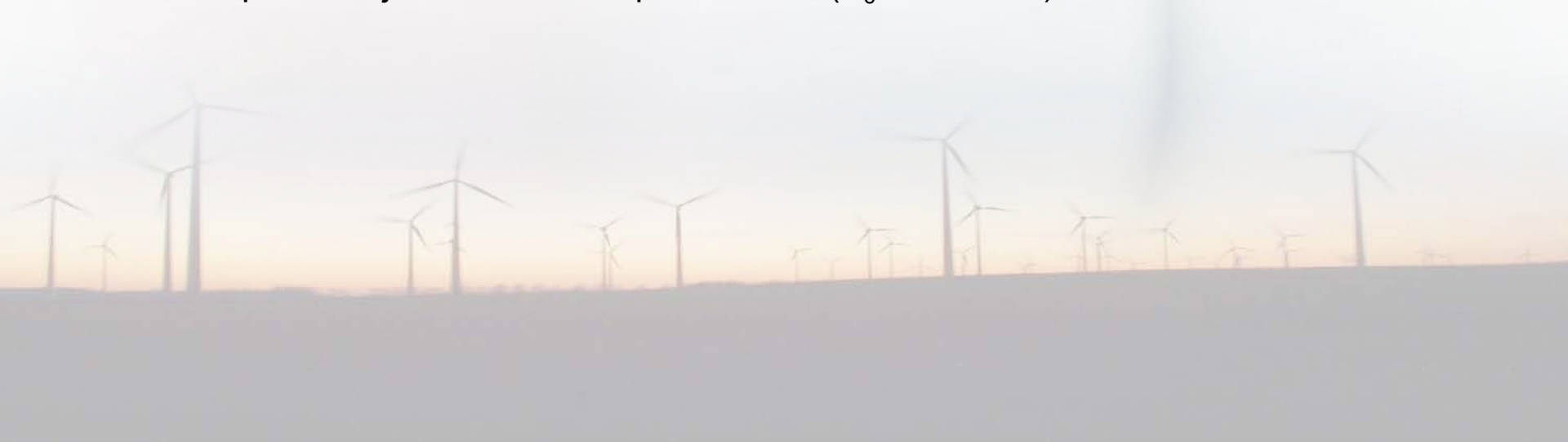
- Во стандардите се усвоени карактеристики базирани на измерени вредности на надолен удар на гром
- Брановиот облик на струја на гром кај транзиентни анализи најчесто се опишува со време на пораст  $T_1$ , време до 50% од максимална вредност  $T_2$  и максимална вредност  $I_m$



	$T_{\text{max}} / T_2$ [ $\mu\text{s}$ ]	$I_m$ [kA]
Прв удар	5 / 50	30
Последователен удар	0.5 / 50	12

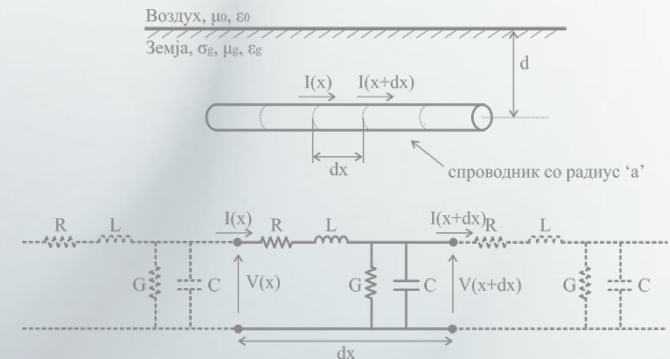
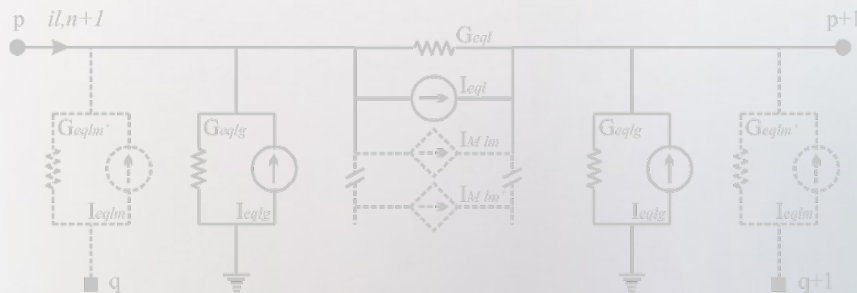
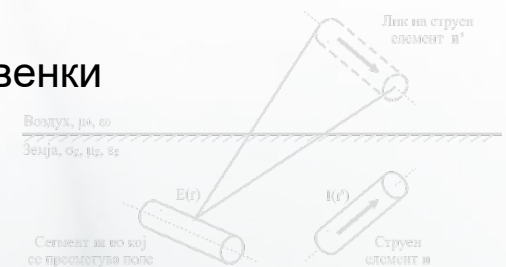
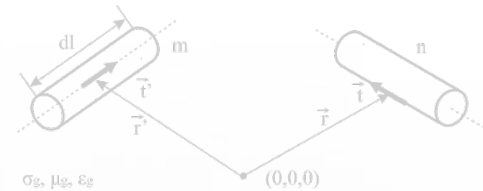
## Карактеристики на земја

- Земјата е апроксимирана како хомоген и спроводен полупростор, со временски непроменливи, линеарни и фреквентно независни карактеристики
- Карактеристики на земја
  - Специфична спроводност ( $0.1 \text{ S/m} - 0.0001 \text{ S/m}$ )
  - Магнетна мермеабилност ( $\mu \approx \mu_0$ )
  - Релативна пермитивност ( $\epsilon_r = 10$ )
  - Критична јачина на електрично поле ( $E_0 = 300 \text{ kV/m}$ )



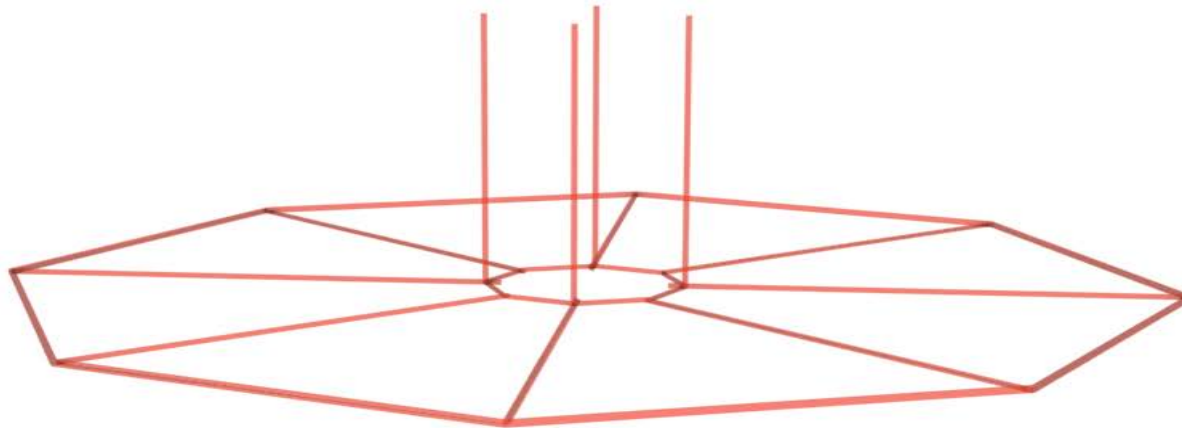
# Математички пристапи за транзиентни анализи на заземјувачи

- Базирани на теорија на електрични кола
- Базирани на теорија на преносни водови
  - дистрибуирани RLC параметри
  - изведување на лонгитудинална импеданса и трансверзална импеданса преку електромагнетни равенки
- Базирани на ригорозни електромагнетни равенки
  - метод на конечни елементи (FEM)
  - метод на конечни разлики во временски домен (FDTD)
  - моментни методи (MOM)



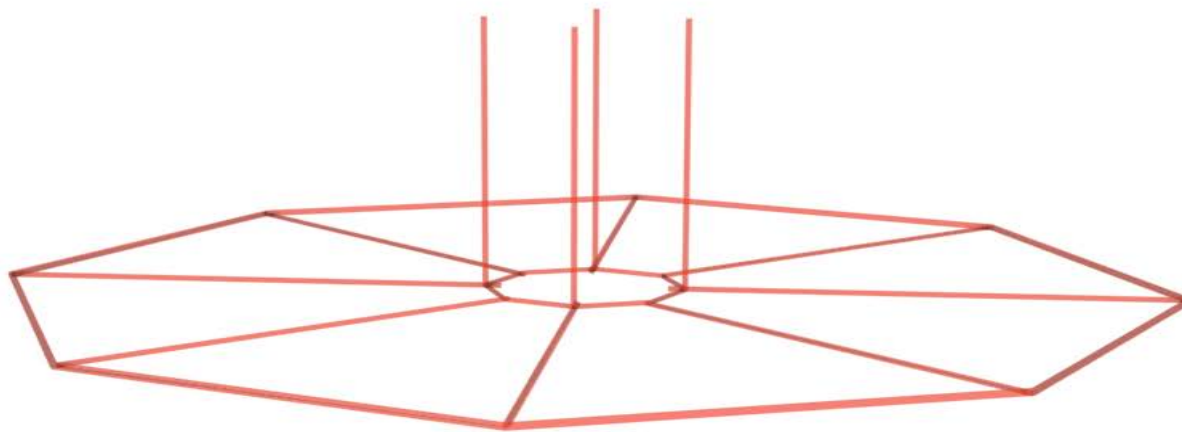
## Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор

- Најчесто применуван модел на заземјувач на ветрогенератор

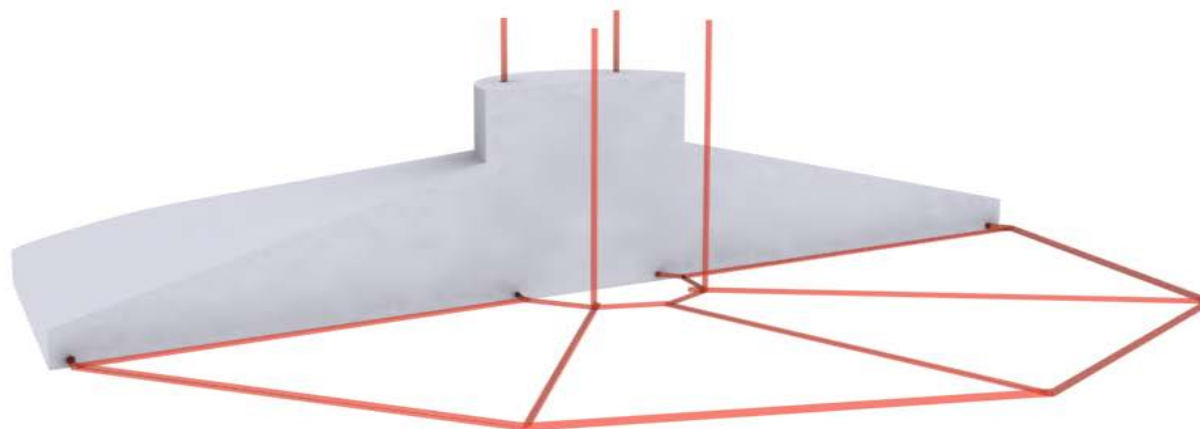




# Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор

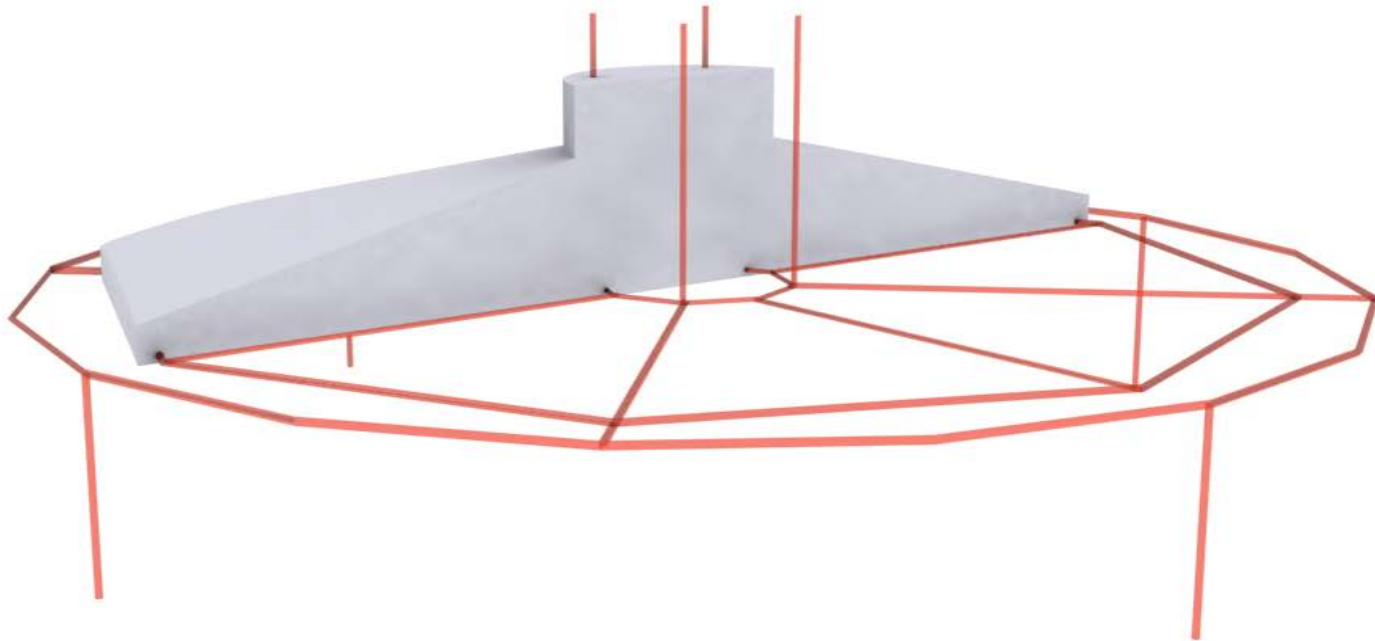


## Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор



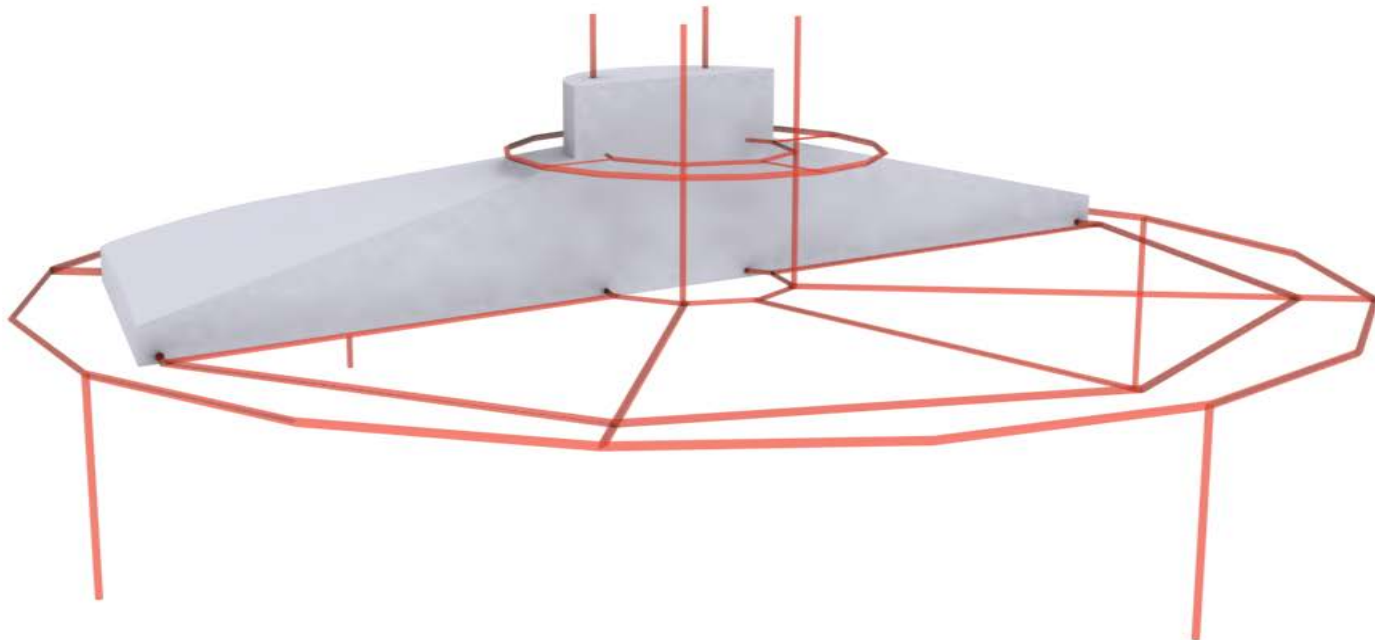
## Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор

- Вертикални електроди и заземјувачи во форма на прстен



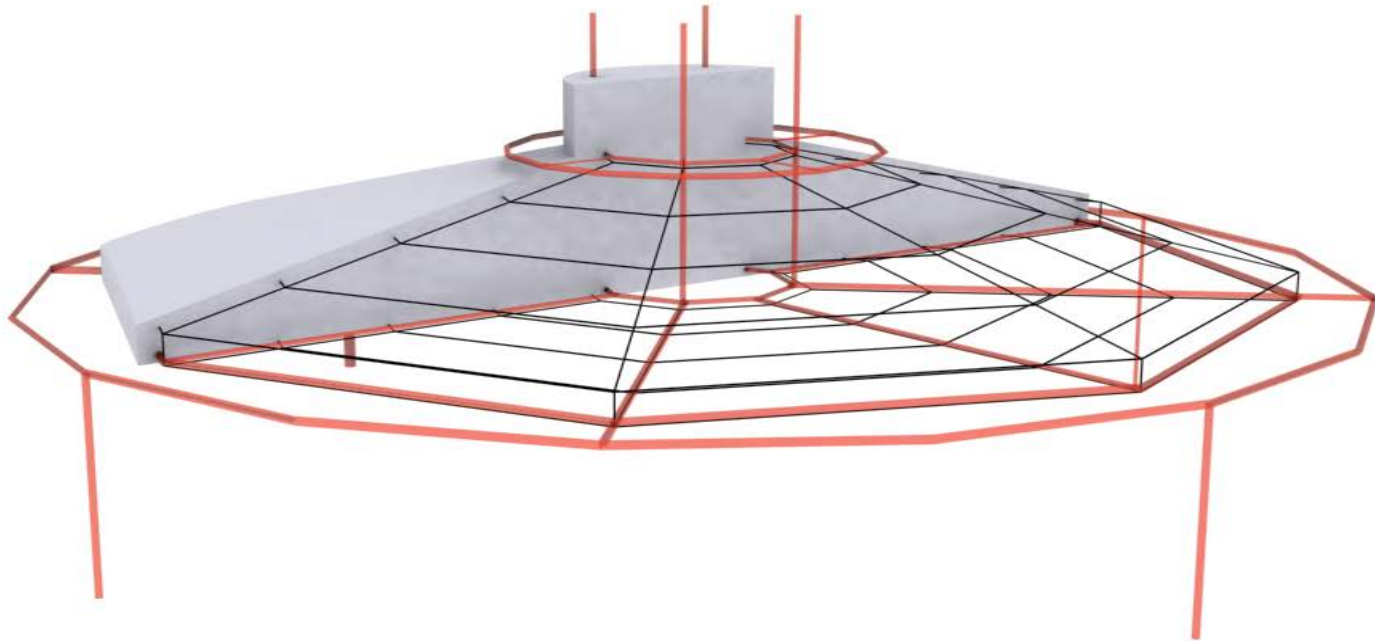
## Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор

- Вертикални електроди и заземјувачи во форма на прстен

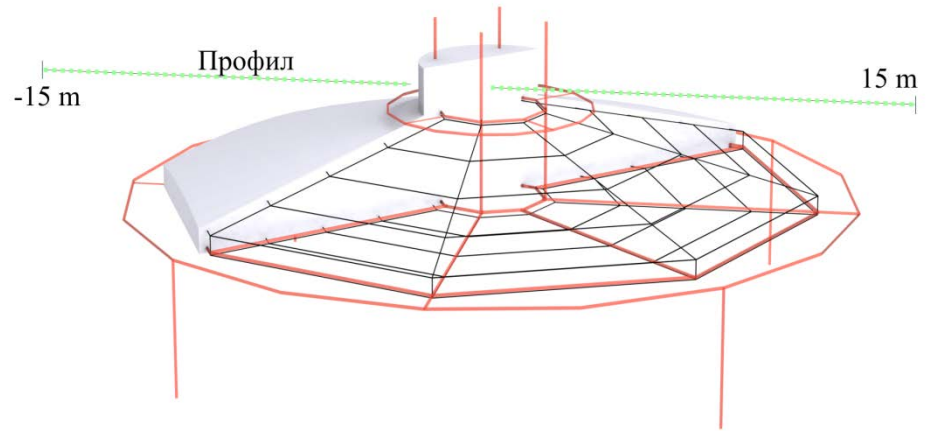


## Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор

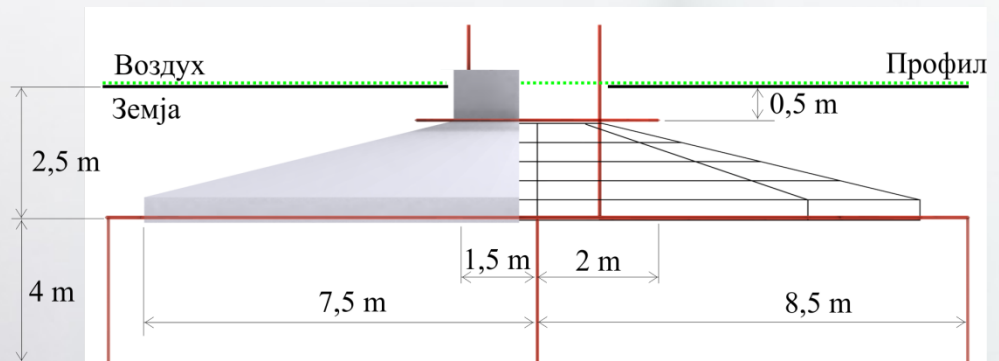
- Едновремена анализа на заземјувачки електроди (со црвена боја) и арматура на темелите(со црна боја)



# Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор

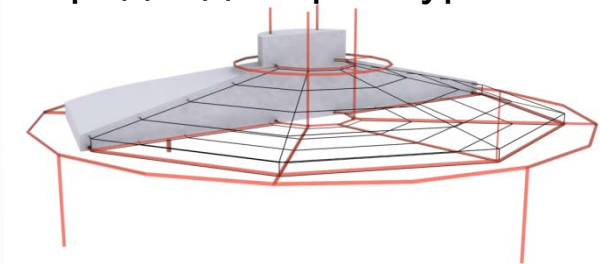


Модел на наменски заземјувачки систем (црвена боја) интегриран со челична арматура во темел (црна боја)

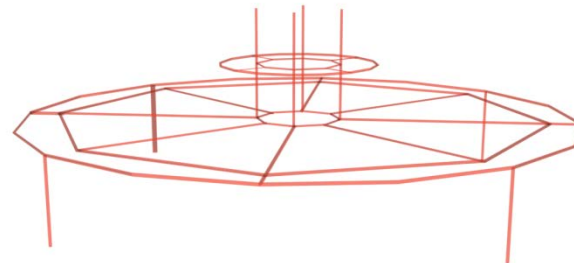


## Анализиран модел на заземјувач кај ветрогенератор

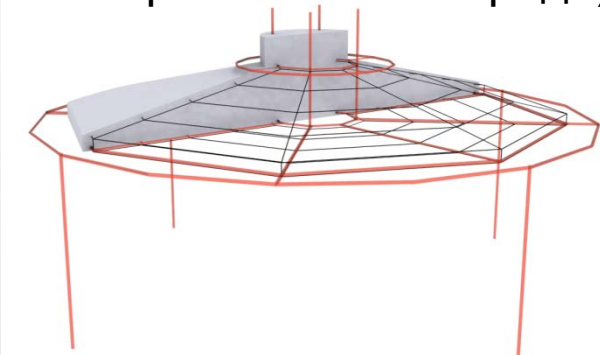
Интегриран модел на заземјувач  
(ја зема предвид и арматурата на темел)



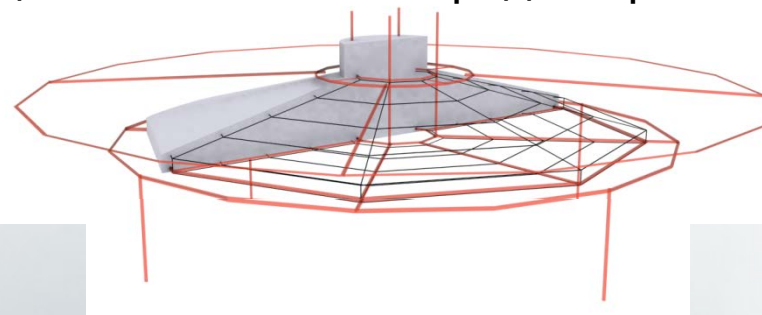
Едноствен модел  
(без арматура на темел)



Интегриран модел на заземјувач  
(со 30m вертикални електроди)



Интегриран модел на заземјувач  
(со дополнителна електрода - прстен )



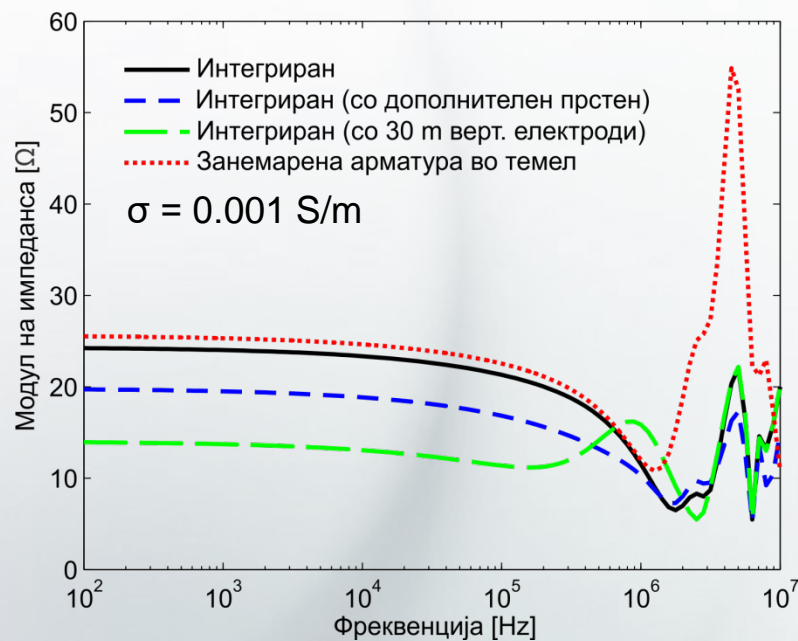
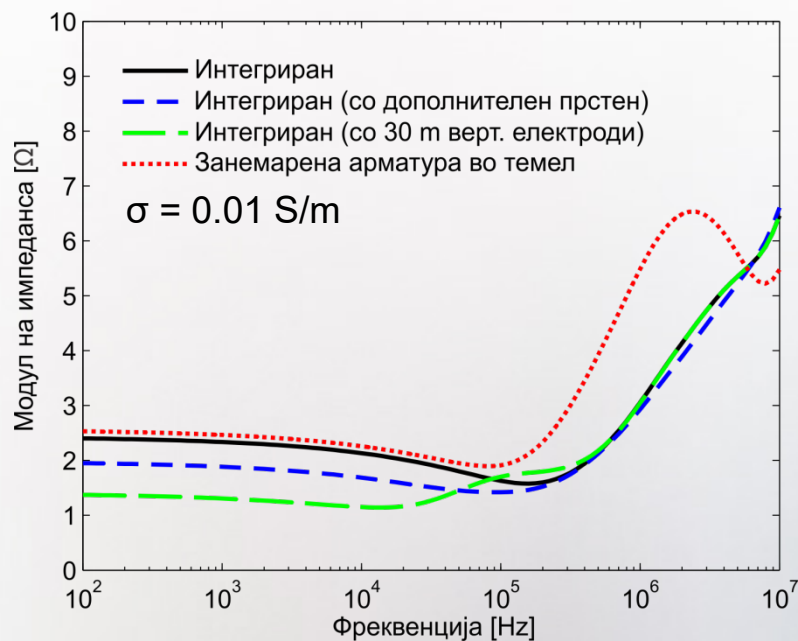


# Параметарски анализи во фреквентен домен

## Хармониска импеданса

- Хармониската импеданса не зависи од ексцитацијата туку единствено од геометријата и електромагнетните карактеристики на заземјувачот и средината во која што се наоѓа.

$$Z(j\omega) = V(j\omega)/I(j\omega)$$

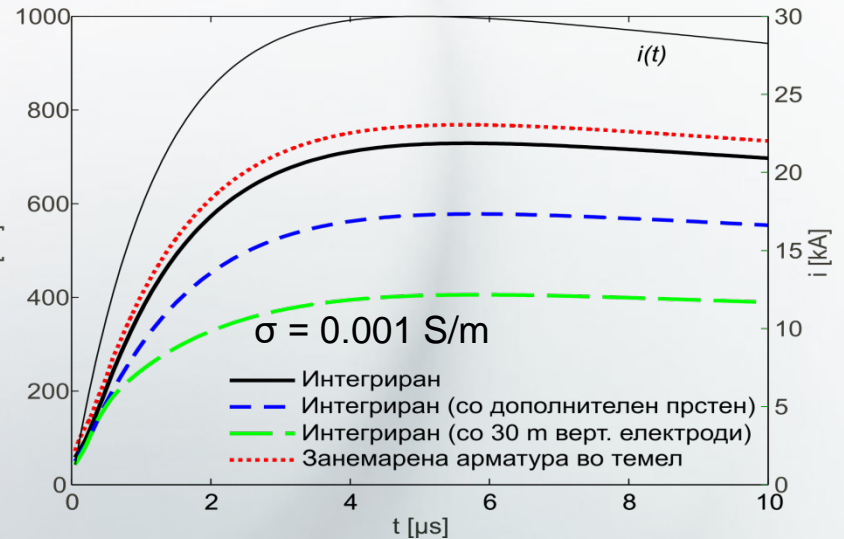
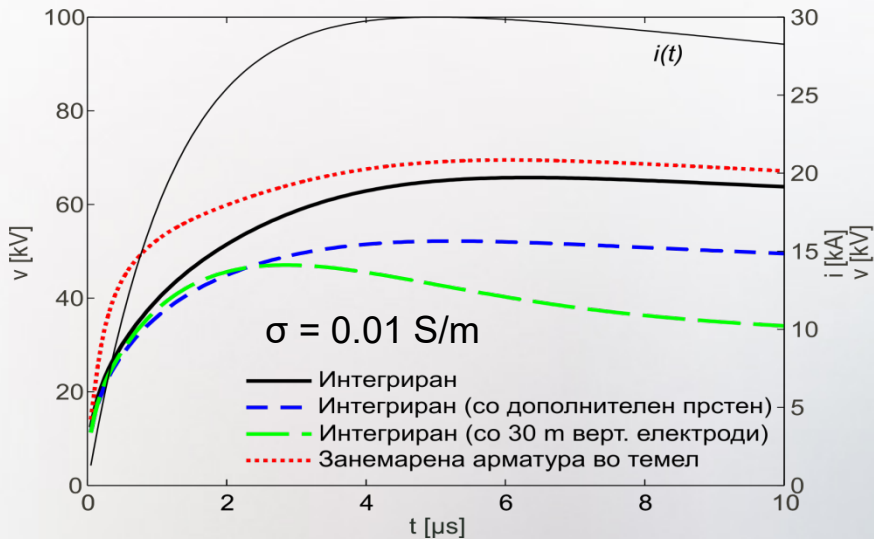




# Параметарски анализи во временски домен

## Транзиентен потенцијал при прв удар на гром

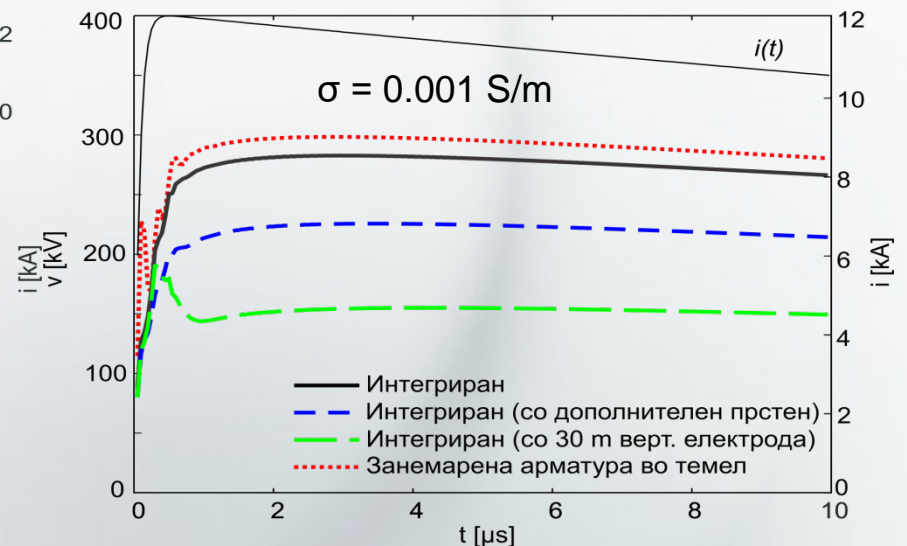
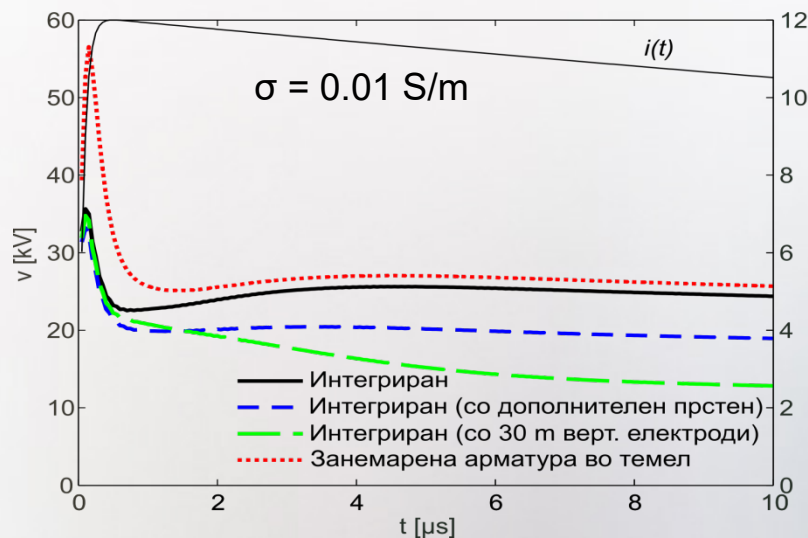
- Потенцијалот во точката на инјектирање приближно ја следи промената на струјниот импулс.
- Индуктивен карактер на импедансата се забележува само кај земја со поголема спроводност ( $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$ ) за конфигурација со долги вертикални електроди и за конзервативниот модел.



# Параметарски анализи во временски домен

## Транзиентен потенцијал при последователен удар на гром

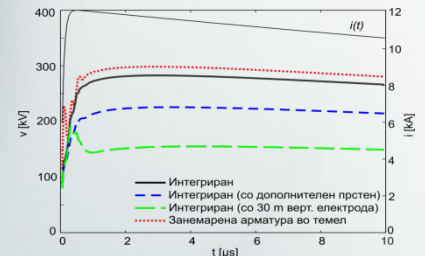
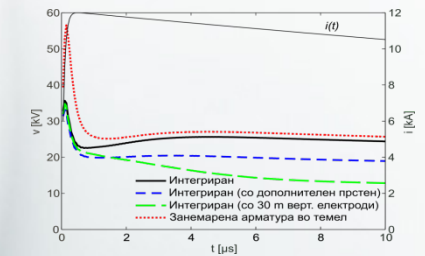
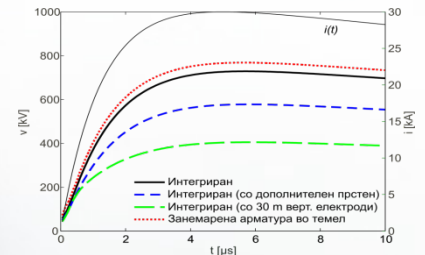
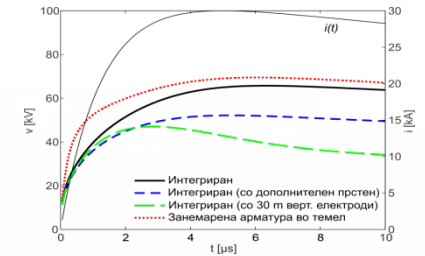
- Транзиентната импеданса за конзервативниот модел има изразен индуктивен карактер во иницијалниот период на последователен удар.
- Интеграцијата на заземјувачот со арматурата во темелот, значително го намалува транзиентниот пораст на потенцијал во иницијалниот период



# Параметарски анализи во временски домен

## Транзиентен потенцијал при прв и последователен удар на гром

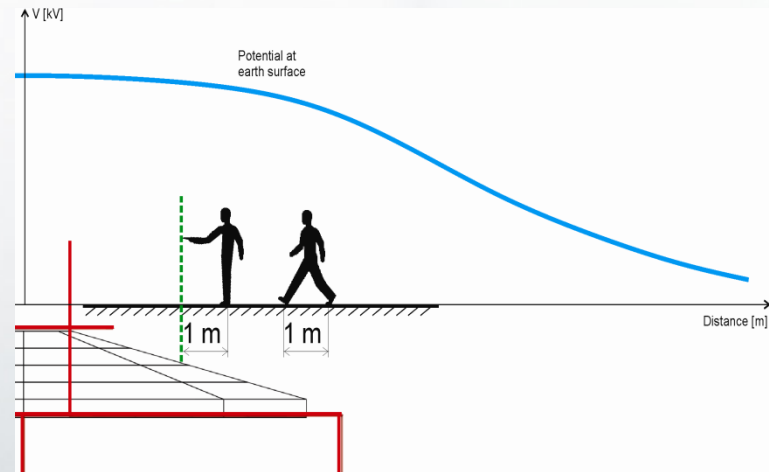
- Традиционалното занемарување на арматурата во темелот доведува до преценување на пресметаниот транзиентен потенцијал, во однос на неутрална земја.
- Долгите вертикални електроди значително ги подобруваат перформансите на системот во сите случаи, додека пак дополнителниот прстен има нешто помало, но сепак значајно влијание.
- За земја со поголема спроводност, потенцијалот на заземјувачот во иницијалниот период има поголема стрмнина и е многу поизразен од случај на земја со помала спроводност.



# Параметарски анализи во временски домен

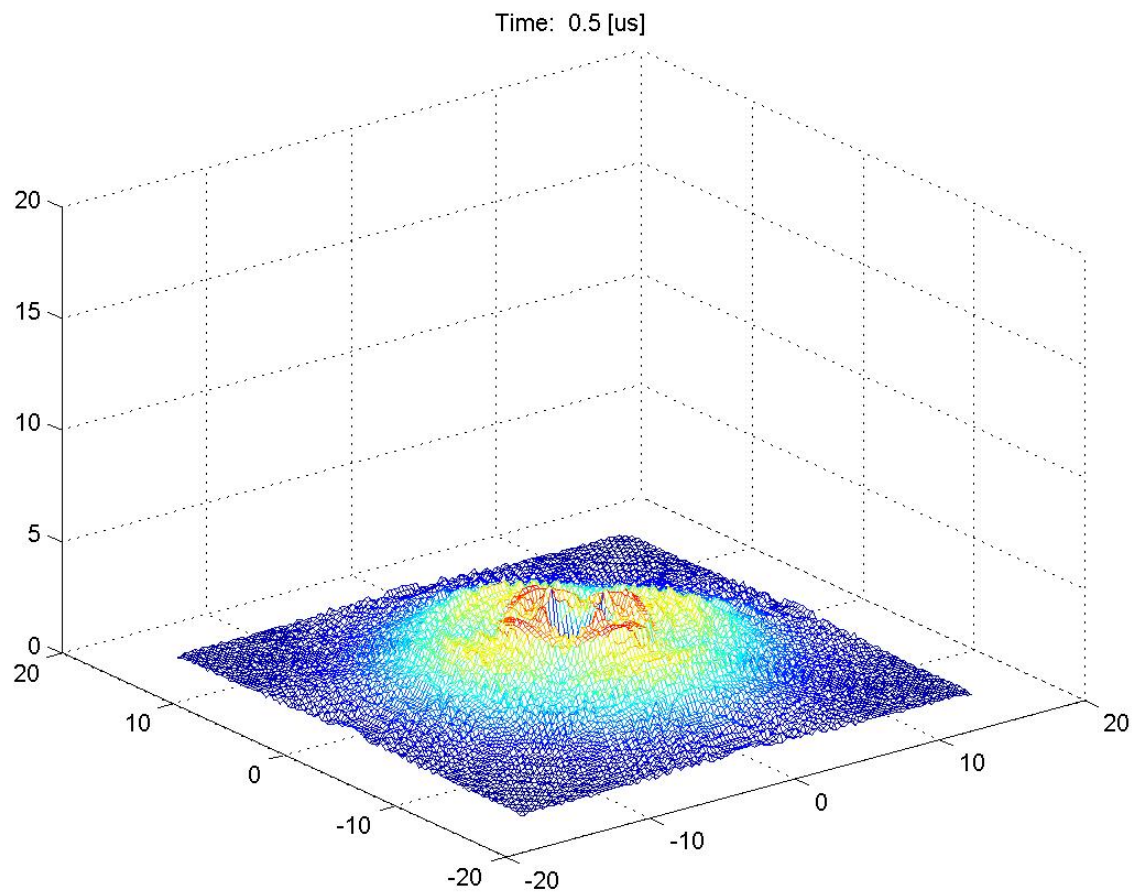
## Напони на чекор и допир

- Напонот на чекор е пресметан како разлика на потенцијали меѓу две точки на површина на земја, на растојание од 1 m.
- Напонот на допир е пресметан како разлика на потенцијали помеѓу точка на површината на земја и точка на електрода од заземјувачот кои се наоѓаат на хоризонтално растојание од 1 m
- Во двата случаи напоните се пресметани по линиски профил, земајќи ја предвид максималната потенцијална разлика меѓу две точки
- Применетата процедура може да се смета за конзервативна бидејќи го занемарува влијанието на телото на човекот



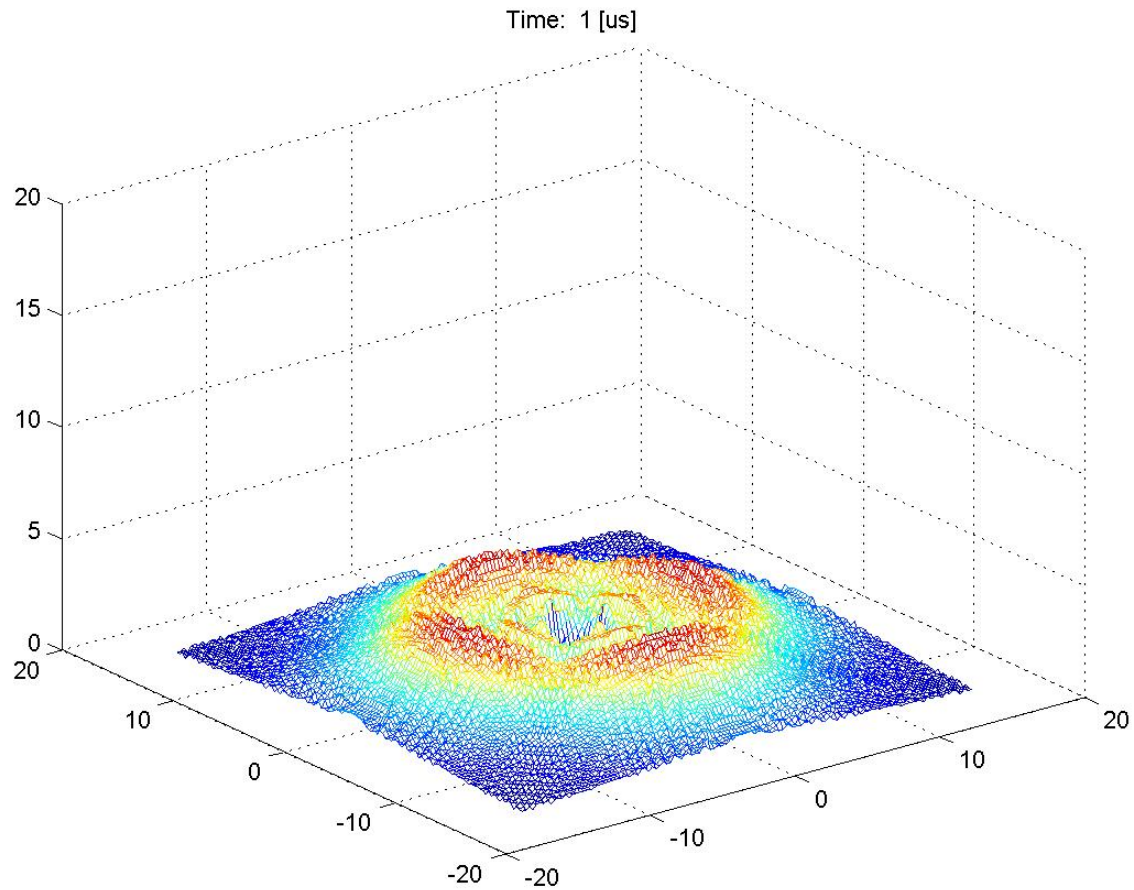
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



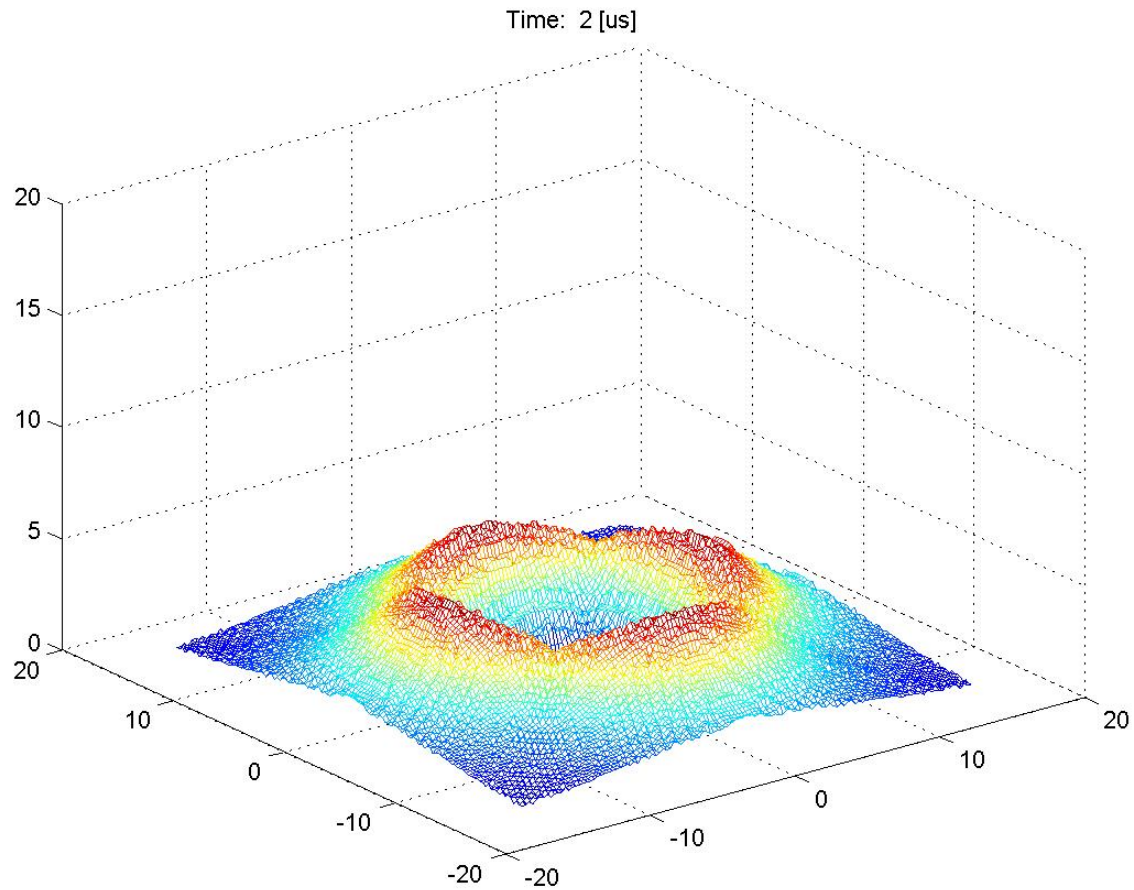
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



# Параметарски анализи во временски домен

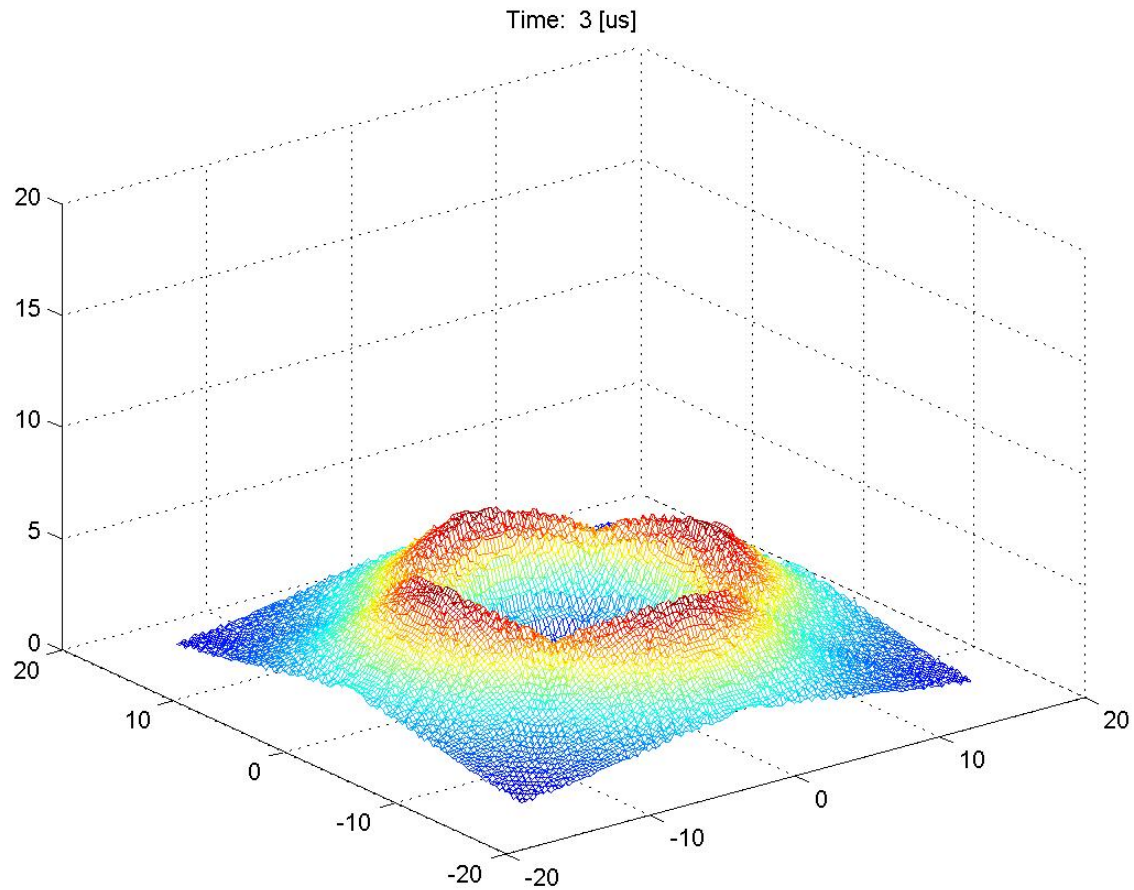
## временска и просторна распредеба на напон на чекор





# Параметарски анализи во временски домен

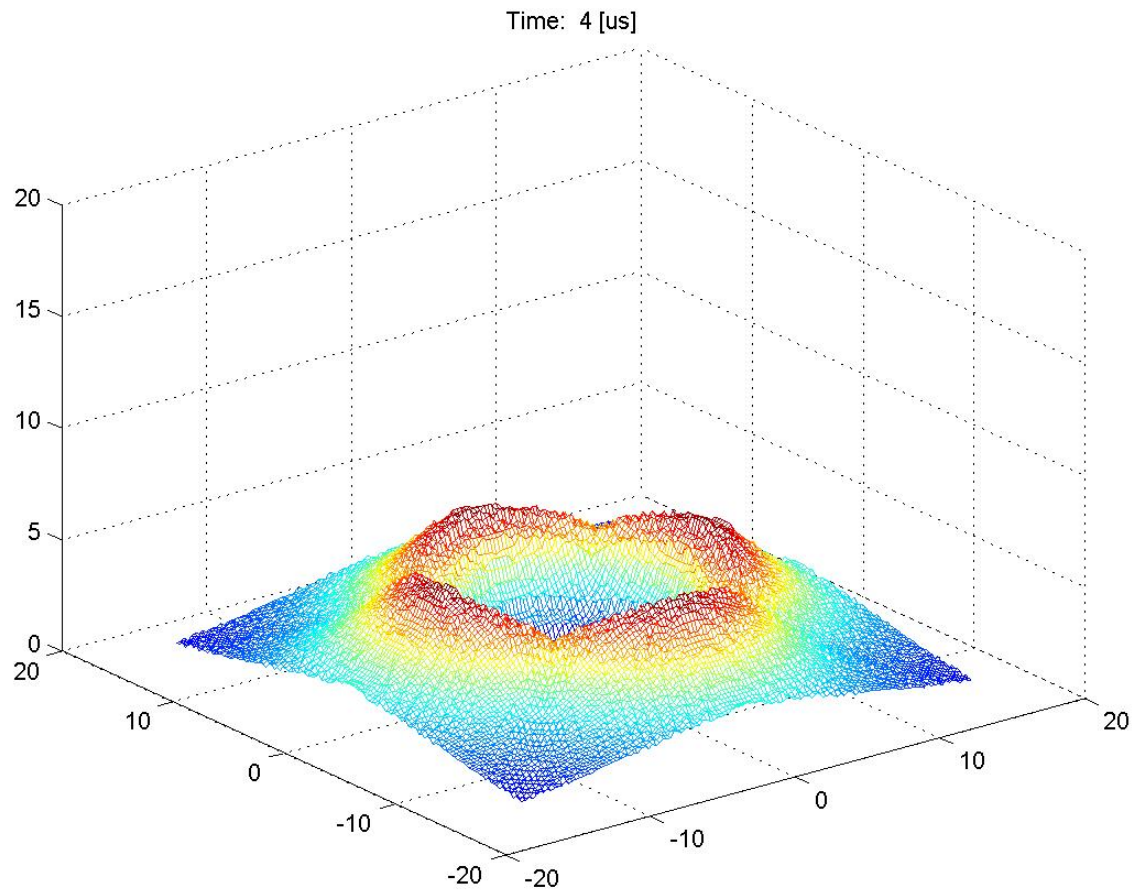
## временска и просторна распредеба на напон на чекор





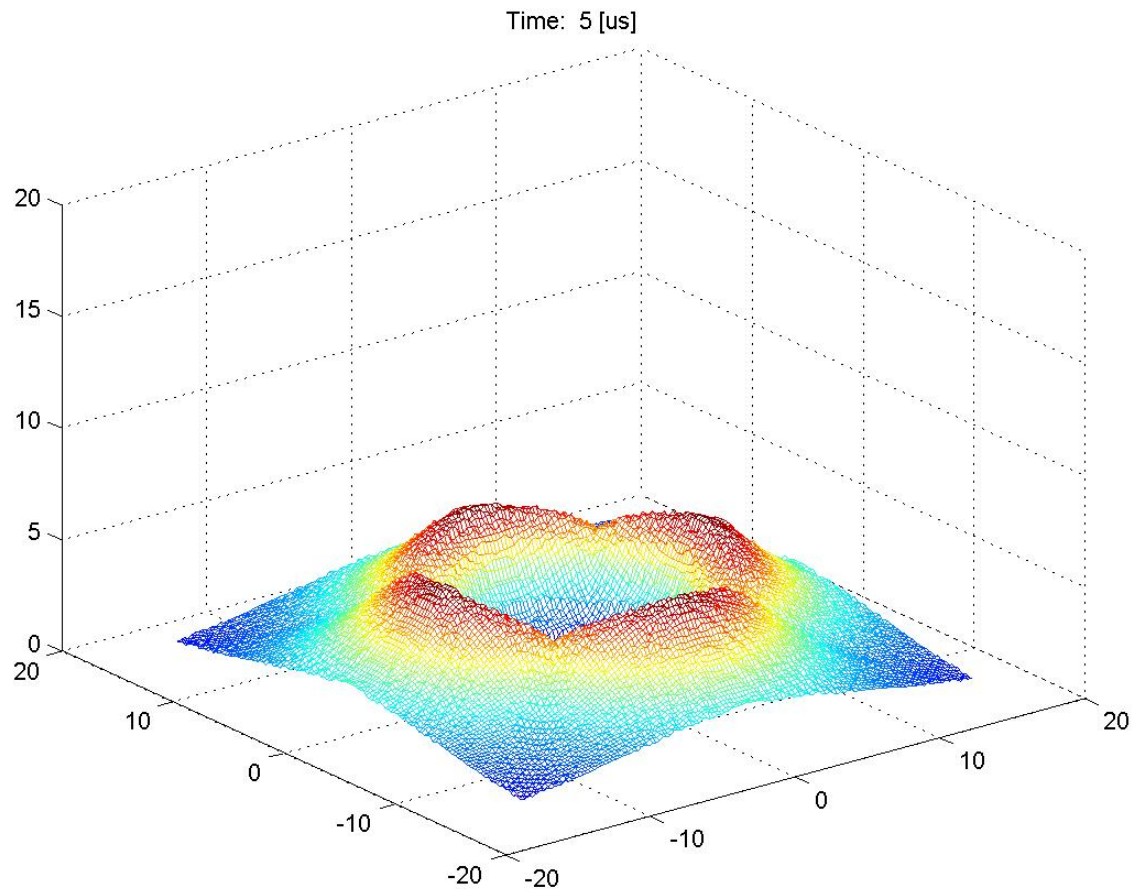
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



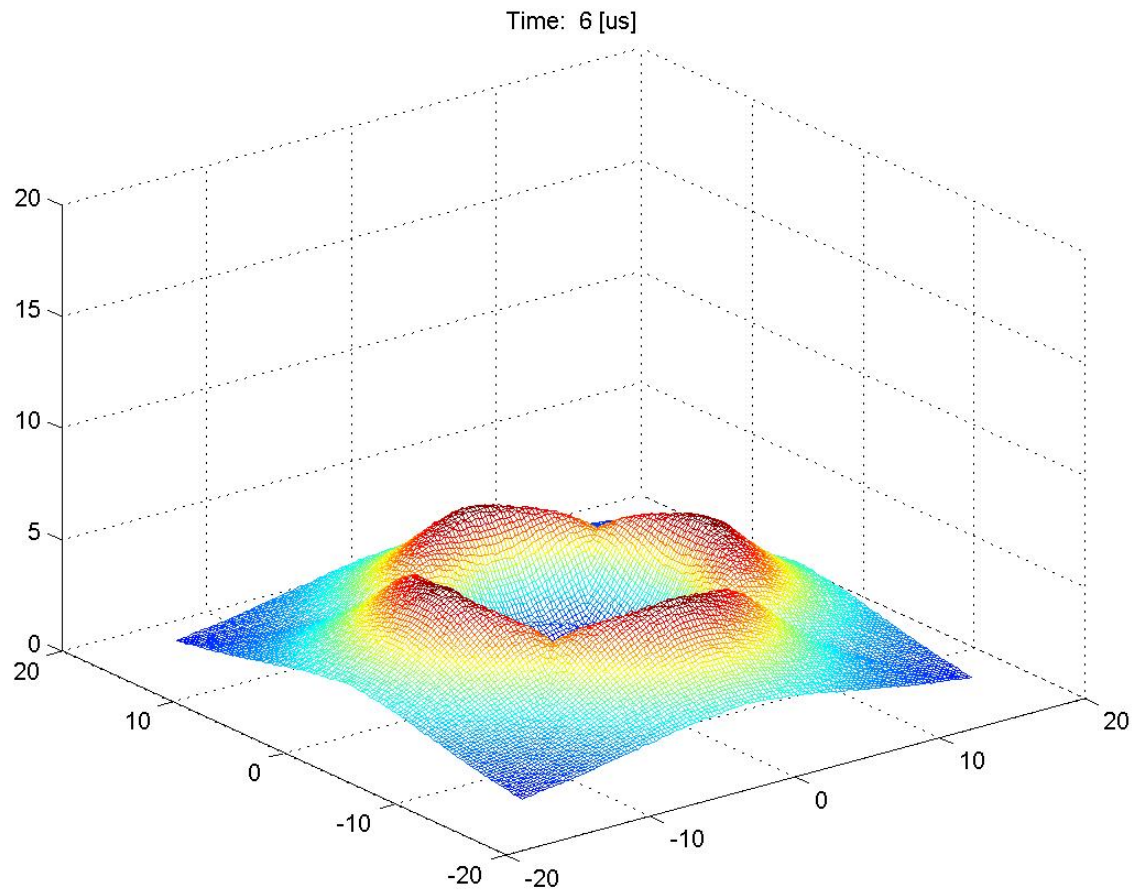
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



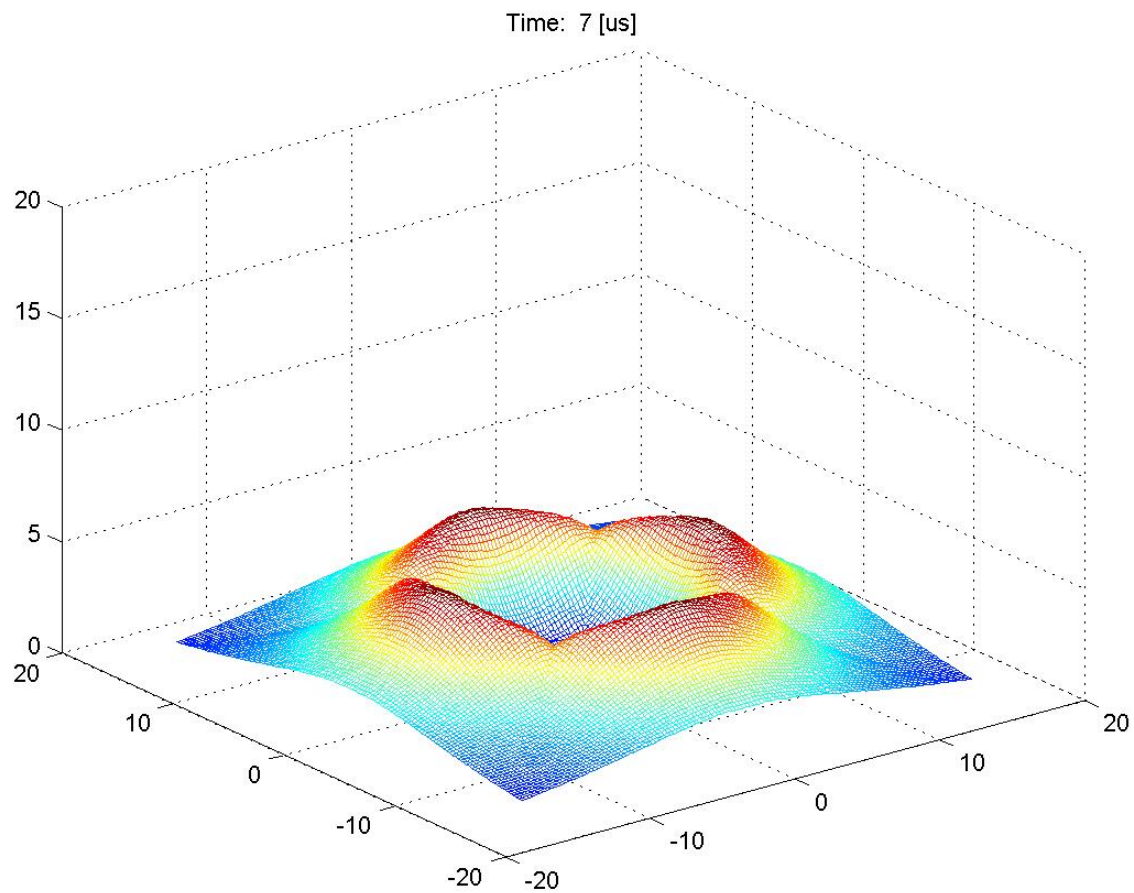
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



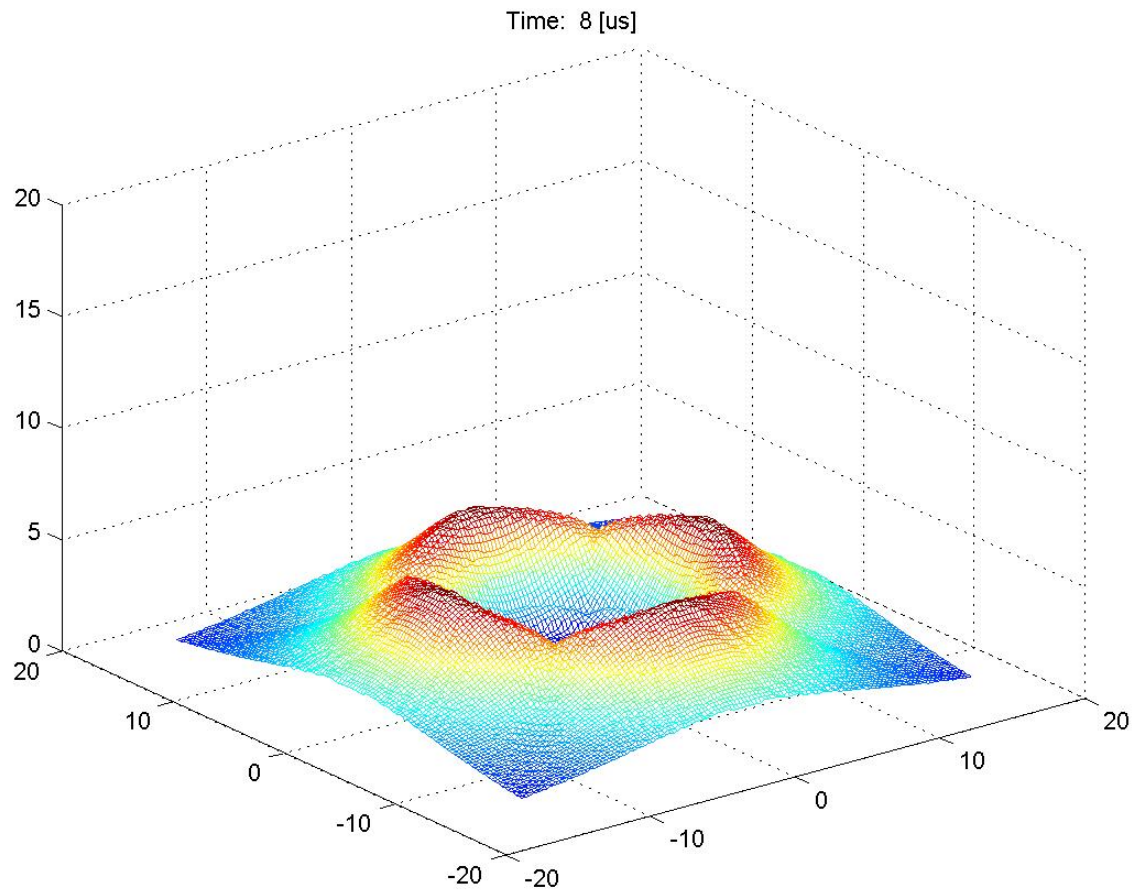
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



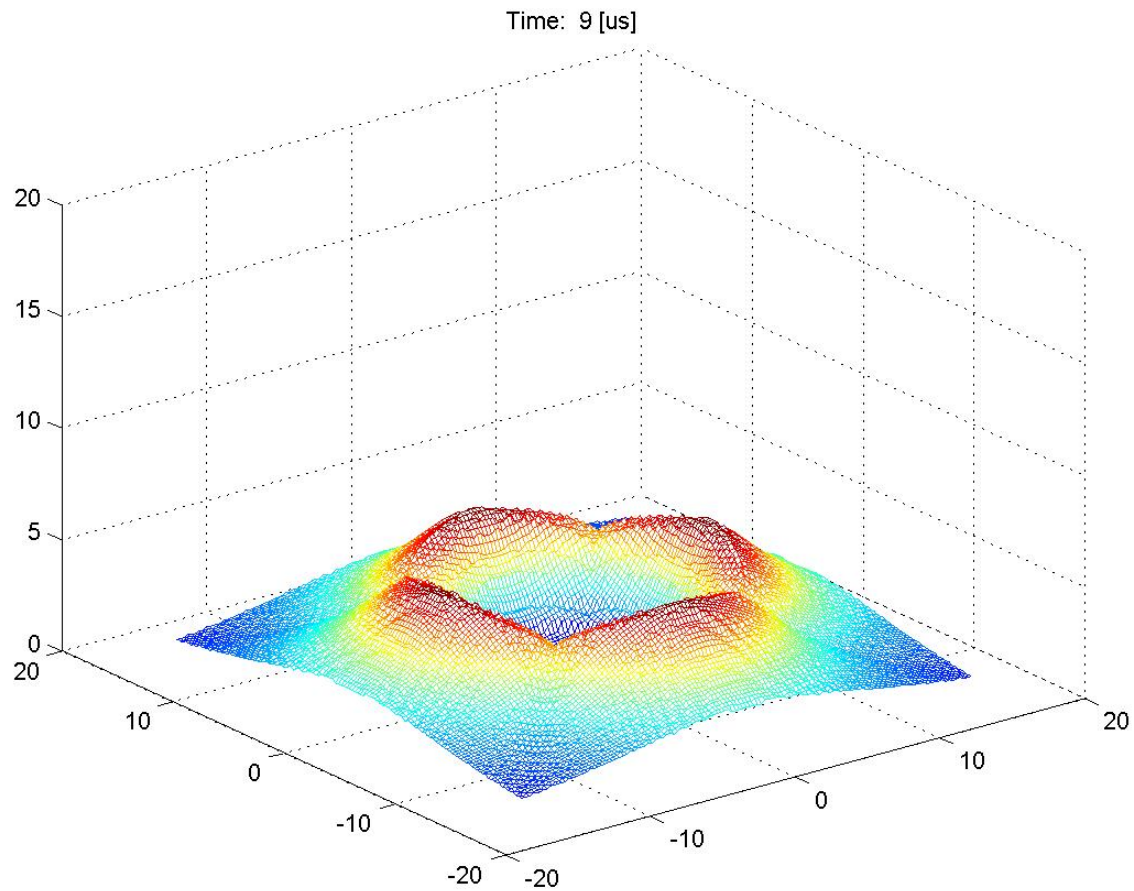
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



# Параметарски анализи во временски домен

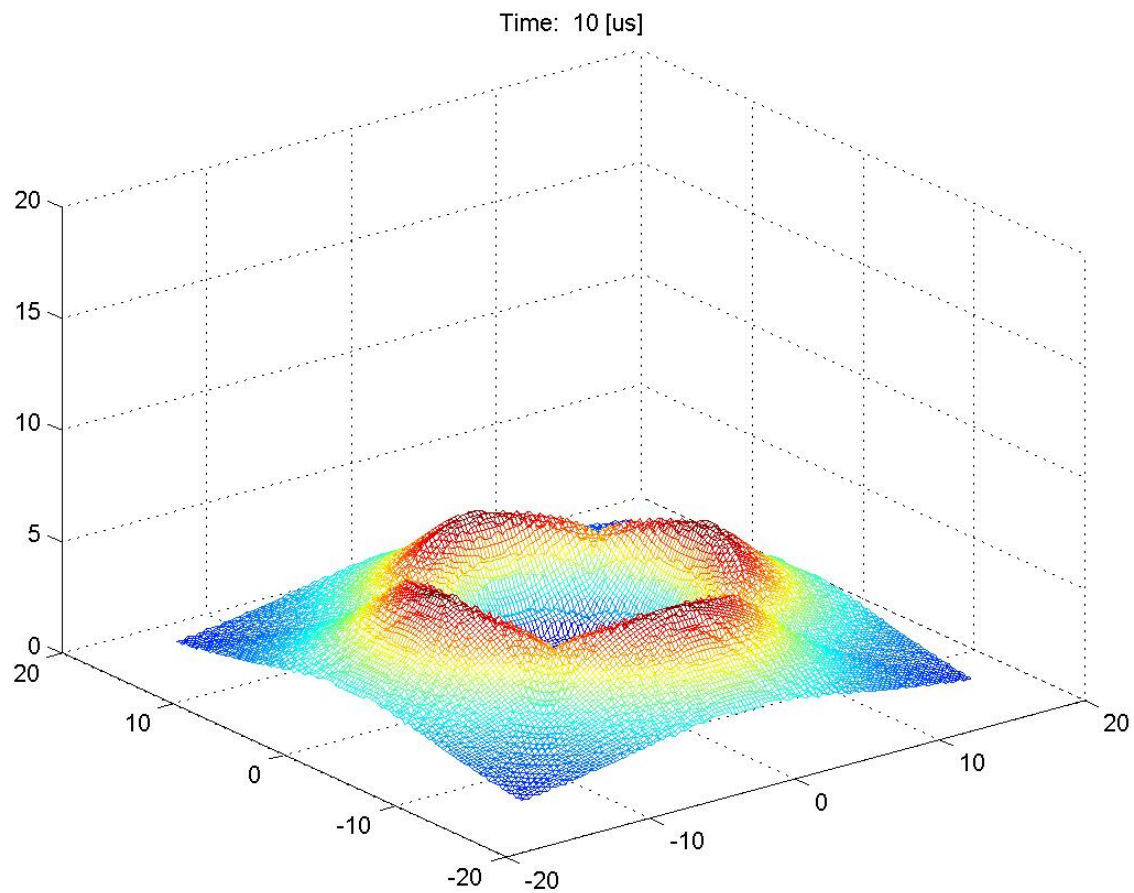
## временска и просторна распредеба на напон на чекор





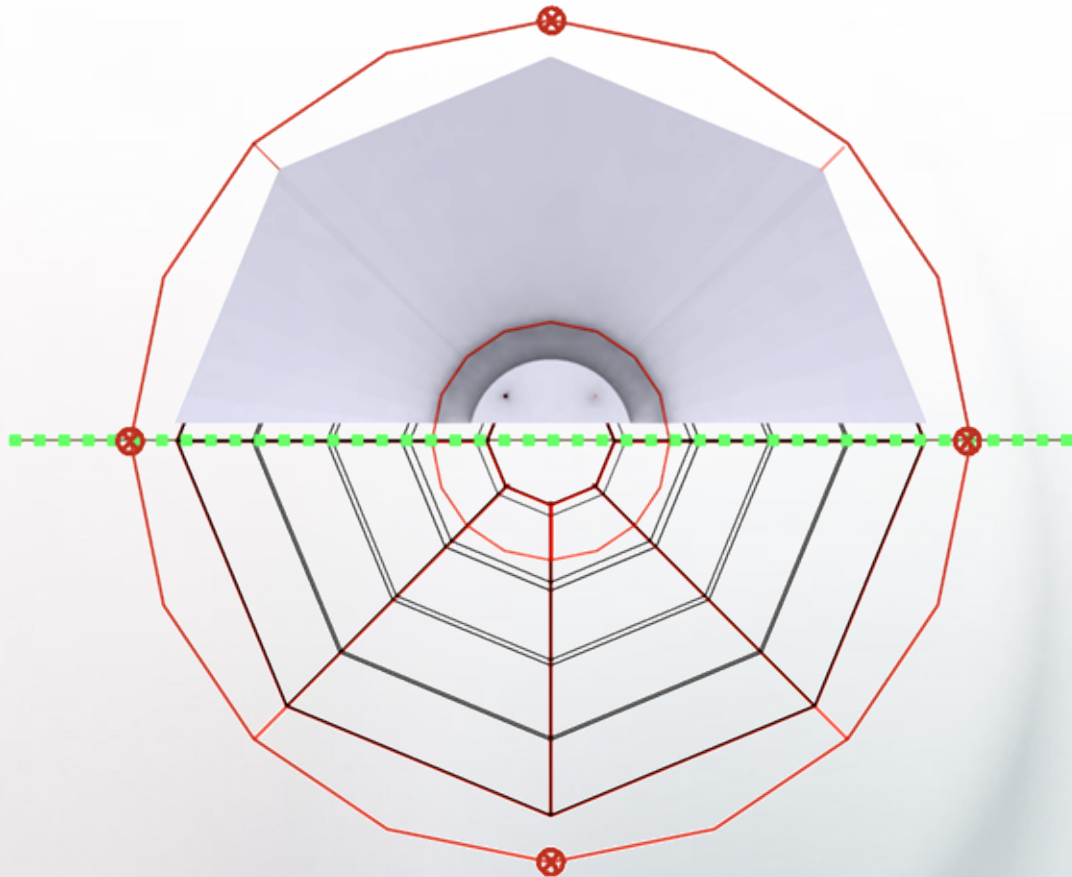
# Параметарски анализи во временски домен

## временска и просторна распредеба на напон на чекор



# Параметарски анализи во временски домен

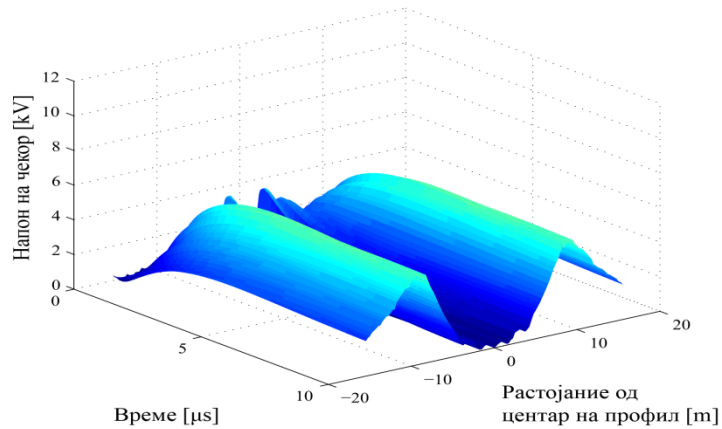
временска и просторна распредеба на напон на чекор



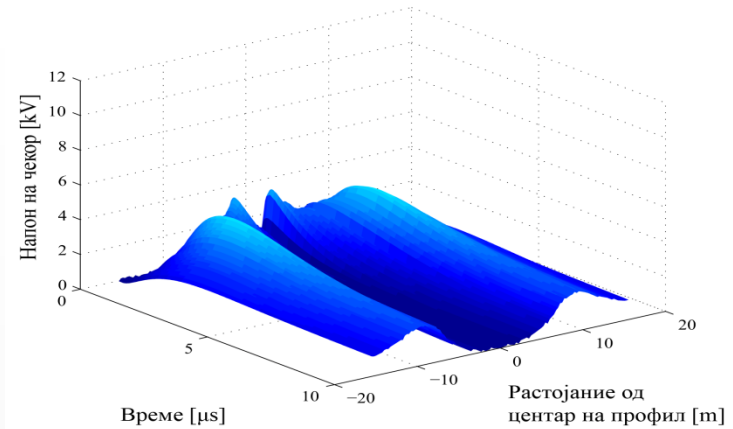


# Параметарски анализи во временски домен

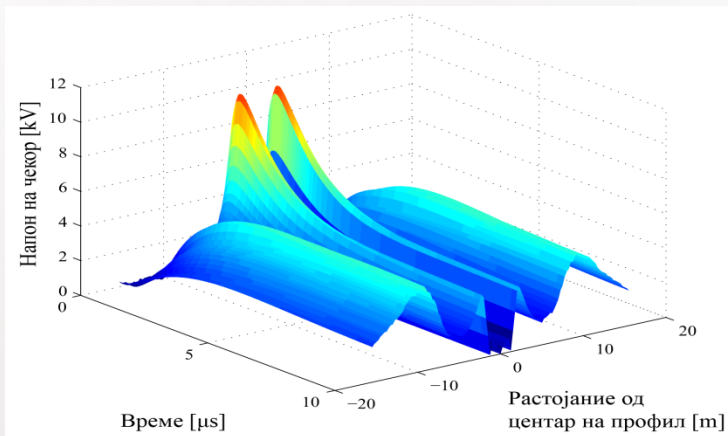
## Напони на чекор за прв удар на гром и $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$



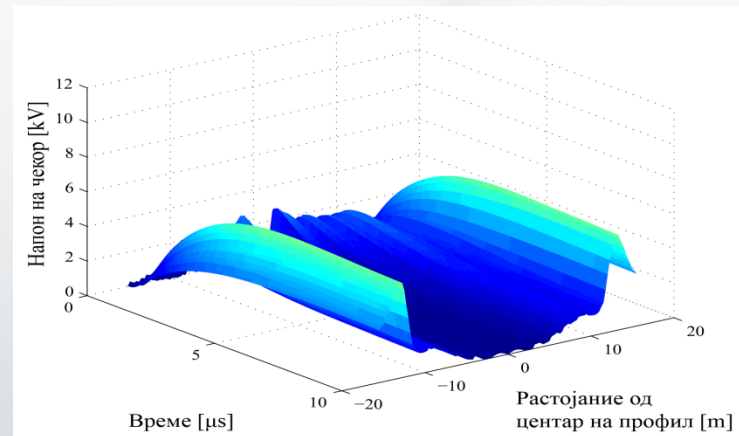
Интегриран модел (референтен)



Интегриран модел (со 30 m верт. електроди)



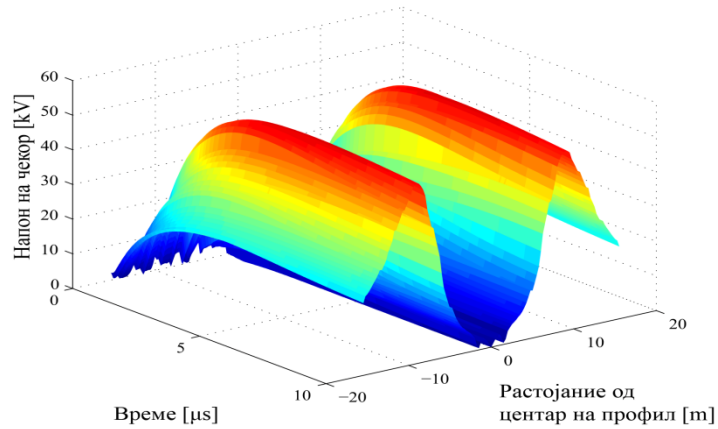
Конзервативен модел (без арматура)



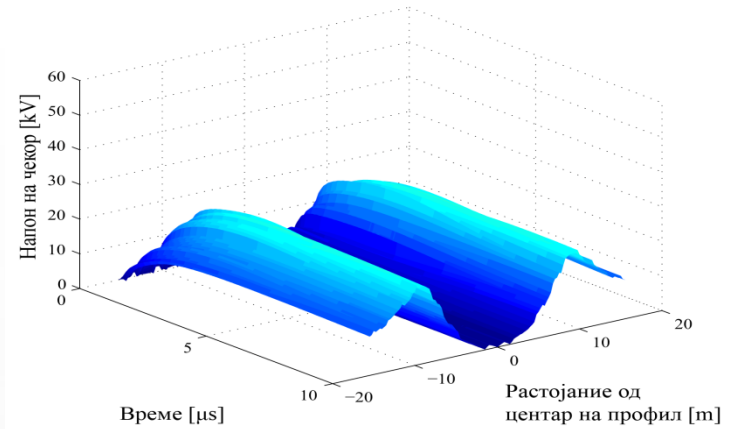
Интегриран модел (со дополнителен прстен)

# Параметарски анализи во временски домен

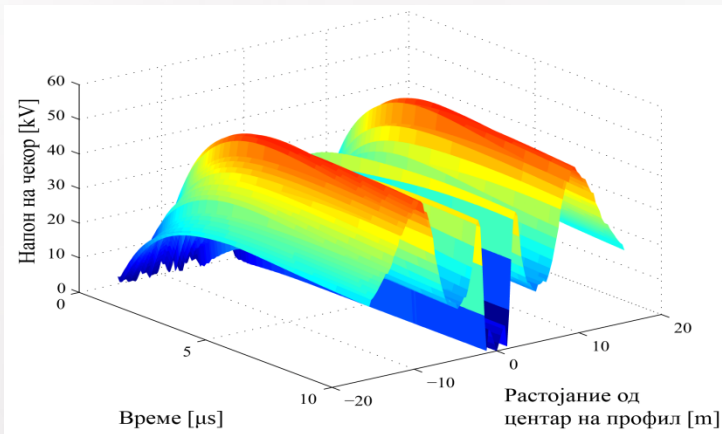
## Напони на чекор за прв удар на гром и $\sigma = 0.001 \text{ S/m}$



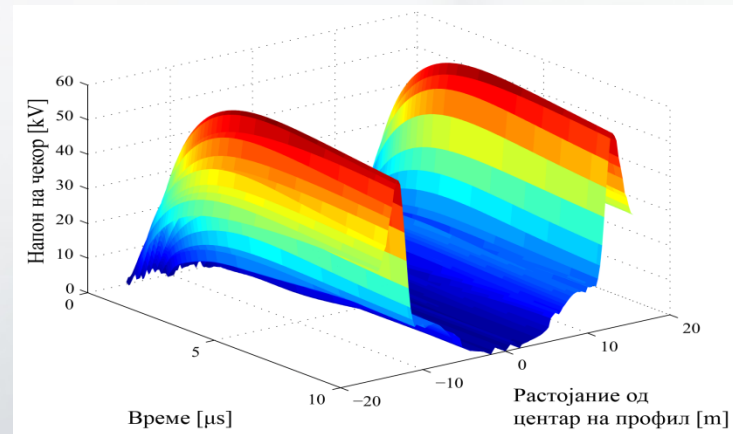
Интегриран модел (референтен)



Интегриран модел (со 30 m верт. електроди)



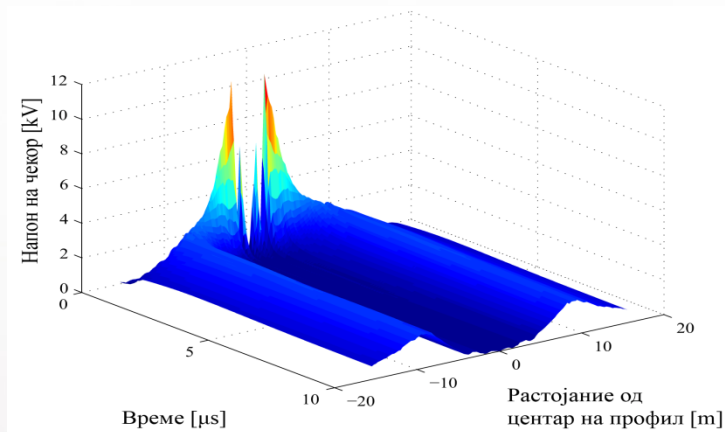
Конзервативен модел (без арматура)



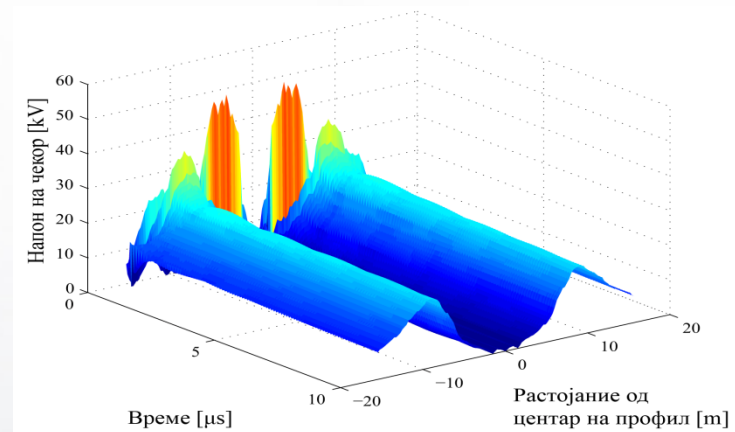
Интегриран модел (со дополнителен прстен)

# Параметарски анализи во временски домен

Напони на чекор за последователен удар на гром



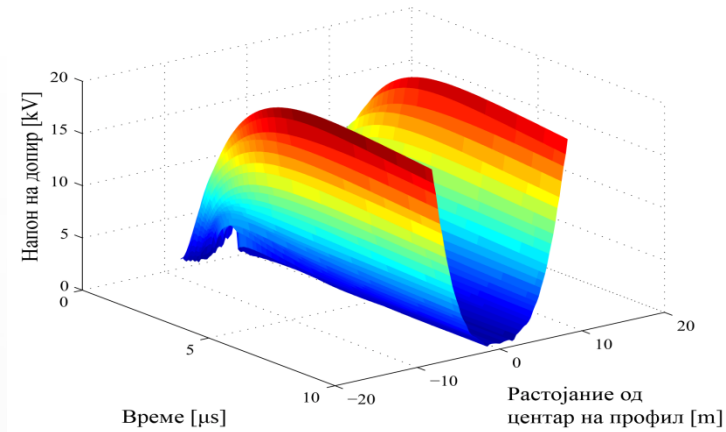
$\sigma = 0.01 \text{ S/m}$



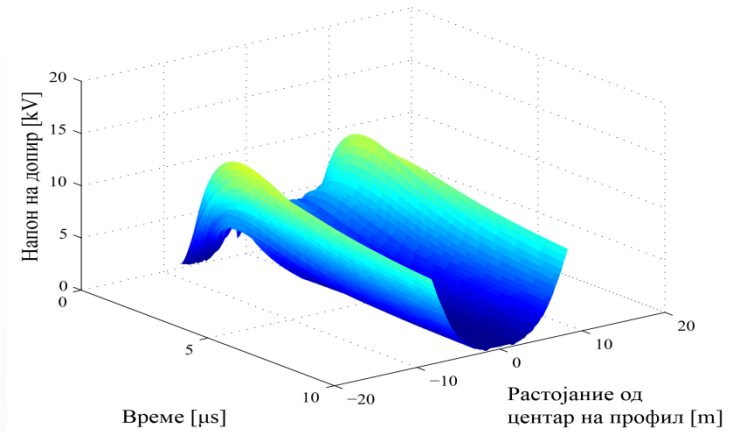
$\sigma = 0.001 \text{ S/m}$

# Параметарски анализи во временски домен

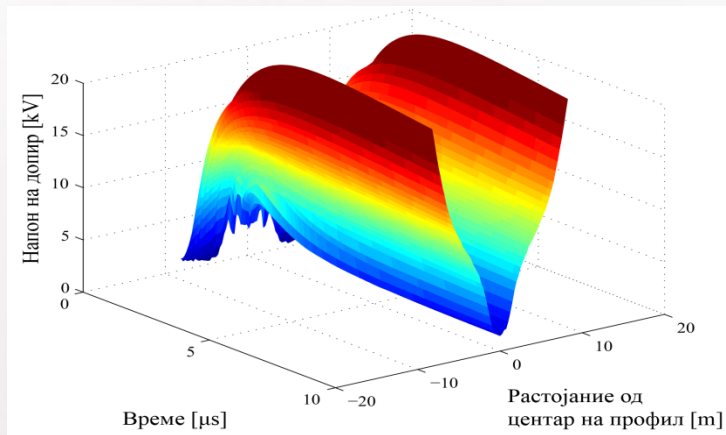
## Напони на допир за прв удар на гром и $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$



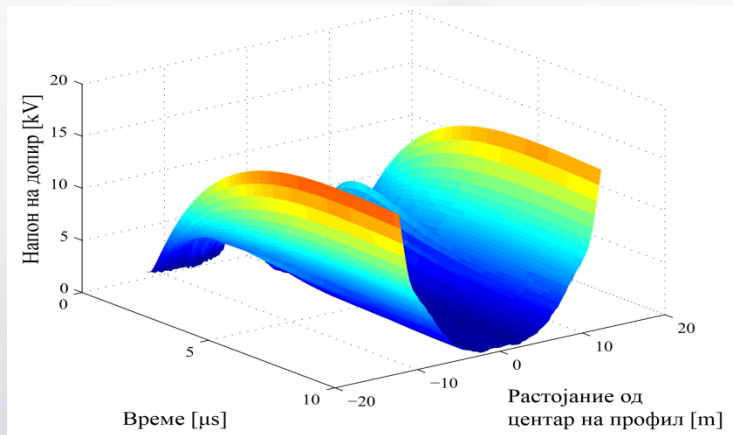
Интегриран модел (референтен)



Интегриран модел (со 30 m верт. електроди)



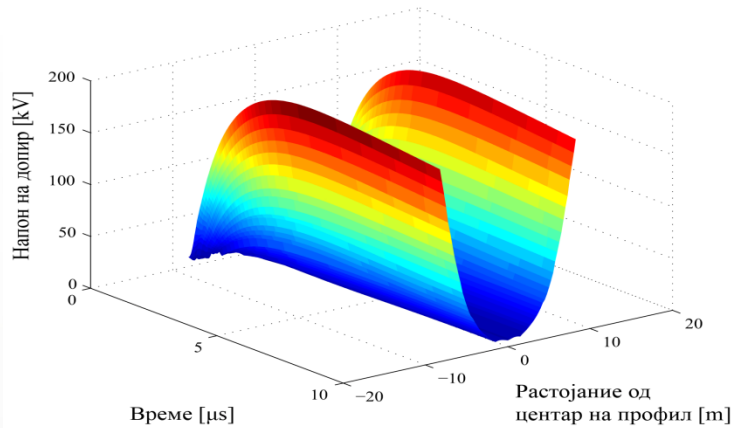
Конзервативен модел (без арматура)



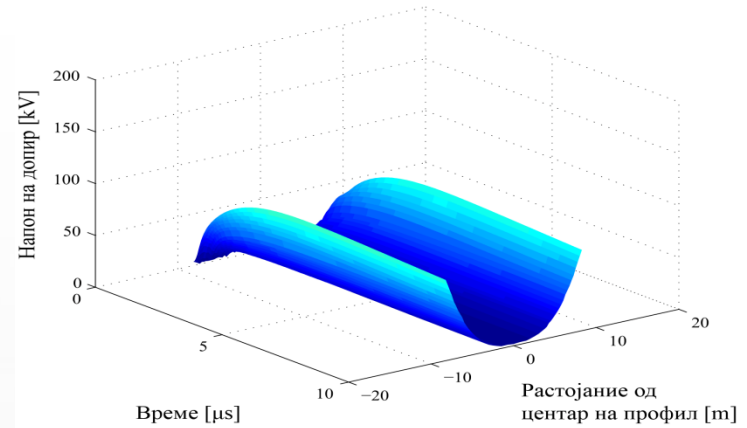
Интегриран модел (со дополнителен прстен)

# Параметарски анализи во временски домен

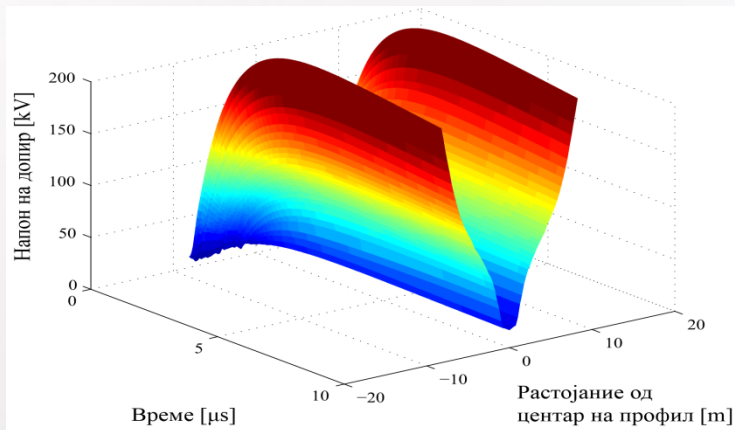
Напони на допир за прв удар на гром и  $\sigma = 0.001 \text{ S/m}$



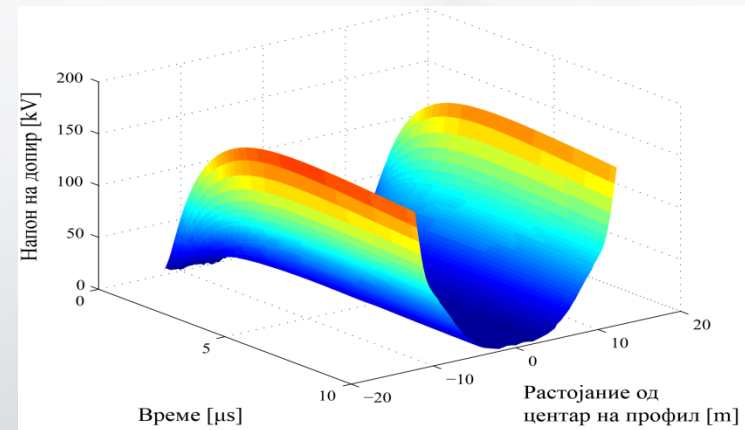
Интегриран модел (референтен)



Интегриран модел (со 30 m верт. електроди)



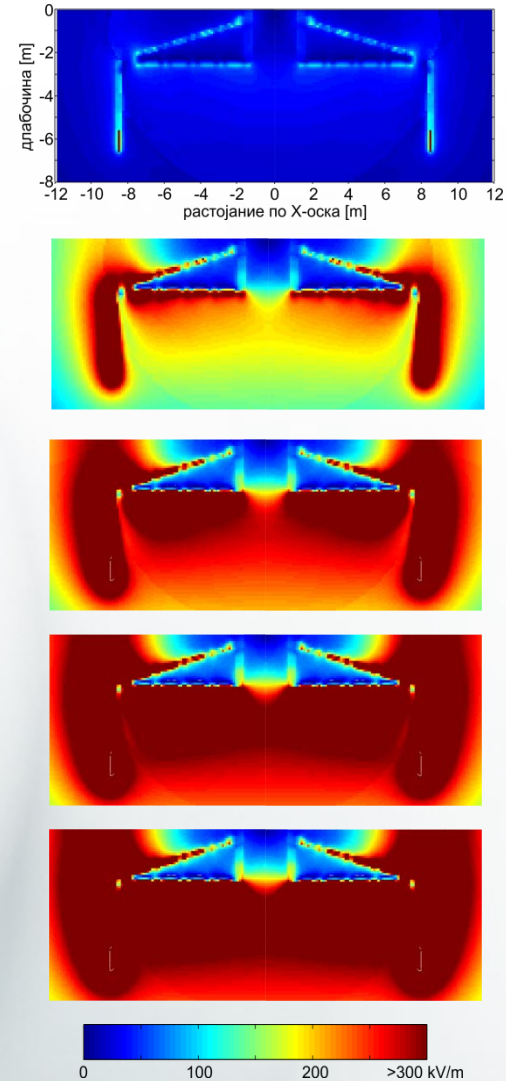
Конзервативен модел (без арматура)



Интегриран модел (со дополнителен прстен)

# Јонизација на земја

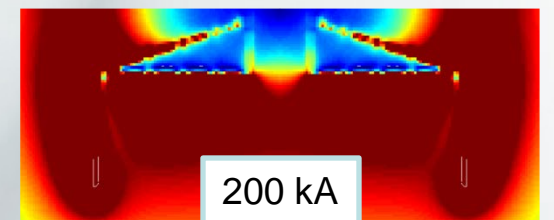
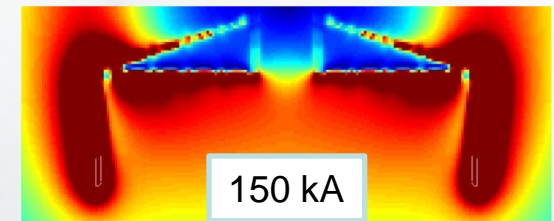
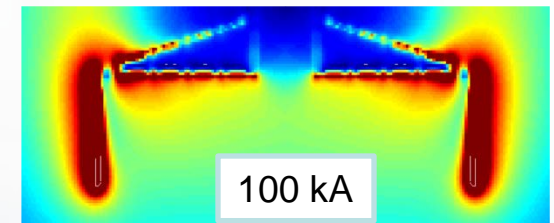
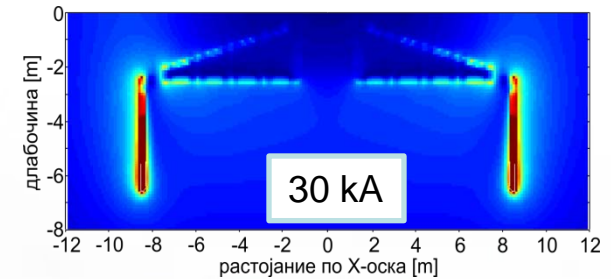
- При струја на гром со голем интензитет, настапува нелинеарна појава на јонизација на земја
- Ефектот на јонизација на земја може накратко да се опише како електричен пробив и искрење во земјата околу електродите, кога електричното поле го надминува критичното електрично поле на земјата ( $E_0 = 300 \text{ kV/m}$ )
- Ефектот се манифестира со зголемување на спроводноста на земјата околу електродите
- Просторот кој е опфатен од оваа појава во голема мера зависи од интензитетот на струјата, карактеристиките на земјата и геометријата на заземјувачот



# Јонизација на земја

## Влијание на максимална вредност на струја

- Анализирани интегрирани модели на заземјувач, во земја со  $\sigma = 0.001 \text{ S/m}$  при прв удар на гром со време на пораст  $T_{\max} = 5 \mu\text{s}$  и максимална вредност која варира од 30 kA до 200 kA.
- За  $I_m = 30 \text{ kA}$  ефектите на јонизација се незначителни
- За  $I_m = 100 \text{ kA}$  и  $I_m = 150 \text{ kA}$  јонизацијата е ограничена во близина на заземјувачките електроди.
- Струја со екстремна интензитет од  $I_m = 200 \text{ kA}$  е потребна за проширување на јонизираната зона околу целиот заземјувач

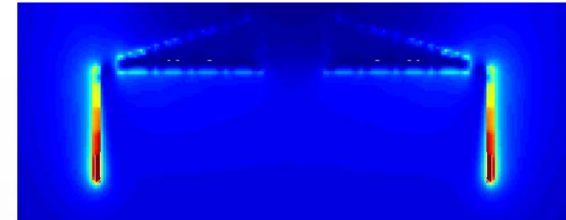




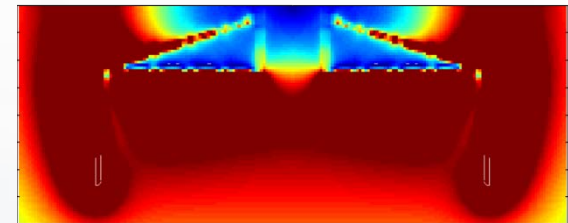
# Јонизација на земја

## Влијание на спроводност на земја

- Анализирани се случај за струен импулс на прв удар на гром со максимална вредност  $I_m = 200$  kA, за два типа на земја со  $\sigma = 0.01$  S/m и  $\sigma = 0.001$  S/m и интегриран модел на заземјувач
- Струен импулс со екстремно голема максимална вредност не може да предизвика значителен ефект на јонизација во земја со добра спроводност



$\sigma = 0.01$  S/m



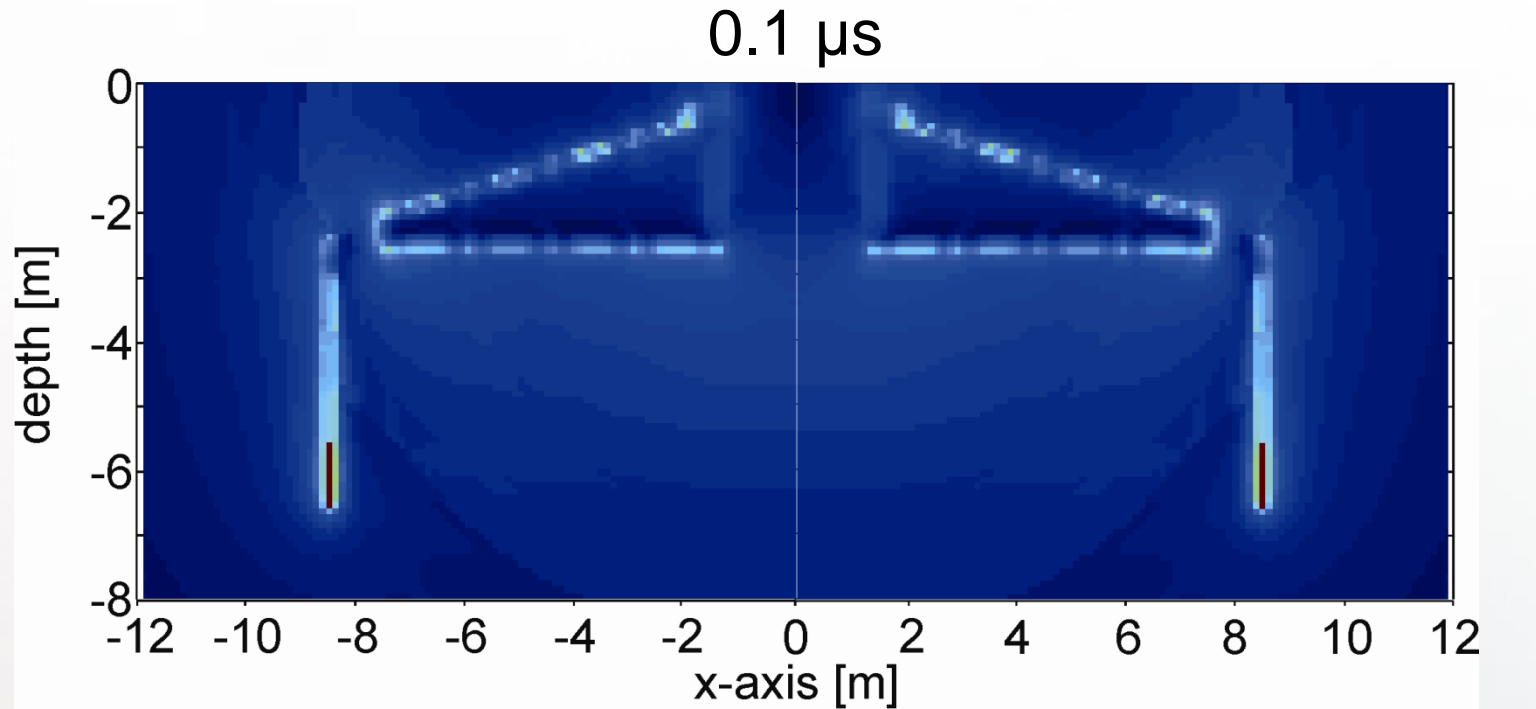
$\sigma = 0.001$  S/m





# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



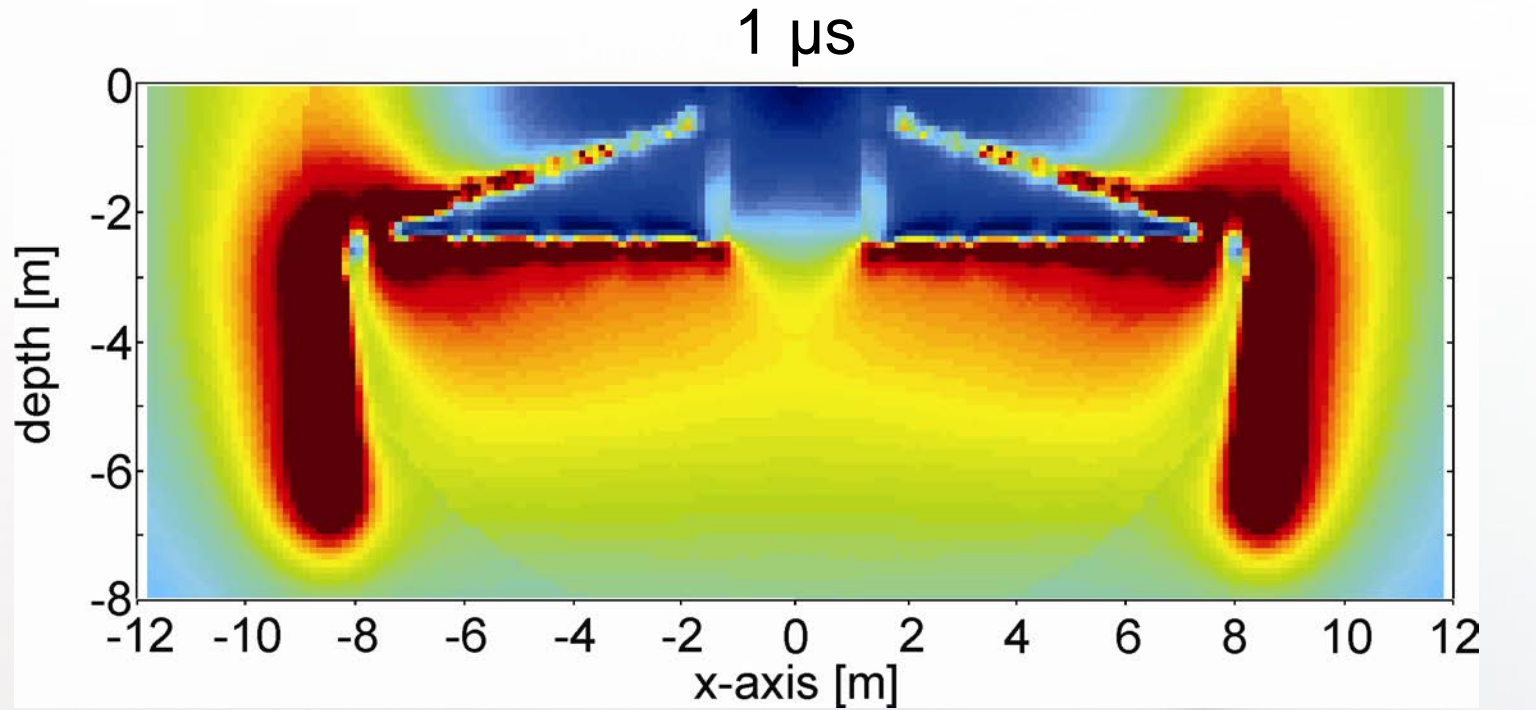
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}$ ,  $T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



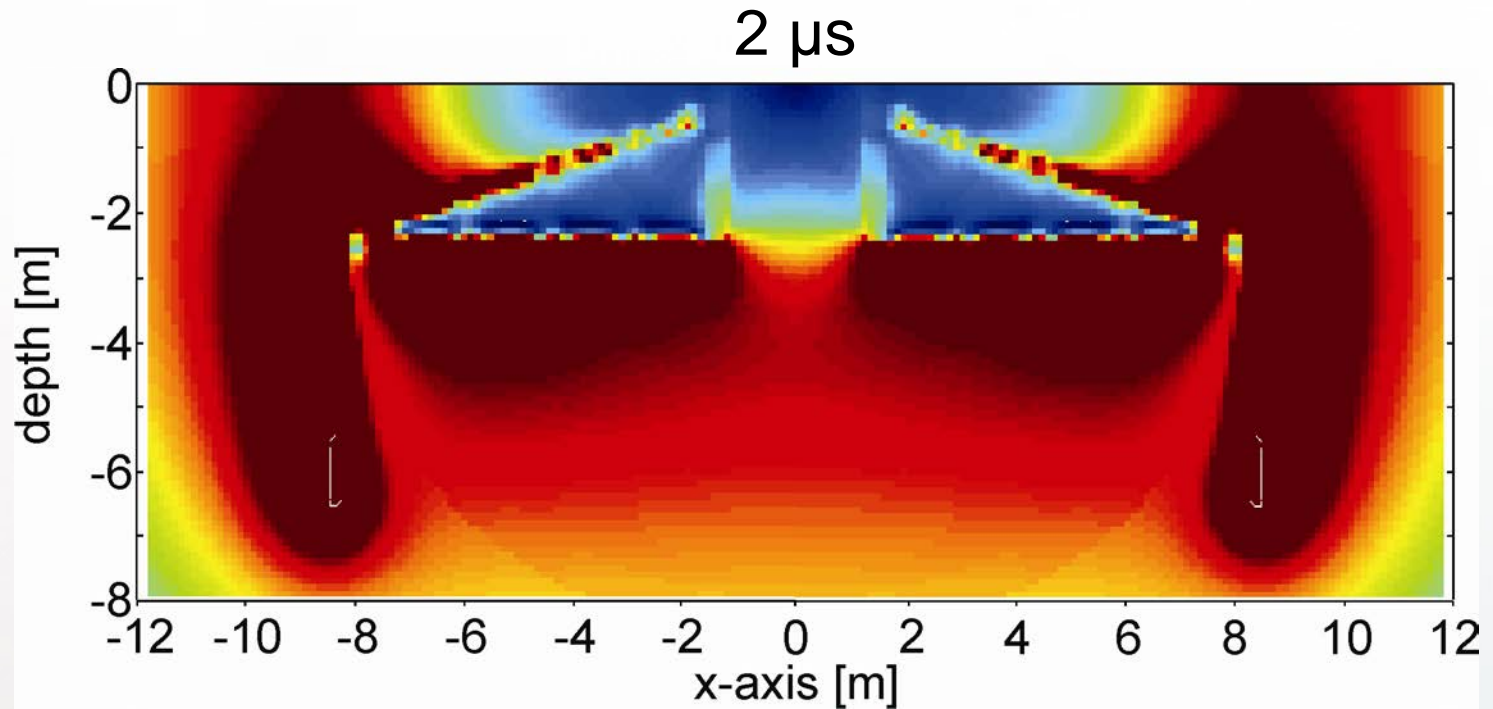
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



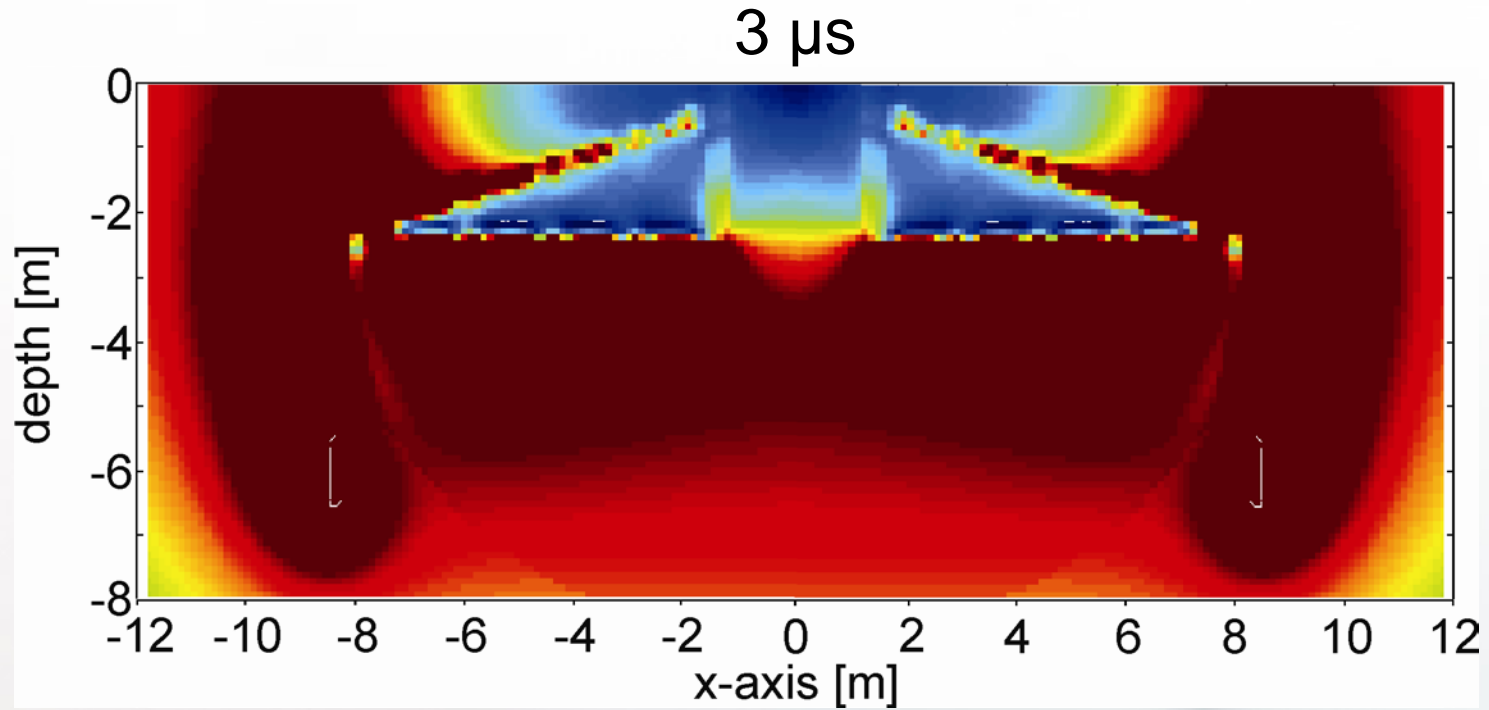
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



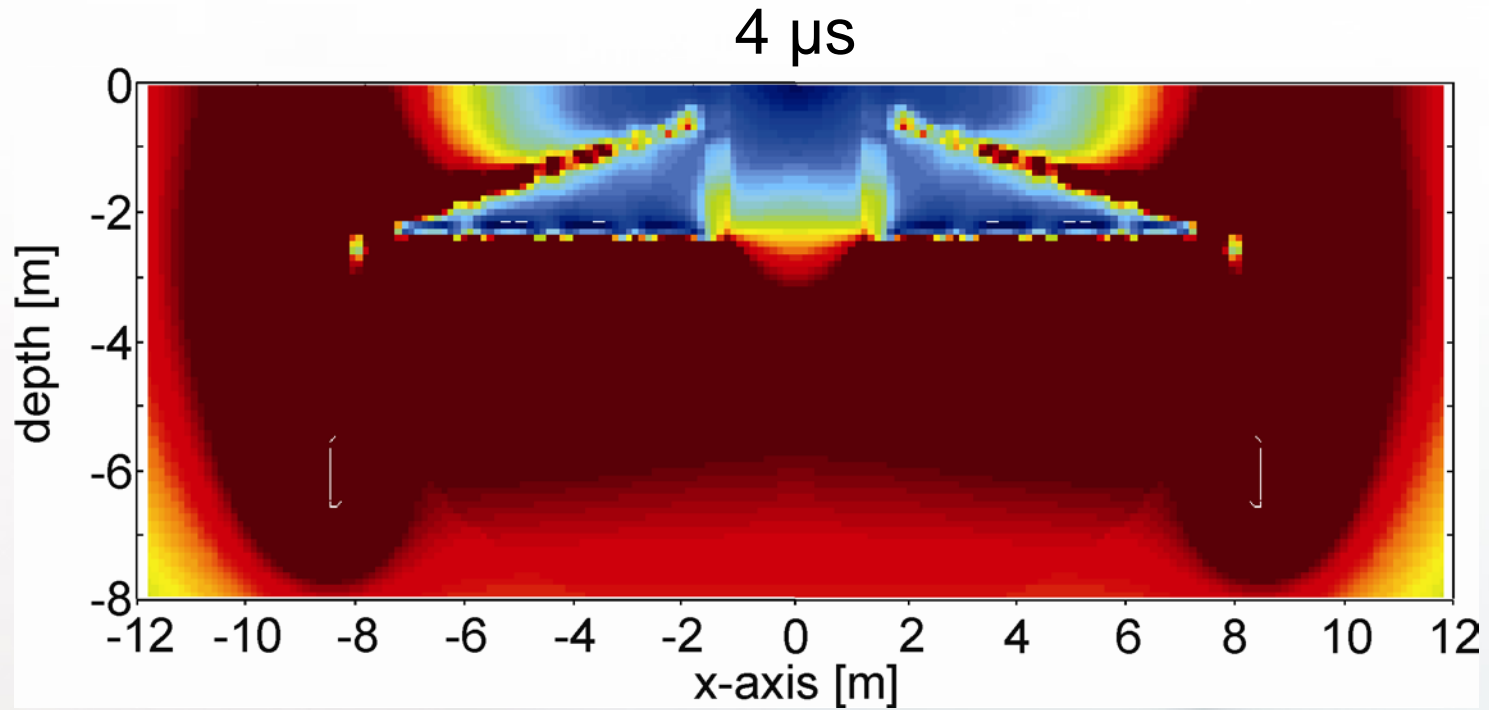
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



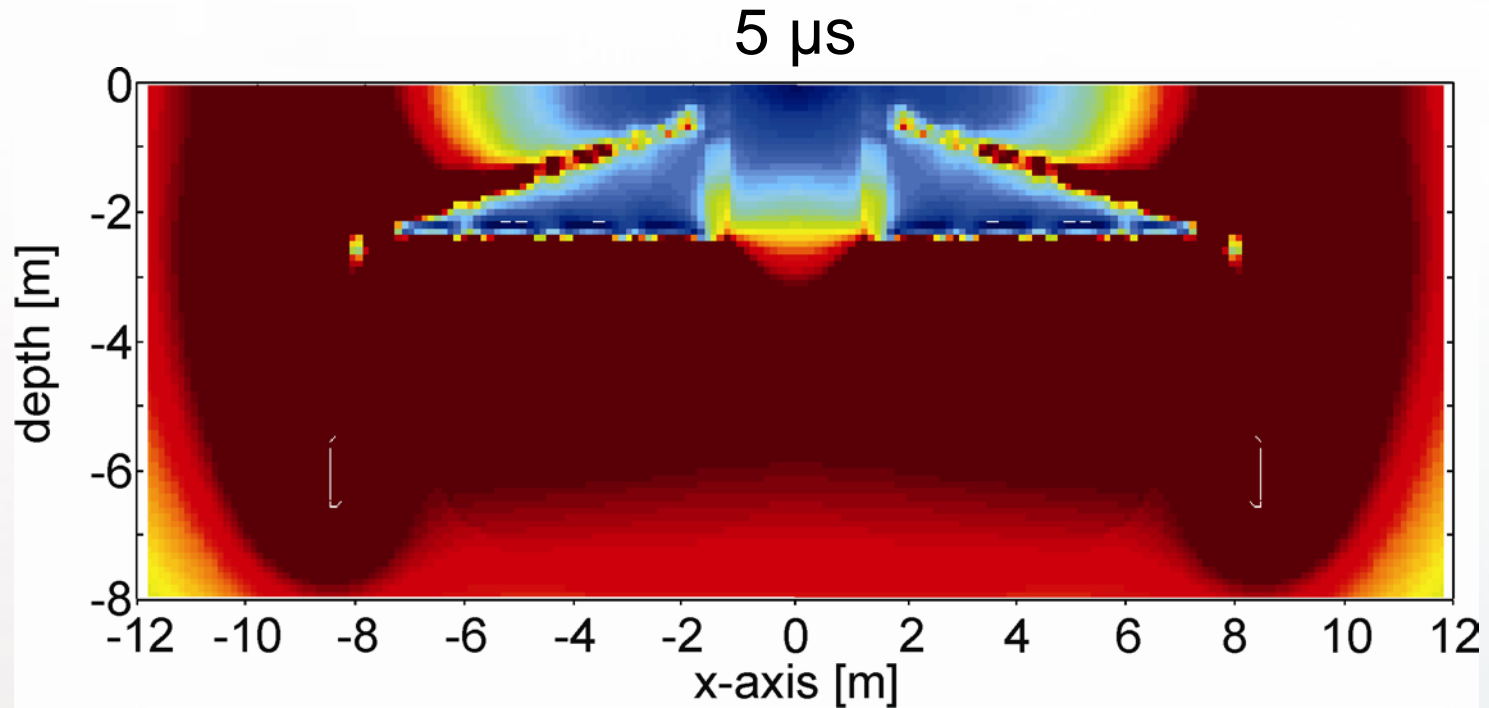
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



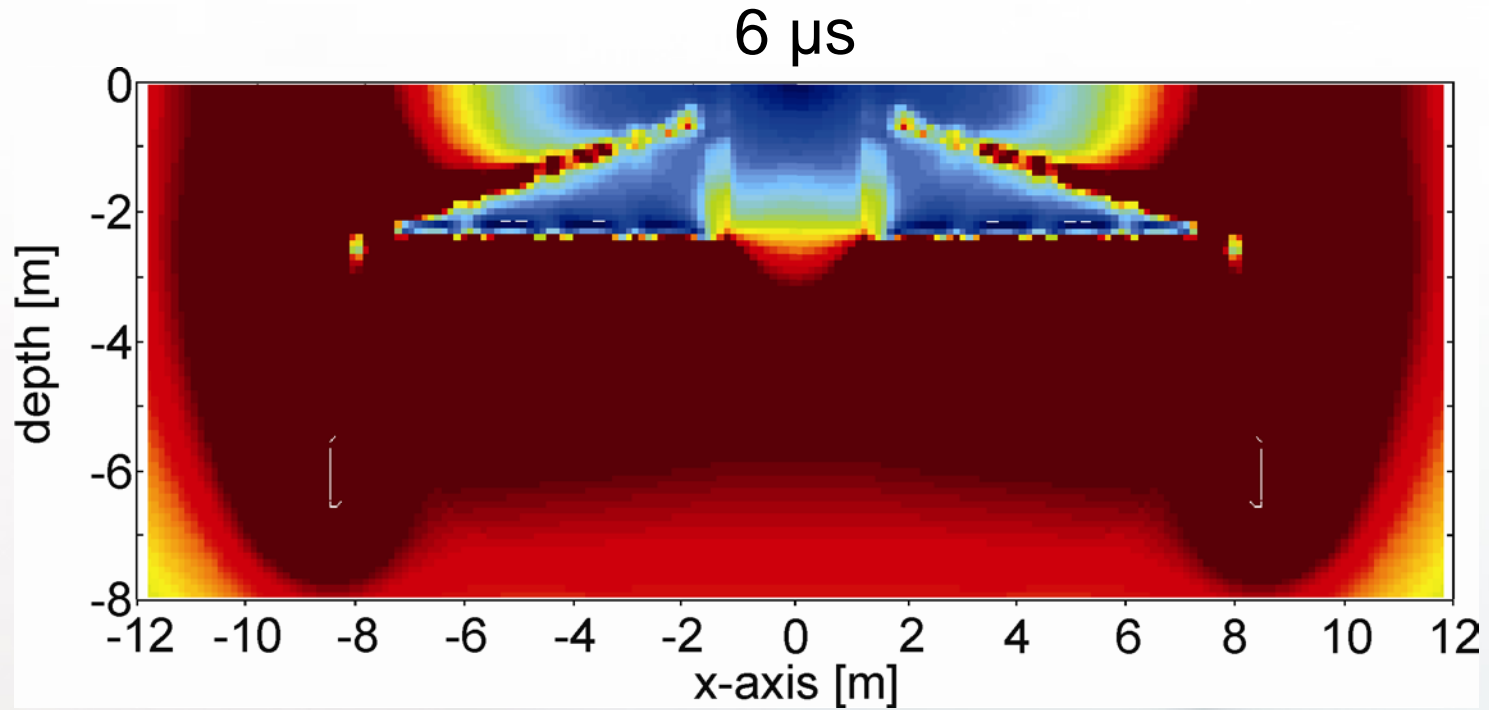
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

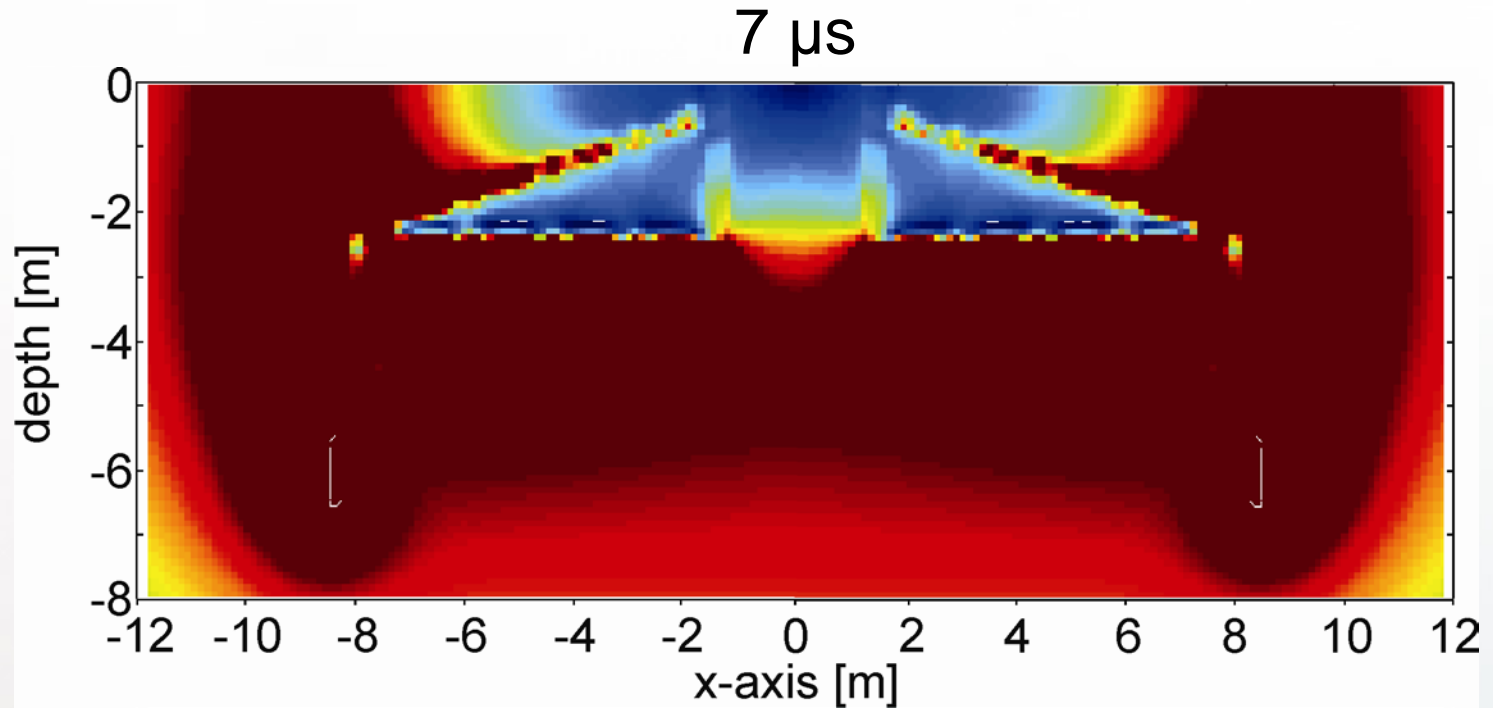
$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$





# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



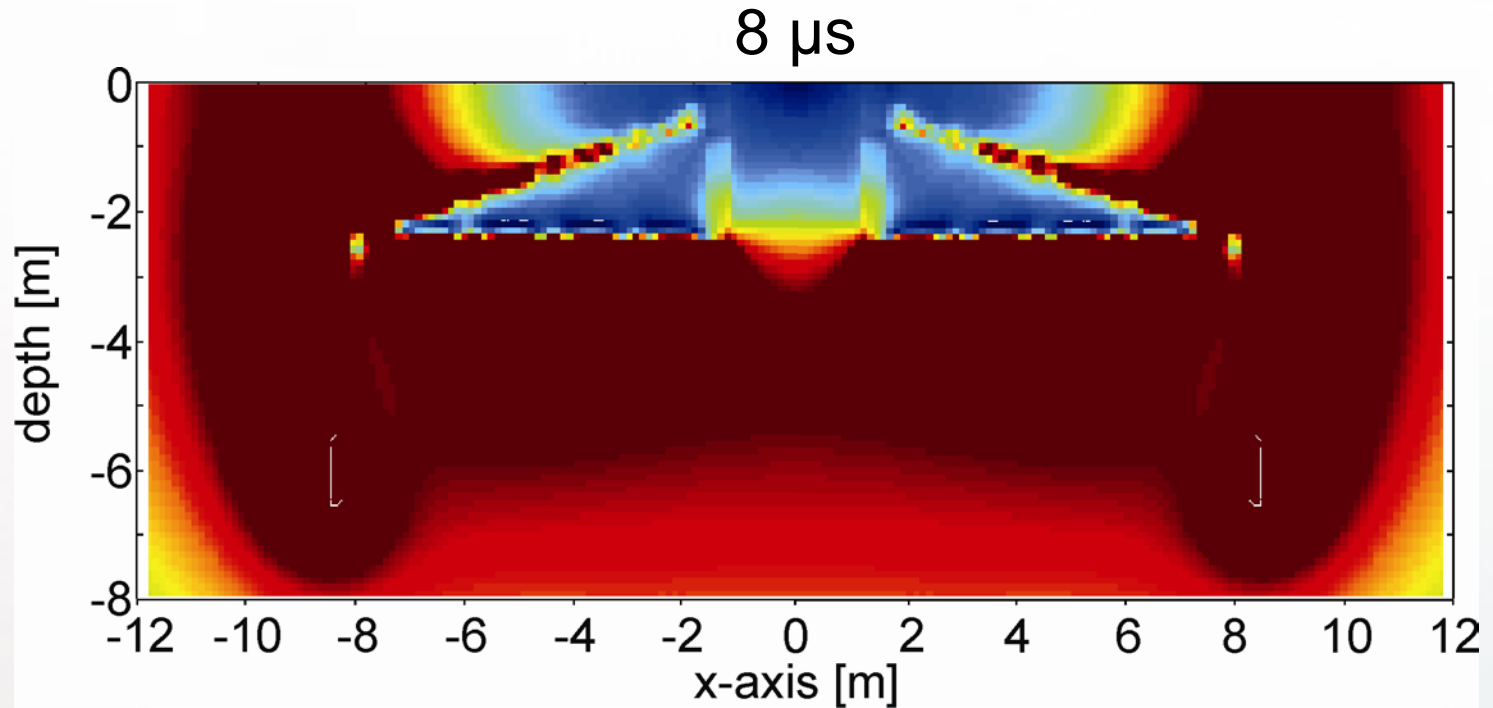
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



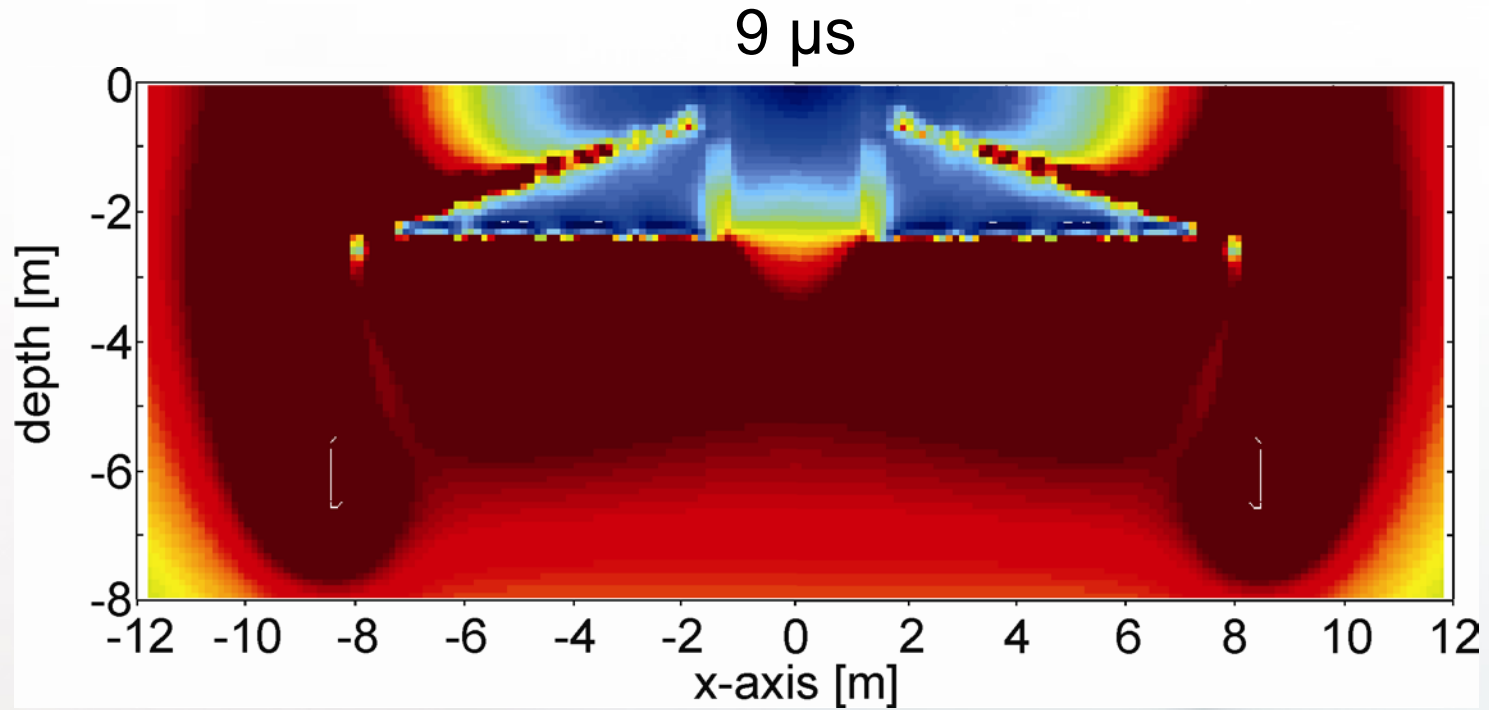
$$E_0 = 300 \text{ kV/m}$$

$$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



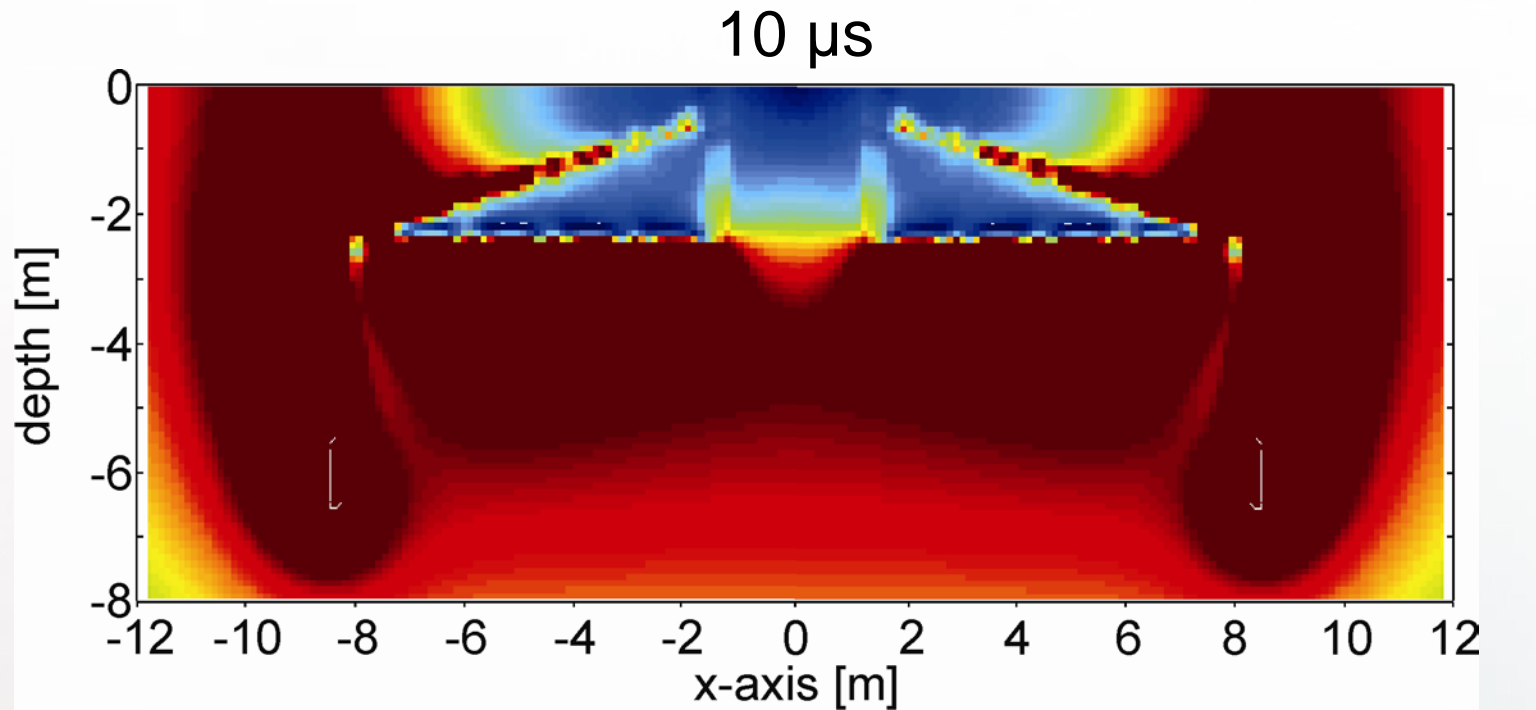
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



# Јонизација на земја

временска и просторна распределба на електрично поле



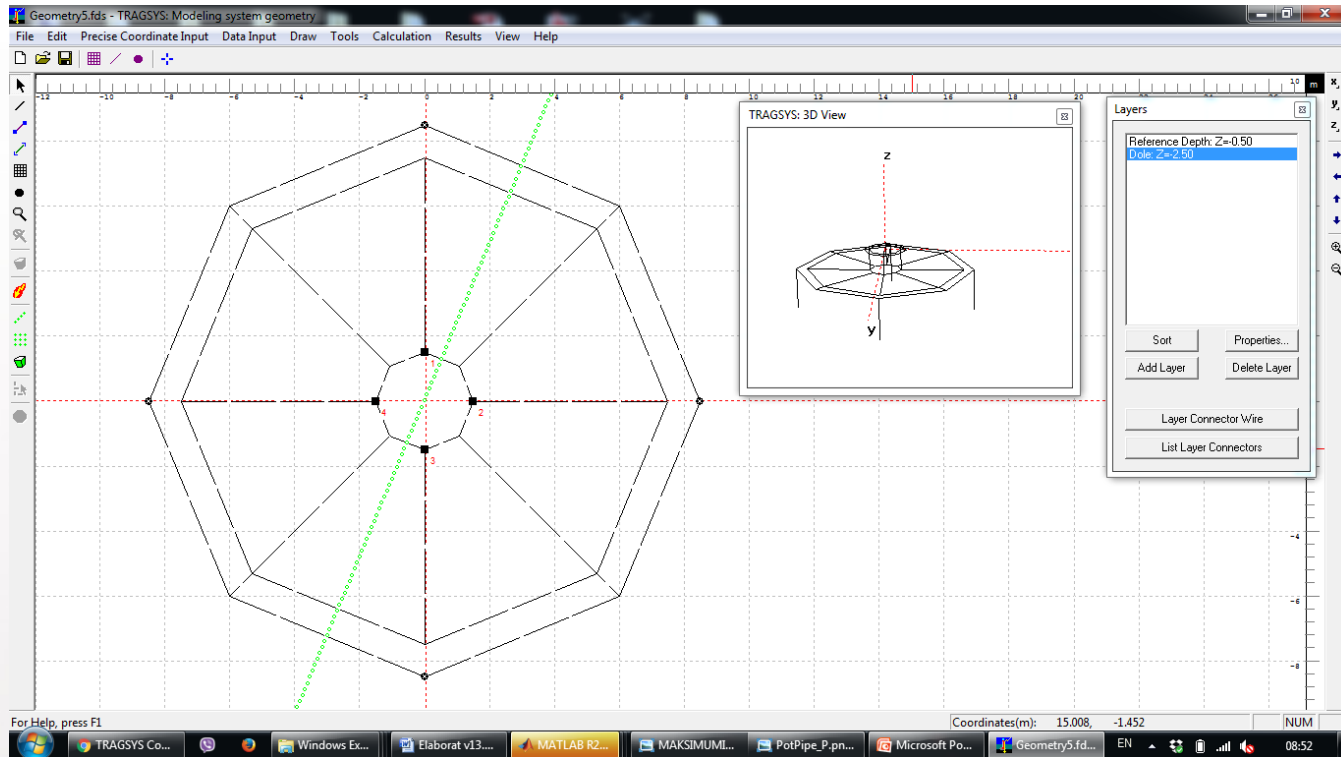
$E_0 = 300 \text{ kV/m}$

$I_m = 200 \text{ kA}, T_1 / T_2 = 5 / 50 \mu\text{s}$



## Заклучоци

- Транзиентниот период може да се подели на два дела:
  - иницијален период кој трае отприлика колку времето на пораст на струјниот импулс
  - стационарен период за време на падот на струјниот импулс
- Традиционалното занемарување на арматурата во темелот доведува до преценување на пресметаните потенцијали и напони за време на иницијалниот период
- Во стационарниот период, пресметаниот транзиентен потенцијал и напоните на чекор и допир се менуваат речиси пропорционално со опаѓањето на струјниот импулс.
- Подобрување на транзиентниот пораст на потенцијал и напоните на допир и чекор се постигнува со примена на долги вертикални електроди додека пак дополнителниот прстен воведува подобрување само кај транзиентниот потенцијал и напоните на допир и чекор над темелот на ветрогенераторот.
- Ефектот на јонизација на земја е изразен кај земја со голема отпорност и за струја на прв удар на гром со поголем интензитет



<http://www.tragsys.com>

[info@tragsys.com](mailto:info@tragsys.com)

[lgrcev@feit.ukim.edu.mk](mailto:lgrcev@feit.ukim.edu.mk)

[bmarkovski@feit.ukim.edu.mk](mailto:bmarkovski@feit.ukim.edu.mk)

**ВИ БЛАГОДАРАМ ЗА ВНИМАНИЕТО**

[bmarkovski@feit.ukim.edu.mk](mailto:bmarkovski@feit.ukim.edu.mk)