

DOI: [10.46793/CIGRE37.D1.03](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.D1.03)**D1.03****ПРОЦЕНА ГЕНЕРИСАНОГ НАЕЛЕКТРИСАЊА КОРОНЕ УСЛЕД СТАНДАРДНОГ  
ИМПУЛСА АТМОСФЕРСКОГ ПРАЖЊЕЊА****ESTIMATION OF THE GENERATED CORONA CHARGE DUE TO STANDARD  
LIGHTNING PULSE****Milan Ignjatović, Jovan Cvetic, Nikola Vuković\***

**Кратак садржај:** У ваздуху на атмосферском притиску корона је парцијално пражњење које се дешава око проводника малог радијуса кривине када се формира јако нехомогено електрично поље. Када је вредност интензитета електричног поља у ваздуху изнад одређеног прага, долази до генерације просторног наелектрисања око проводника које се састоји од позитивних и негативних јона. При удару атмосферског пражњења у надземни вод долази до простирања пренапонског таласа, при чему се око проводника формира корона. Наелектрисање короне утиче на повећање капацитивности вода што доводи до слабљења и дисторзије пренапонског импулса током простирања. Постоје различити модели короне помоћу којих се може израчунати промена амплитуде и стрмине пренапонског импулса током простирања. Један од њих је и CIGRE параболични модел који се заснива на једноставној математичкој зависности генерисаног наелектрисања од тренутне вредности напона. Физичка слика динамике наелектрисаних честица током корона пражњења може се описати дрифт-дифузионим моделом. Решавањем једначина континуитета за електроне, позитивне и негативне јоне добија се детаљна теоријска анализа временске и просторне зависности концентрација честица и електричног поља око проводника. На основу добијених резултата може се израчунати укупно генерисано наелектрисање короне и извршити поређење са резултатима једноставнијег инжењерског CIGRE параболичног модела.

**Кључне речи:** корона,  $QV$  криве, атмосферска пражњења, дрифт-дифузионни модел

**Abstract:** In air at atmospheric pressure, corona is a partial discharge that occurs around a conductor with a small radius of curvature when a strong inhomogeneous electric field is formed. When the electric field intensity in the air is above a certain threshold, a spatial charge is generated around the conductor, consisting of positive and negative ions. When the lightning hits an overhead line, a surge wave propagates, forming a corona around the conductor. The corona charge increases the capacitance of the lines, which leads to attenuation and distortion of the surge pulse during propagation. There are various corona models that can be used to

---

\* Milan Ignjatović, University of Belgrade - School of Electrical Engineering, ignjatovic@etf.rs  
Jovan Cvetic, University of Belgrade - School of Electrical Engineering, cvetic\_j@etf.rs  
Nikola Vuković, University of Belgrade - School of Electrical Engineering, nvukovic@etf.rs

calculate the change in the amplitude and steepness of the surge pulse during propagation. One of them is the CIGRE parabolic model, which is based on a simple mathematical dependence of the generated charge on the current voltage value. The physical picture of the dynamics of charged particles during a corona discharge can be described by the drift-diffusion model. By solving the continuity equations for electrons, positive and negative ions, a detailed theoretical analysis of the temporal and spatial dependence of particle concentrations and the electric field around the conductor is obtained. Based on the obtained results, the total generated corona charge can be calculated and compared with the results of the simpler engineering CIGRE parabolic model.

**Key words:** *corona, QV curves, lightning, drift-diffusion model*

## 1 УВОД

Атмосферска пражњења се за земље опажају израженим визуелним и звучним ефектима. Већина атмосферских пражњења се дешава између самих облака, а од интереса за нас су атмосферска пражњења између облака и земље која изазивају страдање људи, објеката и уређаја. Ударима су посебно подложни високи објекти, дрвећа и издигнути облици рељефа. Обим штете се знатно повећава ширењем пожара које изазивају атмосферска пражњења. Такође, удари у делове енергетског система као што су надземни водови и разводна постројења могу довести до прекида снабдевања електричном енергијом великог броја људи и индустријских постројења.

Научно истраживање атмосферских пражњења се кроз историју заснивало на посматрању и феноменолошком описивању ове природне појаве. Први који је увидео везу између електричних појава и удара грома био је амерички научник и државник Бенџамин Френклин у XVIII веку. Такође, предложио је и принцип заштите зграда од удара атмосферског пражњења коришћењем уземљене металне шипке – громобрана, који функционише тако што метални проводник представља алтернативну путању атмосферског пражњења којом се обезбеђује сигуран пут наелектрисања до земље.

Даљи развој технологије током XIX и XX века омогућио је мерења различитих ефеката који су последица атмосферског пражњења, као што су емитована светлост, електромагнетско поље, струја у тачки удара и звук. До разумевања физичких процеса који се дешавају током атмосферског пражњења долази се на основу основних поставки физике електричних пражњења у гасу. Атмосферско пражњење управо представља електрични пробој на великим растојањима, при чему су електроде облак и земља, а гас између електрода је ваздух. Наелектрисање се простире механизмом лидера, при чему се успоставља канал атмосферског пражњења који спаја облак и земљу.

Према томе у ком смеру се лидер креће (од облака ка земљи или обрнуто) атмосферска пражњења се могу поделити на силазна и узлазна [1]. Поред тога, према знаку наелектрисања у облаку атмосферска пражњења се могу поделити на позитивна и негативна. У овом раду су разматрана негативна пражњења, с обзиром да ови удари чине око 90% свих пражњења између облака и земље. Канал атмосферског пражњења се састоји од танког централног језгра пречника пар центиметара које је веома проводљиво и око којег се налази корона омотач пречника реда величине метара.

## 1.1 Корона

Корона је парцијално пражњење које се дешава око оштрих електрода као што су игле, жице и ивице, при чему се јавља јако нехомогено електрично поље у ваздуху [2]. Ради се о слабо јонизованој и нискотемпературној плазми, што значи да није дошло до значајног загревања самог гаса ваздуха, док температура електрона може бити реда величине пар 10000 K. У таквој плазми доминантни су судари између електрона и неутралних атома и молекула. Услед њихове велике разлике у маси, при еластичном судару губитак енергије електрона је занемарљив, док при нееластичним сударима долази до потпуног преноса енергије. Управо ти судари су битни за генерисање нових честица, електрона и јона, процесима јонизације и припајања електрона.

У случају атмосферског пражњења улогу жице има високо проводљиво језгро. Може се сматрати да је већина наелектрисања депонована у корона омотачу, док кроз језгро веома велике проводљивости тече сва аксијална струја. Струја атмосферског пражњења која се јавља у тачки удара у објект на земљи не представља директно пражњење наелектрисања у облаку ка земљи, већ је последица неутрализације наелектрисања корона омотача. Из тог разлога је анализа динамике наелектрисања у корони кључна за разумевање процеса преноса наелектрисања из облака ка земљи.

Поред тога, код система за пренос електричне енергије корона се формира око надземних проводника високонапонских далековаода и опажа се светлосним и звучним ефектима, варницама и пуккетањем који постоје у нормалном радном режиму. У случају директних удара грома у надземни вод доћи ће до простирања ударног импулса дуж вода. Управо је корона главни ефекат који утиче на промену импулса током простирања и мора се узети у обзир при пројектовању заштите од пренапона.

Корона се углавном проучава у геометријским конфигурацијама коаксијалне жице и цилиндра, жице изнад проводне равни и шипке или игле изнад проводне равни. Постоје различите физичке карактеристике корона пражњења у зависности од поларитета примењеног напона. За потребе електроенергетике, симулације короне помоћу флуидних модела се често рачунају за једносмерне напоне који постоје у HVDC енергетским водовима због постојања равнотежног решења. Може се корисити једноставни модел монополарне расподеле просторног наелектрисања чија се расподела одређује методом коначних разлика или коначних елемената. Коначно, користе се и напреднији модели који узимају у обзир временску еволуцију позитивних и негативних јона, као и утицај атмосферских прилика као што је ветар.

## 2 ДРИФТ-ДИФУЗИОНИ МОДЕЛ

У овом раду биће извршена симулација корона пражњења помоћу дрифт-дифузионог модела који се дефинише на основу фундаменталних принципа кинетичке теорије гаса. Овај модел омогућава детаљну анализу временске еволуције и просторне зависности концентрације више типова честица које учествују у пражњењу у гасу [3]. Једначина дрифт-дифузионог модела је једначина континуитета код које са леве стране једнакости имамо збир првог извода концентрације  $n$  по времену и дивергенције флукса  $\vec{\Gamma}$ , а са десне стране једнакости чланове који представљају производњу и губитке честица.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\Gamma} = G. \quad (1)$$

Флукс има две компоненте, једну услед дрефта наелектрисаних честица у електричном пољу и другу која зависи од градијента концентрације и представља кретање услед дифузије.

$$\vec{\Gamma} = n\vec{W} - D\nabla n. \quad (2)$$

Брзина дрефта  $\vec{W}$  и коефицијент дифузије  $D$  се називају транспортним коефицијентима и њихове вредности зависе од односа интензитета електричног поља и концентрације молекула у гасу. Зависност од  $E/N_0$  се одређује експерименталним техникама или решавањем Болцманове једначине за једночестичну функцију расподеле при константном униформном електричном пољу. У литератури се могу наћи апроксимативни аналитички изрази који описују ове зависности за електроне у различитим гасовима.

Концентрација позитивних јона се у ваздуху састоји углавном од  $N_2^+$  и  $O_2^+$  јона који се генеришу процесима сударне јонизације или фотојонизације. Електрони који немају довољну енергију да изазову јонизацију, могу довести до екситације молекула. Приликом деекситације молекула емитују се фотони који могу узроковати даљу јонизацију.

Негативни  $O^-$  и  $O_2^-$  јони се генеришу услед два различита процеса припајања електрона у ваздуху. Када је јачина електричног поља велика, најзначајнији процес припајања електрона је дисоцијативно припајање приликом судара два тела, тако да се генеришу  $O^-$  јони. Негативни  $O_2^-$  јони се генеришу услед припајања електрона приликом судара три тела, што је доминантан процес када је јачина електричног поља ниска.

Сударна јонизација и припајање електрона при судару два тела имају заједничку особину да постоји енергија прага, односно минимална енергија која је потребна да би се процес догодио. Припајање електрона има праг на мањој вредности електричног поља него јонизација, па зато постоји вредност електричног поља када стопа јонизације постаје једнака стопи припајања. Мало изнад те вредности је тачка електричног пробоја у ваздуху.

Процеси који су такође узети у обзир при моделовању електричног пражњења у ваздуху су и одвајање електрона, које представља супротну реакцију од припајања електрона. Затим, када се позитивно и негативно наелектрисане честице довољно међусобно приближе долази до рекомбинације и губитака тих наелектрисаних честица. Поред рекомбинације електрона и позитивних јона, на високим вредностима притиска долази и до рекомбинације позитивних и негативних јона.

Код негативне короне је од посебног интереса узети у обзир процесе који се дешавају на самој жици која представља негативно наелектрисану катоду. Што се тиче електрона који се налазе у самом металу, енергија коју је потребно додати електрону да би напустио металну површину назива се излазни рад и представља карактеристику материјала од којег је сачињена жица. Ова количина енергије се може обезбедити на различите начине, међу којима су за корону најзначајнији удари позитивних јона и фотона на површину метала.

## 2.1 Модификовани дрефт-дифузиони модел

За дати напонски импулс, укупна генерисана подужна густина наелектрисања може се израчунати коришћењем дрефт-дифузионог модела. Поређење израчунате подужне густине наелектрисања са мереним подужним густинама наелектрисања у експериментима *Cooray*-а [4] приказано је у [3]. Поред тога у [5], дрефт-дифузиони модел је примењен на прорачун простирања ударног импулса дуж надземног вода, како би се симулирали резултати мерења које је извео *Wagner* [6]. Резултати су показали добро слагање за жице мањих полупречника до 5 mm. Међутим, када се дрефт-дифузиони модел примени на анализу короне око жица већег пречника, добијају се резултати који предвиђају мање изражене ефекте короне.

Ова разлика у резултатима за танке и широке жице може се објаснити ефектом стримера. Структура просторног наелектрисања око жице није радијално симетрични флуид, као што претпоставља дрефт-дифузиони модел. У стварности, просторно наелектрисање се састоји од танких филамената пражњења – стримера. Ови филаменти се састоје од главе стримера у којој се јавља фотојонизација и они се шире кроз простор остављајући иза себе слабо јонизовани реп. Њихова значајна карактеристика је да могу да се простиру чак и када је интензитет позадинског електричног поља мањи од критичног електричног поља за ударну јонизацију (око 2,6 MV/m за суви ваздух). Ово је могуће јер се у глави стримера генерише електрично поље веома високог интензитета и емитују се фотони који даље јонизују молекуле. Минимална вредност електричног поља за простирање позитивних стримера у ваздуху је 0,5 MV/m, а за простирање негативних стримера око 1 MV/m. Због стримера се додатно наелектрисање ствара у области даље од жице где електрично поље има мање вредности интензитета, што се не може узети у обзир код оригиналних 1D једначина дрефт-дифузионог модела. Иако је фотојонизација узета у обзир, стримери морају бити симулирани у 3D, што би захтевало значајно веће време рачунања.

Циљ је пронаћи начин да се 3D стример ефекат укључи у 1D симулацију модификацијом једначина дрефт-дифузионог модела. Један од начина да се то постигне је модификација вредности *Townsend*-овог коефицијента, који представља број парова електрона и позитивних јона који се генеришу по јединици дужине. При атмосферском притиску, вредност овог коефицијента зависи од интензитета електричног поља и минимална вредност за значајну јонизацију је  $8 \text{ cm}^{-1}$  када је интензитет електричног поља 2,6 MV/m. Модификација вредности се врши тако да *Townsend*-ов коефицијент има довољну вредност за значајну јонизацију када вредност електричног поља падне на одређену границу  $E_{min}$ . Вредност параметра  $E_{min}$  зависиће од полупречника жице. За танке жице вредности ће бити близу 2,6 MV/m, што значи да нема потребе за променом вредности *Townsend*-овог коефицијента. Како вредност полупречника жице расте, вредност параметра  $E_{min}$  ће се смањити на око 1 MV/m, што је минимално електрично поље за пропагацију негативног стримера.

## 3 QV КРИВЕ

QV кривом (*charhe-voltage curve*) се графички представља нелинеарна зависност генерисаног наелектрисања короне. У случају импулсног напона QV крива садржи хистерезис зато што наелектрисање које је генерисано током периода када је вредност напона расла се задржава у простору између електрода и опада спорије него напон. Оне

се користе за одређивање динамичке капацитивности потребне за укључивање ефекта короне у прорачун простирања транзијентних пренапонских таласа.

Различити једноставни инжењерски модели су осмишљени како би се процениле QV криве које се могу користити код прорачуна транзијентних пренапона дуж надземног вода. Ови модели се обично заснивају на претпоставци да је наелектрисање око проводника генерисано стримерима који се иницирају када јачина електричног поља достигне одређену критичну вредност. Обично се усваја да на свом путу стримери остављају за собом хомогену густину наелектрисања или се формира униформно електрично поље. Такав је и модел *Cooray*-а [4] код којег се QV крива рачуна генерисањем зоне позитивног наелектрисања које неутралише претходно негативно генерисано наелектрисање, слично као код модела корона омотача канала атмосферског пражњења.

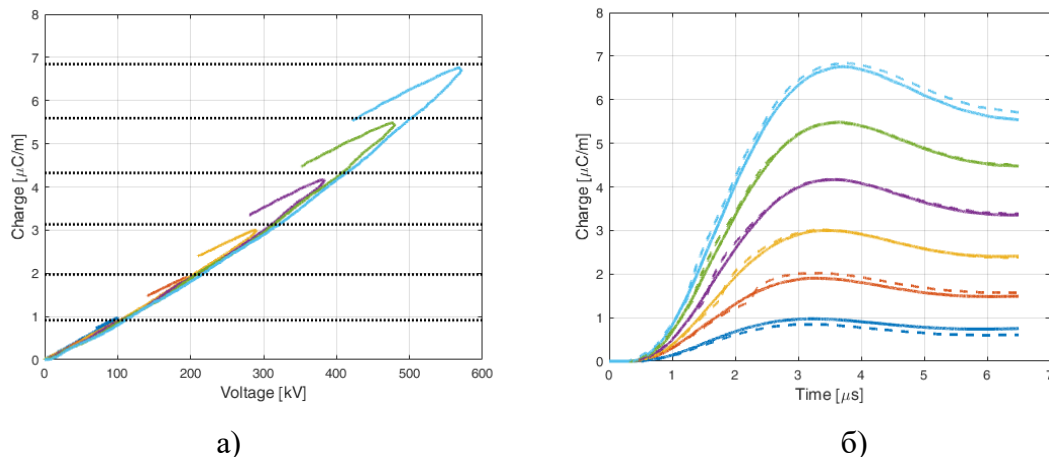
Према CIGRE моделу [7], генерисана подужна густина наелектрисања се одређује динамичком капацитивношћу која има параболичну зависност од примењеног напона. Параболична зависност је дефинисана у временском интервалу између тренутка када величина напона добије критичну вредност за почетак короне  $V_{kr}$  и тренутка када величина импулса достигне своју максималну вредност

$$C = C_0 \beta \left( \frac{V}{V_{kr}} \right)^{\beta-1}, \quad Q = C \cdot V, \quad \beta = 0.07r + 1.12 \quad (3)$$

Изван тог интервала динамичка капацитивност је једнака капацитету далековода  $C_0$ .

Након добијања резултата симулације за временску и просторну расподелу концентрација честица на основу дрефт-дифузионог модела, може се израчунати укупна подужна густина наелектрисања која се састоји од две компоненте: наелектрисање које се налази у простору око жице  $Q_p$  и наелектрисање генерисано на самој жици  $Q_c$ . Вредност  $Q_c$  компоненте се рачуна из услова да интеграл електричног поља мора бити једнак примењеном напону у сваком тренутку.

Ради поређења резултата дрефт-дифузионог модела са експерименталним мерењима, извршена је симулација корона пражњења око жице изнад земље у конфигурацији коју је користио Noda [8]. При овим мерењима жица полупречника 5 mm је постављена на висини од 1,83 m изнад земље. Измерене QV криве за негативне импулсе амплитуде до 600 kV су приказане на слици 1a. Целокупно трајање импулса напона је 6,5  $\mu$ s. На слици 1б можемо видети поређење измереног генерисаног наелектрисања и израчунатог наелектрисања коришћењем дрефт-дифузионог модела.



Слика 1. а) QV криве које је мерио Noda б) поређење измерених и рачунатих вредности

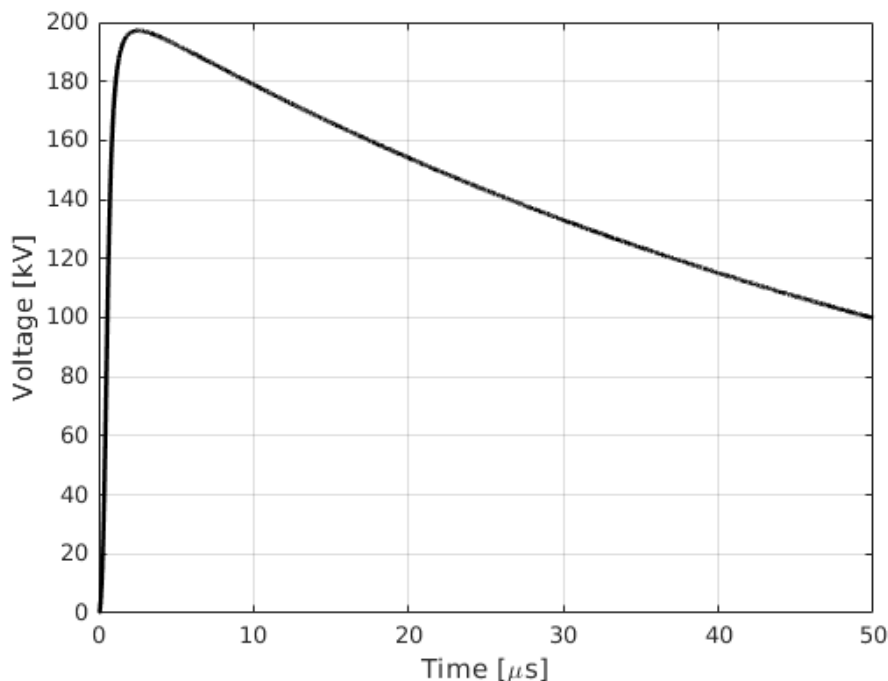
Да би се постигла добра сагласност са мерењима које је извршио *Noda*, неопходна вредност параметра  $E_{min}$  којом се модификује вредност *Townsend*-овог коефицијента је 1,5 MV/m. На овај начин смо успели да добијемо добра поклапања за све напонске импулсе које користи Нода, са амплитудама од 100-600 kV. Чињеница да се добра поклапања за све импулсе добијају јединственом модификацијом *Townsend*-овог коефицијента указује на то да образложење идеје модификације има смисла. Оваква врста оптимизације је оправдана, јер нас не занима детаљна микроструктура корона пражњења, већ је потребно само укупно генерисано наелектрисање, што је интегрална карактеристика пражњења. На слици 1а су хоризонталним црним линијама приказане максималне вредности подужног наелектрисања рачунате према CIGRE моделу, који у случају приказаних мерења даје врло тачна предвиђања.

#### 4 КОРОНА УСЛЕД ИМПУЛСА АТМОСФЕРСКОГ ПРАЖЊЕЊА

Аналитичка функција која се користи за представљање временске зависности струје и напона при удару атмосферског пражњења је *Heidler*-ова функција, која показује висок степен флексибилности у избору вредности параметара. Подаци добијени из мерења напона се најбоље представљају збиром две *Heidler*-ове функције

$$V(t) = V_1 + V_2, \quad V_j(t) = V_{mj} \frac{(t/\tau_{1j})^{n_j}}{1+(t/\tau_{1j})^{n_j}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{2j}}\right), \quad j = 1, 2, \quad (4)$$

где су  $\tau_{1j}$  и  $\tau_{2j}$  времена чије се вредности добијају преко фитовања функције. Ради тестирања опреме и изолације у лабораторији, импулс струје или напона се дефинише стандардним импулсом атмосферског пражњења чије је време чела 1,2  $\mu$ s, а време зачеља 50  $\mu$ s. На слици 2 се може видети пример оваквог напонског импулса амплитуде 200 kV које је користио *Cooray* [4] у својим експериментима.



Слика 2. Стандардни напонски импулс атмосферског пражњења 1,2/50  $\mu$ s

Извршићемо симулацију короне при стандардном импулсу атмосферског пражњења у истој геометрији која је описана у претходном поглављу за мерења које је извршио *Noda*. Напонски импулси ће имати исте амплитуде као на слици 1а и добијена максимална вредност подужног наелектрисања ће бити поређења са предвиђањима CIGRE параболичног модела. Из једначине (3) се види да CIGRE модел захтева познавање критичног напона  $V_{kr}$  за појаву корона пражњења. У инжењерској пракси за најчешће користи *Peek*-ова формула [9] за критичну вредност електричног поља уз саму жицу које је потребно за почетак короне

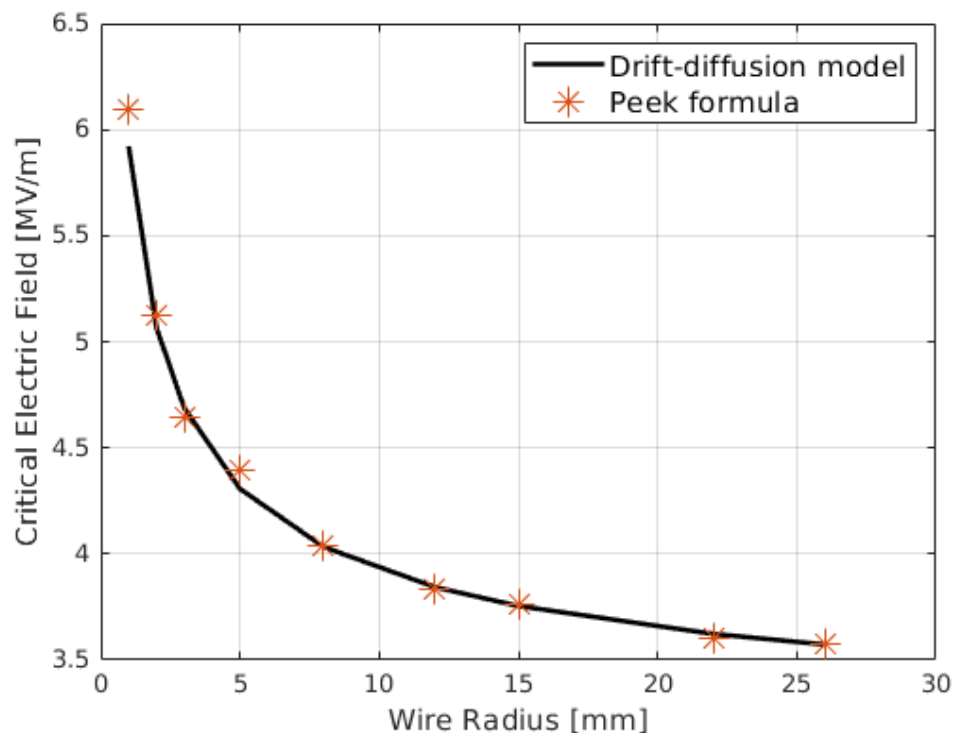
$$E_{kr} = 3.15 \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{r[\text{cm}]}} \right) \frac{\text{MV}}{\text{m}}. \quad (5)$$

Критично електрично поље ће зависити од полупречника жице  $r$  око које се јавља корона. Критични напон који генерише ову вредност електричног поља се може прорачунати узимајући у обзир геометрију друге електроде, у овом случају висину на коју је постављена жице изнад земље  $H$ :

$$V_{kr} = E_{kr} r \log 2H/r. \quad (6)$$

Дакле, битно нам је да дрифт-дифузни модел тачно предвиди критични напон при којем се јавља корона и максималну вредност генерисаног подужног наелектрисања.

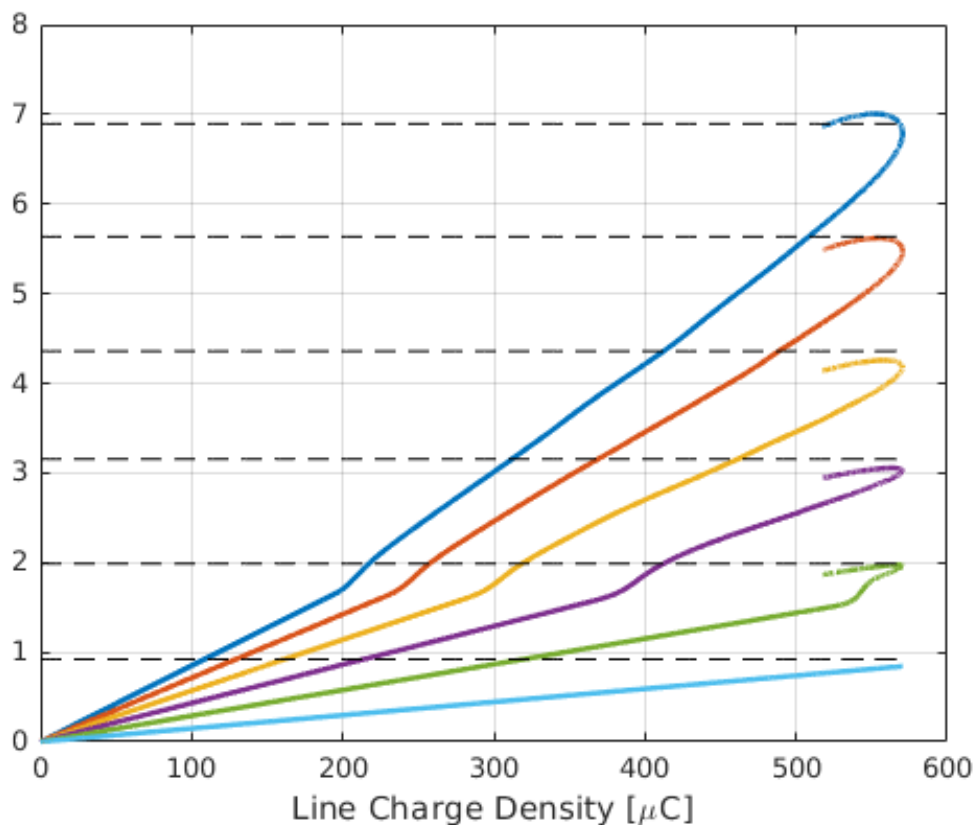
На слици 3 је приказано поређење вредности критичног електричног поља добијеног на основу *Peek*-ове формуле и резултата добијеног помоћу дрифт-дифузионог модела. Видимо да постоји добро слагање резултата за опсег вредности полупречника жице од врло танких до широких.



Слика 3. Критично електрично поље за појаву короне рачунато помоћу дрифт-дифузионог модела и *Peek*-ове формуле

Овде се поставља питање како дефинисати критеријум за појаву короне на основу резултата дрефт-дифузионог модела, с обзиром да симулације показују да ће и за мање напоне доћи до генерације наелектрисаних честица око жице. Међутим, за напоне мање од критичног, концентрације наелектрисаних честица ће у року од пар микросекунди достићи максималне вредности и неће утицати на расподелу електричног поља око жице. Стога је усвојено да је дошло до појаве парцијалног пражњења када око жице долази до промене расподеле електричног поља које би постојало у вакууму. Тада се у спољашњем колу поред струје кондензатора детектује и струја короне.

Остало је да извршимо симулације короне услед стандардног импулса атмосферског пражњења у трајању од  $50 \mu s$  за вредности амплитуда као у мерењима на слици 1а. Резултати прорачуна QV крива су приказани на слици 4, а испрекиданим хоризонталним линијама су приказане процене максималног генерисаног подужног наелектривања на основу CIGRE модела. Добро слагање је постигнуто за вредности параметра  $E_{min}=1,7 \text{ MV/m}$  која је мало већа од вредности  $1,5 \text{ MV/m}$  која је коришћена да би се добило слагање са прорачунима приказаним на слици 1б. Могуће да разлика постоји услед наглог пораста вредности напона стандардног импулса у односу на мерења која је извршио *Noda*.



Слика 4. QV криве у случају стандардног импулса атмосферског пражњења

## 5 ЗАКЉУЧАК

Показано је да поред тога што може да пружи детаљну слику временске и просторне зависности концентрације наелектрисаних честица током корона пражњења, дрефт-дифузиони модел може да се користи за процену укупног подужног наелектрисања. Ово одређивање зависности подужног наелектрисања короне од примењеног напона је битно због прорачуна простирања ударних импулса дуж надземних водова. Извршене су симулације короне услед стандардног импулса атмосферског пражњења амплитуде 100-600 kV. Резултати симулације су показали добро слагање са предвиђањима CIGRE модела за максималну вредност подужног наелектрисања короне, као и за критичну вредност напона за појаву короне према *Peek*-овој формули. Слагање резултата симулације са мереним вредностима указује да се дрефт-дифузиони модел може користити за теоријску анализу микропроцеса током корона пражњења.

## 6 ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. R. Hileman, „Insulation Coordination for Power Systems“, Taylor & Francis, Boca Raton, USA, 1999
- [2] Y. Raizer, „Gas discharge physics“, Springer-Verlag, Berlin, 1991
- [3] M. Ignjatovic, J. Cvetic, “Drift-diffusion model of corona discharge in coaxial geometry due to negative lightning impulse voltage”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, Vol. 129, 106815
- [4] V. Cooray, „Charge and Voltage Characteristics of Corona Discharges in a Coaxial Geometry“, IEEE Trans Dielectr Electr Insul 2000, Vol. 7, No. 6, pp. 734–743.
- [5] M. Ignjatovic, J. Cvetic, D. Pavlovic, „The Influence of Corona on the Lightning Surge Propagation Along Transmission Lines”, Proc. of the 6th IcETRAN, 2019, pp. 103-106
- [6] C.F.Wagner, I. W. Gross, B. L. Lloyd, “High-Voltage Impulse Tests on Transmission lines”, AIEE Trans., 1954., pp. 196-210.
- [7] CIGRE WG 33, "Distorsion and attenuation of travelling waves caused by transient corona", Cigre Brochure 55, 1989.
- [8] T. Noda, T. Ono, H. Matsubara, H. Motoyama, S. Sekioka and A. Ametani, "Charge-Voltage Curves of Surge Corona on Transmission Lines: Two Measurement Methods", IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, Vol. 18, No. 1, pp. 307-314
- [9] F. W. Peek, "Dielectric phenomena in HV engineering", McGraw-Hill, 1929.