



Благоја Марковски
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии, Скопје

Леонид Грчев
Македонска академија на науките и уметностите, Скопје

Владимир Ѓоргиевски
Бодан Велковски
Марија Марковска Димитровска
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии, Скопје

КОМПЈУТЕРСКИ МОДЕЛ ЗА ПРЕЦИЗНА АНАЛИЗА НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИ ПОЈАВИ ВО ЕНЕРГЕТСКИ СИСТЕМИ

КУСА СОДРЖИНА

Прецизното моделирање на електромагнетни појави во енергетските системи е од голема важност поради: 1) обезбедување заштита на енергетските системи и луѓето во нивната околина, 2) оптимален дизајн на мерките за заштита од електромагнетни влијанија. Во инженерските анализи вообичаена е примената на компјутерски модели кои поради усвоените упростувања најчесто имаат ограничен домен на примена во нискофреквентни анализи, анализи на системи во присуство на хомогена земја или системи со мали димензии. Треба да се истакне дека честа е употребата на овие модели во практични анализи и надвор од нивниот домен на примена, што може да резултира со погрешна проценка на безбедносните ризици или несоодветно димензионирање на заштитата.

Во овој труд ќе биде претставен компјутерски модел за анализа на електромагнетни појави во енергетски системи кој се базира на примена на егзактна електромагнетна теорија, а кој обезбедува резултати со висока точност кај надземни и подземни сложени системи во присуство на слоевата земја во фреквенциски опсег од 0 Hz до 100 MHz.

Моделот има широк домен на примена во инженерски анализи, а неговите можности ќе бидат демонстрирани преку неколку карактеристични примери: 1) моделирање на заштитно заземјување, проценка на напони на чекор и допир и преоден потенцијал при удар на гром кај трафостаница, 2) анализа на голем заземјувач кај фотоволтаична централа со инсталирана моќност од 60 MW, 3) моделирање на електрично и магнетно поле во околина на далеководи од аспект на проценка на безбедност на луѓе и опрема од електромагнетни влијанија, 4) анализа на електромагнетни влијанија врз цевководни системи, кои се предизвикани од блиски енергетски водови и заземјувачки системи. Во трудот ќе бидат дискутирани и техничко-економските придобивки од примената на овој модел.

Клучни зборови: Електромагнетен модел, електромагнетни влијанија, електрично поле, магнетно поле, заземјување, цевковод, далековод, трафостаница, фотоволтаична централа.

1 ВОВЕД

Важен аспект во проектирањето на електроенергетските системи е проценката на нивното влијание врз безбедноста на луѓето и другите системи во нивната околина. Електроенергетските водови во својата околина создаваат електрично и магнетно поле на ниски фреквенции кои во

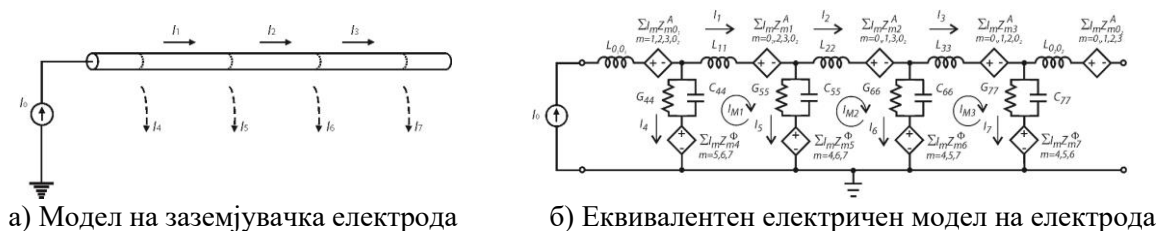
одредени околности можат да ја загрозат безбедноста на луѓето, особено на оние со електронски медицински помагала или пак на оние кои се долготрајно изложени на магнетно поле со зголемен интензитет [1-2]. Енергијата на електричното и магнетното поле може да се пренесе кон блиски системи (сигнални водови, цевководи, чувствителни електронски кола и слично) по принципот на електромагнетна индукција, при што во истите се индуцираат напони кои можат да ја нарушат нивната работа, да предизвикаат нивно оштетување или пак да предизвикаат опасност по безбедноста на луѓето кои се во контакт со овие системи [3-8]. Во случај на доземен спој во електроенергетскиот систем, дел од струјата се враќа кон изворот на енергија преку земја, што пак предизвикува повишување на потенцијалите на сите поврзани метални делови на заземјувачот низ кој се води оваа струја, но и на околната земја околу заземјувачот. Во фазата на проектирање на енергетски или индустриски постројки, треба да бидат земени предвид барањата за безбедност кои се однесуваат за ограничување на напони на чекор и допир во рамки на предметната постројка, но и пошироко за сите метални структури кои влегуваат во зоната на повишен потенцијал на земјата [9-11]. Проблем кој не е доволно разбран е и заштитата од удар на гром, каде правилата за димензионирање на заземјување за одведување струи на 50 Hz не важат подеднакво и за импулсна струја со фреквенциска содржина до десетици MHz [12-14]. Според горенаведеното, проблемите поврзани со електромагнетни појави кај енергетските системи можат да бидат од различна природа.

Компјутерското моделирање на електромагнетни појави претставува ефикасен начин за нивна проценка и третман при проектирањето на енергетските системи, но и за анализи кај големи и сложени системи каде мерењата може да бидат долготрајни, скапи или непрактични. Поради разновидноста на проблемите, развиени се бројни компјутерски модели кои се оптимизирани но и ограничени за примена во анализи на конкретни проблеми. Во инженерските анализи вообичаена е примената на компјутерски модели кои поради усвоените упростувања најчесто имаат ограничен домен на примена во нискофреквентни анализи, анализи на системи во присуство на хомогена земја или системи со мали димензии. Треба да се истакне дека честа е употребата на овие модели во практични анализи и надвор од нивниот домен на примена, каде воведената грешка во пресметките е непозната, а тоа може да резултира со погрешна проценка на безбедносните ризици или несоодветно димензионирање на заштитата.

Во овој труд е претставен компјутерски модел за анализа на електромагнетни појави во слоевитата средина кој се базира на примена на егзактна електромагнетна теорија и решавање на електромагнетниот проблем со примена на Методот на моменти [15]. Моделот се базира на минимални апроксимации споредено со други вообичаено користени модели, а тоа овозможува негова примена во широк домен на апликации, вклучувајќи надземни и подземни сложени системи во присуство на повеќеслојна земја, во фреквенциски опсег од 0 до 100 MHz. Поради високата точност, електромагнетниот модел може да се користи за добивање референтни резултати и овозможува тестирање на точноста на други компјутерски модели базирани на повисок степен на упростување.

2 КРАТОК ОПИС НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИОТ МОДЕЛ

Електромагнетниот модел претставен во овој труд е базиран на компјутерски модел кој првично е развиен за анализи на антени, а потоа истиот е адаптиран и применет за анализа на високофреквентни појави кај заземјувачки системи [16-20]. Базиран е на примена на методот на моменти (МоМ) и т.н. апроксимација на тенки жици, каде анализираните структури се третираат како систем од меѓусебно поврзани тенки цилиндрични спроводници кои се наоѓаат во неограничен простор. Тоа го прави оптимален и ефикасен модел за моделирање електромагнетни проблеми кај заземјувачи, енергетски и сигнални водови или цевководи, т.е. структури кои се составени или може да се моделираат со еквивалентни изолирани или неизолирани цилиндрични спроводници. Во моделот се имплементирани равенки кои во егзактна математичка форма ги опишуваат електромагнетните појави во присуство на повеќеслојна земја, но на едноставен начин може да се имплементираат и различни поедноставени форми на овие равенки со што се овозможува испитување на доменот на примена на поедноставени модели [21-22].



а) Модел на заземјувачка електрода

б) Еквивалентен електричен модел на електрода

Слика 1 Пример за моделирање на кратка хоризонтална заземјувачка електрода во електромагнетниот модел и еквивалентно коло кое произлегува од примената на МоМ

Електромагнетниот модел да третира различни облици на побуда на системите: со напонски и струјни извори, атмосферско празнење или електромагнетен импулс од природен или вештачки извор. Моделот овозможува пресметка на распределба на струи низ анализираната структура и низ околната земја, пресметка на импеданси во различни точки на поврзување на структурата вклучително и импулсна импеданса, распределба на потенцијали на структурата и околната земја, пресметка на напони на допир и чекор, индуцирани напони во други блиски системи, електрично и магнетно поле околу анализираната структура итн. [23].

Овие карактеристики на моделот овозможуваат негова широка примена во различни области на истражување и практична примена во изработка на проекти и студии поврзани со:

- Димензионирање на заземјувачки системи во трафостаници, индустриски постројки и фотоволтаични центри од аспект на постигнување соодветна импеданса на заземјување во стационарен и преоден режим, димензионирање на соодветни карактеристики, облик и густина на мрежата со цел постигнување безбедни напони на допир, чекор и заштита на опрема. Важен аспект при овие анализи е можноста за третман на земјата како повеќеслојна средина.
- Моделирање на електрично и магнетно поле во околината на електроенергетски водови со цел да се избегнат ситуации во кои би се надминале безбедните нивоа за јавно изложување на луѓе, примена во процена на ризик од интерференција врз чувствителна електронска опрема во близина на водовите итн.
- Проценка на електромагнетни влијанија врз цевководни системи, кои се предизвикани од блиски електроенергетски водови, постројки и заземјувачи. Кај системи со комплексна изведба во кои се присутни комбинирани механизми на електромагнетно влијание, електромагнетниот модел се користи во комбинација со модел базиран на теорија на преносни водови кој е оптимизиран за анализа на овој тип на системи.

Во следниот текст ќе бидат демонстрирани можностите на електромагнетниот модел и ќе бидат дискутирани техничко-економските придобивки од примената на овој модел.

3 ОБЛАСТИ НА ПРИМЕНА НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИОТ МОДЕЛ

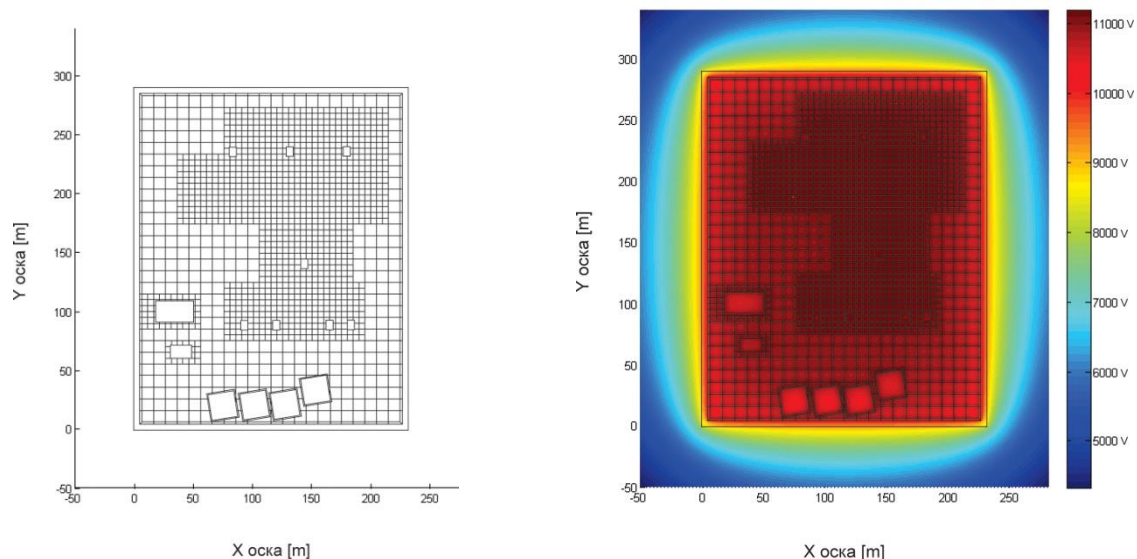
3.1 Анализа на напони на чекор и допир при доземен спој во трафостаница

Во дадениот пример се прикажани резултати од пресметка на напони на чекор и допир при доземен спој во трафостаница. Резултатите се дел од студија во која е вршено испитување на различни изведби на заземјувачот на трафостаница, сè до исполнување на барањата за безбедност на луѓе поставени во стандардите [9-10]. Анализата се однесува на мрежест заземјувач со димензии од приближно 240 x 300 m, поставен во земја со висока специфична отпорност на плото која изнесува $\rho = 1000 \Omega\text{m}$.

Со електромагнетниот модел е извршена пресметка на потенцијалите на мрежестиот заземјувач и потенцијалите на површина на земја околу заземјувачот во однос на далечна референтна точка на нулти потенцијал, а преку нив е направена пресметка на напоните на чекор и напоните на допир согласно насоките дадени во стандардите [9-10].

За анализираниот пример, поради големиот специфичен отпор на плото, речиси идентични резултати се добиваат и со примена на поедноставен компјутерски модел базиран на

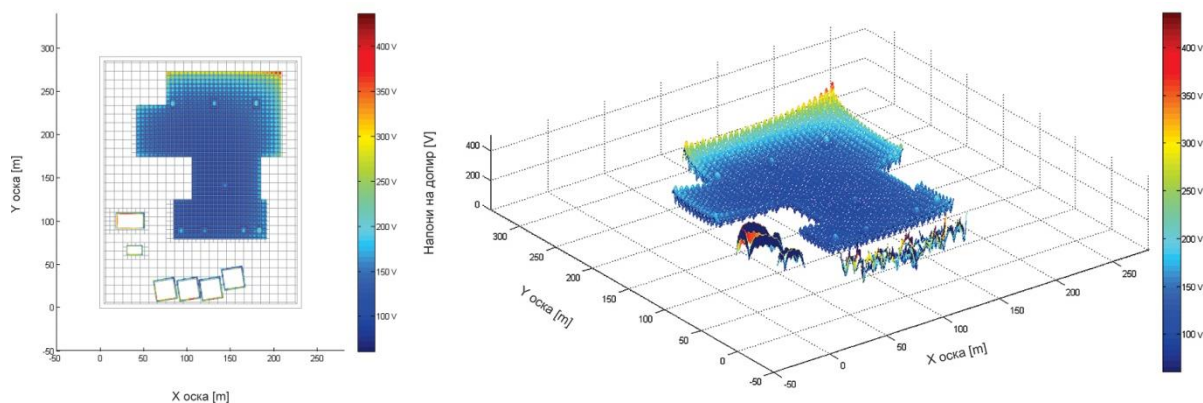
нискофреквентна апроксимација и со модел базиран на претпоставка за екипотенцијален заземјувач. Сепак треба да се истакне дека пресметковната ефикасност на електромагнетниот модел при анализи на заземјувачот во повеќеслојна земја е неколку пати поголема од ефикасноста на другите упростени модели. Со применетите математички егзактни равенки, повеќекратната рефлексија на електромагнетните бранови која се јавува меѓу разделните површини на земјата се решава во еден чекор, додека кај упростените модели базирани на нискофреквентна апроксимација, овие рефлексии се решаваат итеративно од неколку десетици до неколку стотици итерации. Времетраењето на пресметките е особено битно при изборот на оптимална изведба на заземјувачот чие моделирање може да претрпи многу измени до постигнување на крајното решение.



а) Дизајн на заземјувачот

б) Потенцијали на површина на земја при доземен спој

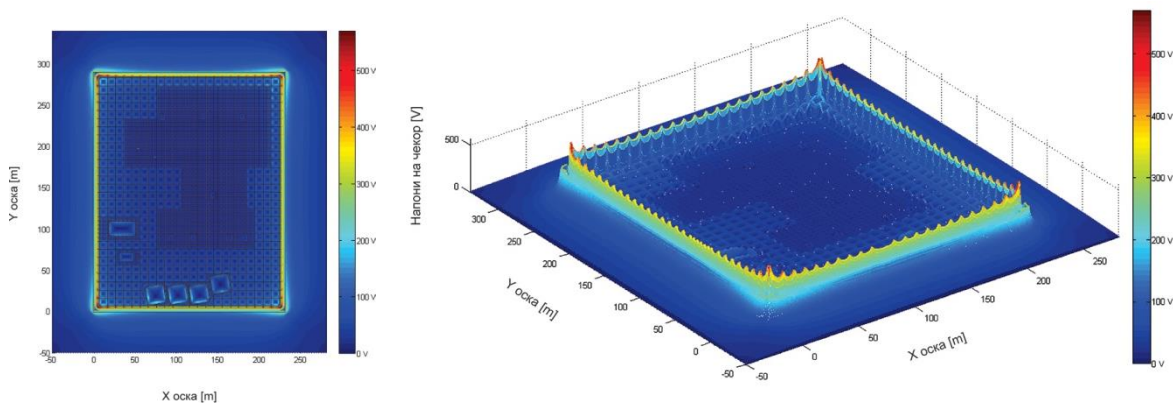
Слика 2 Дизајн на мрежест заземјувач на трафостаница и пресметани потенцијали на земја



а) 2D приказ на напони на допир

б) 3D приказ на напони на допир

Слика 3 Напони на допир во однос на достапни метални структури во трафостаница



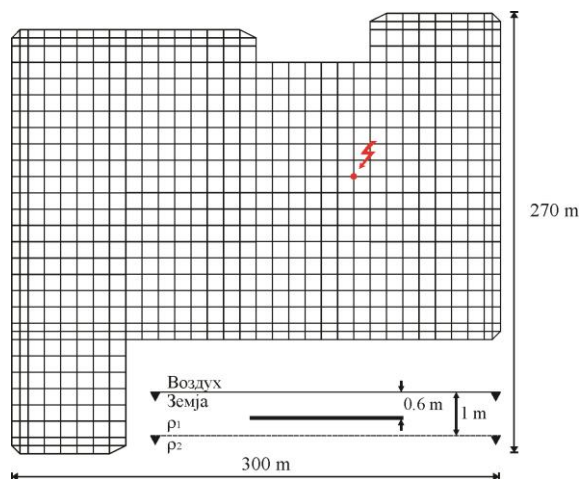
а) 2Д приказ на напони на чекор

б) 3Д приказ на напони на чекор

Слика 4 Напони на чекор при доземен спој во трафостаницата

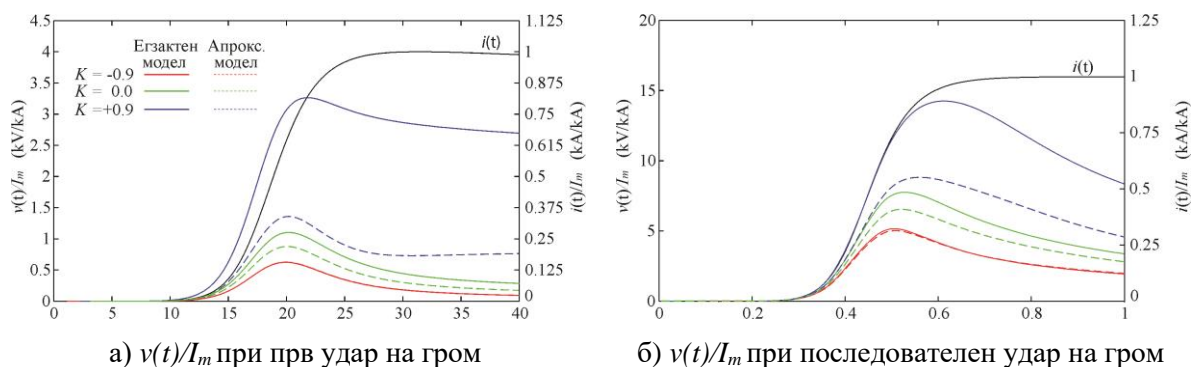
3.2 Пресметка на преодни потенцијали кај мрежест заземјувач при удар на гром

Во овој пример е анализиран мрежест заземјувач на трафостаница кој е побуден со импулсна струја со облик кој одговара на прв и последователен удар на гром. Пресметан е преодниот потенцијал во местото каде струјниот импулс се инјектира во заземјувачот. Во анализите е земен предвид и придонесот на слоевитиот карактер на земјата со која е опкружен заземјувачот, изразен преку факторот на рефлексија на двослојна земја K . Анализата е вршена со егзактниот електромагнетен модел и со електромагнетен модел во кој е применета нискофреквентна апроксимација на равенките со кои се моделираат електромагнетните појави. Детали за димензиите, изведбата на заземјувачот и местото на побуда се прикажани на Слика 5.



Слика 5 Мрежест заземјувач во двослојна земја, побуден со импулсна струја која одговара на прв и последователен удар на гром

За горниот слој на земја е усвоена специфична отпорност $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$, а за долниот слој на земја се усвоени три карактеристични вредности $\rho_2 = 5.26, 100$ и $1901 \Omega\text{m}$, кои соодветствуваат на $K = -0.9, 0.0$ и $+0.9$. Струјните импулси се моделирани со карактеристики T_{max}/T_2 еднакви на $10/350 \mu\text{s}$ и $0.25/100 \mu\text{s}$ за прв и последователен удар на гром, соодветно, каде T_{max} е време на пораст на струјата до максимална вредност, а T_2 време на опаѓање на струјата до 50% од својот максимум.



Слика 6 Нормализирана вредност на преоден потенцијал $v(t)$ за импулсна струја со $I_m = 1$ A [20]

Резултатите дадени на Слика 6 покажуваат дека при проектирање на заштита од удар на гром, примената на поедноставени модели базирани на нискофреквентна апроксимација може да воведо грешка во пресметките до 50%. Во сите случаи, резултатите добиени со поедноставениот модел ги потценуваат пресметаните преодни потенцијали на заземјувачот со што неговата примена во проектирање на заштита може да ја наруши безбедноста на анализираната структура.

Обемните анализи во [12-14] во кои е третирана ефикасноста на различни облици на заземјувачи, а кои се извршени со примена на егзактниот електромагнетен модел, покажуваат дека при проектирањето на громобранско заземјување не е доволно само да се постигне ниска отпорност на заземјувачот, туку во иницијалниот период на струјниот импулс огромно влијание врз способноста за брзо одведување на импулсна струја и намалување на преодниот потенцијал има и геометрискиот облик на заземјувачот.

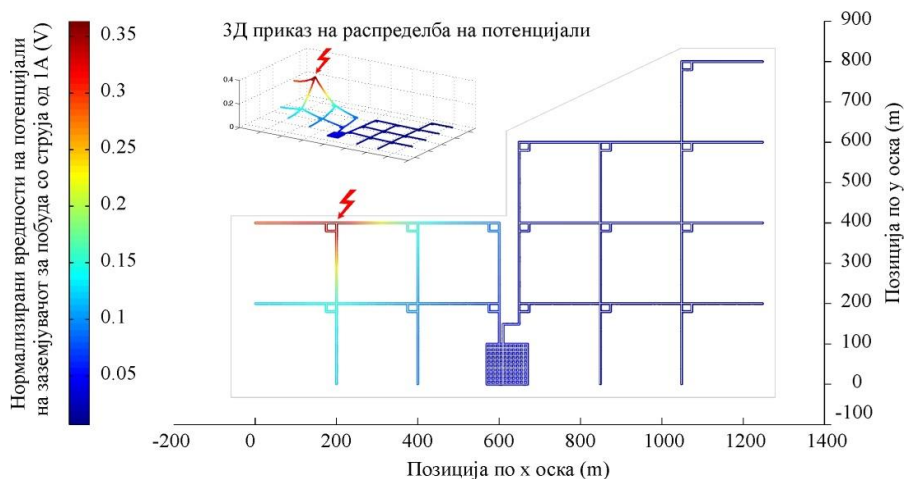
3.3 Моделирање на заземјувач кај фотоволтаична централа

Фотоволтаичните центри, особено оние со инсталирана моќност од неколку MW, зафаќаат големи површини па мерките за намалување на ризикот од опасни напони на чекор и допир, кои вообичаено предвидуваат примена на густа мрежа од заземјувачки електроди, тампонирање или асфалтирање на подлогата се најчесто неприменливи. Според насоките дадени во [24], заземјувачите кај фотоволтаични центри се изведуваат со ретко поставени заземјувачки траки или окна со димензии од по неколку десетици до неколку стотици метри, како што е прикажано на Слика 7. Во тие околности, намалување на напоните на чекор и допир се постигнува преку поврзување на заземјувачките траки со металните носечки столбови на панелите, кои со својот подземен дел формираат сложен облик на заземјувач, односно имаат ефект на густо распределени но плитки меѓусебно поврзани вертикални сонди, како што е прикажано на Слика 8. Воведувањето на многубројните столбови и нивните меѓусебни поврзувања значително го усложнува моделот на заземјувачот и ја зголемува потребата од компјутерски ресурси, но и наметнува потреба од примена напреден и оптимизиран компјутерски модел за анализа на заземјувачки системи кој може да овозможи детално моделирање на големи структури со подземни и надземни компоненти.

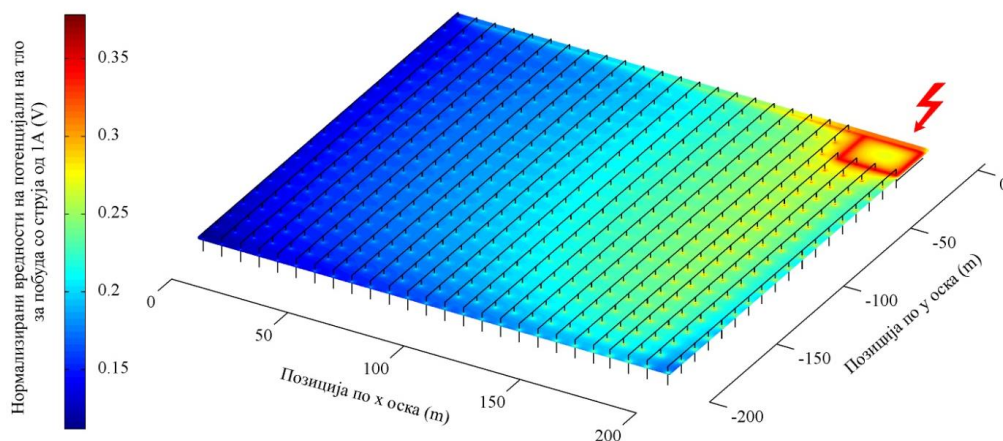
Врз основа на горенаведеното може да се констатира дека моделирањето на заземјувачи и анализите на напони на чекор и допир кај фотоволтаични центри воведува низа предизвици во споредба со моделирањето на мрежести заземјувачи кај електроенергетски објекти и трафостаници. Нивното моделирање поставува барања кои ги надминуваат можностите на повеќето компјутерски програми и модели за безбедносни анализи кај заземјувачки системи. Но деталниот модел на целата структура наметнува потреба и од значителни мемориски и пресметковните ресурси кои лесно ги надминуваат можностите на стандарден домашен компјутер. Со цел да се избегнат овие ограничувања, се применуваат соодветни техники за анализа на големиот проблем преку делење на повеќе помали проблеми, за што е неопходен темелен инженерски и истражувачки пристап кон проблемот.

Поради димензиите на анализирана структура, поедноставните модели базирани на претпоставка на еквипотенцијален заземјувач се неприменливи дури и за анализи на ниски фреквенции, а тоа може да се воочи и од резултатите прикажани на Слика 7. Предноста на

електромагнетниот модел е во неговата можност за прецизна анализа на напоните на чекор и допир кај овие сложени заземјувачки системи и можноста за испитување и моделирање на оптимални мерки за подобрување на безбедноста во фотоволтаичната централа.



Слика 7 Дизајн на заземјувач на фотоволтаична централа со инсталирана моќност од 60 MW и пресметани потенцијали на заземјувачот во случај на доземен спој на среднонапонска страна



Слика 8 Распределба на потенцијали на површина на земја во горниот лев блок од фотоволтаичната централа

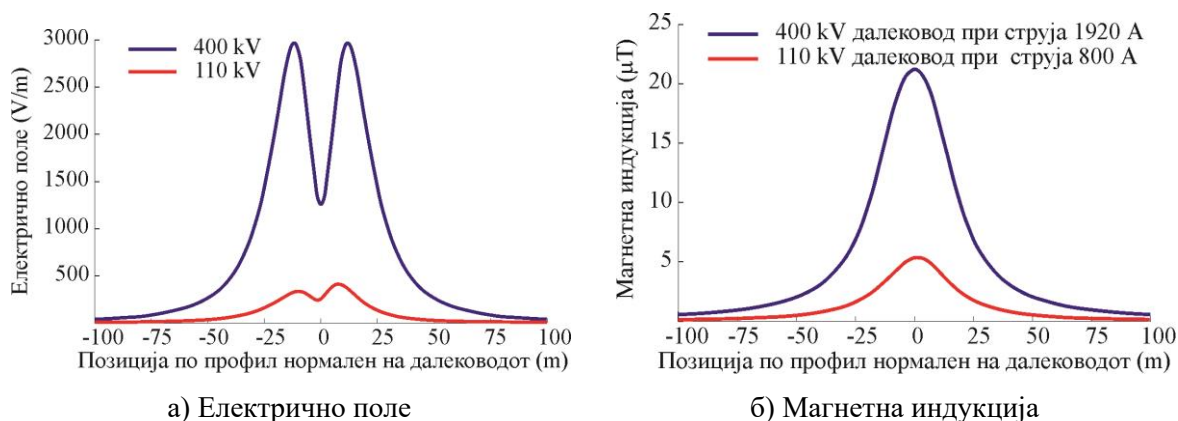
3.4 Пресметка на електрично и магнетно поле во околина на далековод

Електроенергетските водови во својата околина создаваат електрично и магнетно поле на ниски фреквенции, кои во одредени околности можат да ја загорзат безбедноста на луѓето, да предизвикаат пречки во работењето на чувствителна електронска опрема или пак да пренесат енергија кон други блиски системи по принципот на електромагнетна индукција.

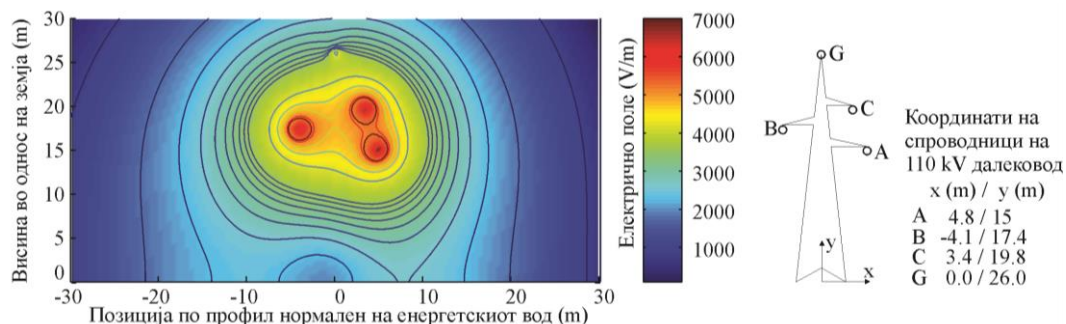
Референтни вредности за безбедно јавно изложување на луѓе на електромагнетни полиња се дефинирани во [1]. Во фазата на проектирање на електроенергетски вод, задача на проектантите е да избегнат ситуации кои би довеле до неусогласеност на интензитетот на генерираното електрично и магнетно поле со овие референтни вредности. Нивната усогласеност се испитува преку пресметка на вредностите на електричното и магнетното поле долж трасата на електроенергетските водови, при различни конфигурации и растојанија меѓу водовите, висини на водовите во однос на земја и карактеристики на околната средина.

На Слика 9 е прикажан пример за пресметани вредности на електрично поле и магнетна индукција генерирани од 110 kV и 400 kV далековод. Пресметките се извршени долж профил со должина од 200 m кој е нормален на трасата на далеководот, на висина од 1 m од површина на земја, согласно барањата поставени во стандардот [25].

На Слика 10 е прикажан пример за пресметани вредности на електрично поле во пошироката околина на 110 kV далековод. Ваков тип на анализа е од интерес за студии поврзани со влијанието на далеководот врз животната средина, но и за испитување на влијанието на електрично и магнетно поле врз чувствителна електронска опрема која може да се најде во близина на далеководот.



Слика 9 Промена на електрично поле и магнетна индукција под 110 kV и 400 kV далеководи при максимална трајна струја низ фазните спроводници



Слика 10 Просторна распределба на електрично поле во околина на 110 kV далековод

Слични резултати може да се добијат и со други компјутерски алатки, на пример со примена на програмата FEMM 4.2 [26], но електромагнетниот модел има значително повисока пресметковна ефикасност што е од особена важност при вршење обемни параметарски анализи долж трасата на далеководот и нуди можности подетално моделирање на водовите, може да го земе предвид влијанието врз распределбата на електрично и магнетно поле од присуство на метални структури во близина на водот како и да го определи електромагнетното влијание на електроенергетските водови врз други системи. Примената на електромагнетниот модел може да се смета за ефикасна замена на мерењата на електрично и магнетно поле околу електроенергетски водови кои може да бидат долготрајни, скапи или непрактични.

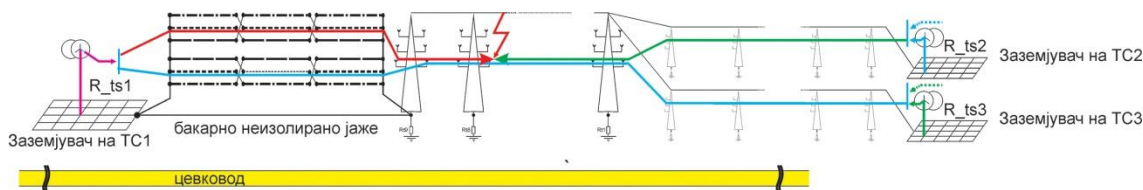
3.5 Анализа на електромагнетно влијание на електроенергетски водови и постројки врз цевководни системи

Цевководните системи за нафта и гас честопати влегуваат во зоната на влијание од елементи на електроенергетскиот систем. Во случај на доземен спој на енергетски вод, можат да се индуцираат високи напони на цевководот, како резултат на различни механизми на меѓусебна електромагнетна интеракција. Поради добрата електрична изолација на цевководите, овие напони се простираат на голема оддалеченост од местото на доземен спој, а можат да резултираат со електричен удар врз луѓето кои се во контакт со достапни делови на цевководот, да предизвикаат оштетување на приклучената електрична опрема и нарушување на неговиот интегритет. Со цел да се обезбедат соодветни заштитни мерки, неопходна е анализа на меѓусебните влијанија во фазата на проектирање на овие системи.

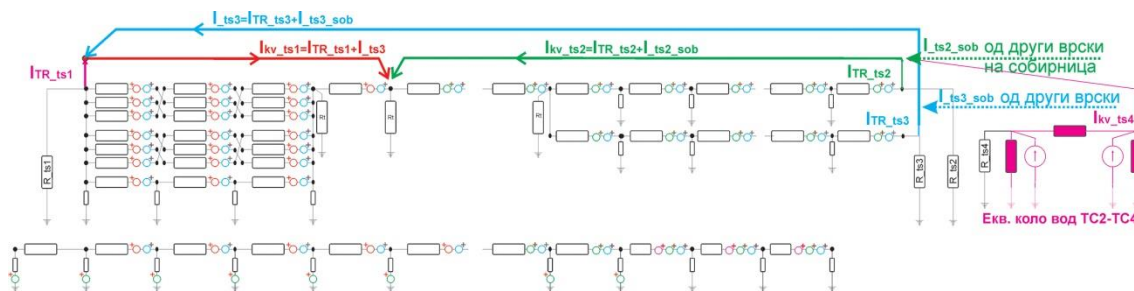
Електромагнетните влијанија меѓу електроенергетските и цевководните системи вообичаено се пресметуваат со метод базиран на теорија на преносни водови, кој е оптимизиран за ваков тип на анализи [5, 27]. Овој метод применува повисок степен на апроксимација на електромагнетните појави споредено со електромагнетниот модел, а неговата примена е отежната во случаи кога е присутен механизмот на спроводно влијание од заземјувачки системи врз цевководи. Електромагнетниот модел во комбинација со моделот базиран на теорија на преносни овозможува анализи на сложени ситуации на електромагнетни влијанија, каде едновремено се присутни повеќе механизми на влијание, вклучувајќи и влијанија од големи мрежести заземјувачи врз цевководот.

На Слика 11 е прикажан случај во кој едновремено се присутни повеќе механизми на краткотрајно електромагнетно влијание на електроенергетски водови и заземјувачи врз гасовод, а на Слика 12 е прикажано еквивалентното електрично коло со кое се моделираат електромагнетните влијанија меѓу системите. Резултатите од симулациите прикажани на Слика 13 овозможуваат детален увид во влијанието на различни елементи на ЕЕС врз гасоводот. Одделно се прикажани придонесите од индуктивните и спроводните влијанија врз гасоводот, потенцијалите на плото околу гасоводот и кумулативното дејство на сите механизми на влијание изразено преку напонот помеѓу металот на цевката и околната земја [27].

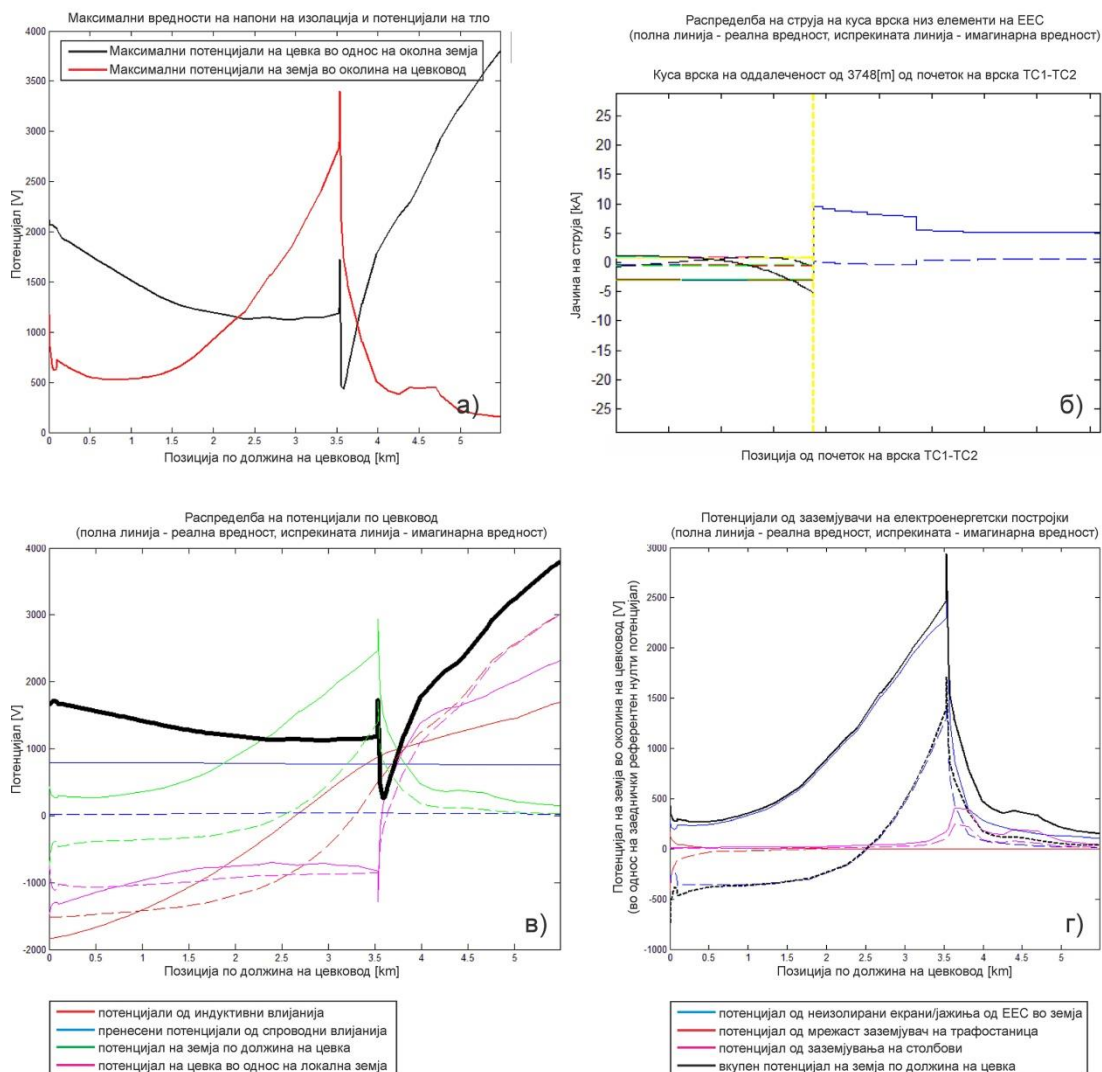
Високата точност на моделот и деталниот увид во придонесите од различните извори на влијанија овозможуваат прецизно утврдување и оптимален избор на мерки за заштита на гасоводот, а тоа резултира со намалување на трошоците за заштита и зголемување на сигурноста на системот.



Слика 11 Приказ на ситуација во која едновремено се присутни повеќе механизми на краткотрајно електромагнетно влијание на електроенергетски водови и заземјувачи врз гасовод



Слика 12 Еквивалентно електрично коло со кое се моделираат електромагнетните влијанија на електроенергетскиот систем врз гасоводот



Слика 13 Резултати од анализа на електромагнетни влијанија на ЕЕС врз цевковод [24]

4 ЗАКЛУЧОК

Во овој труд е претставен компјутерски модел за анализа на електромагнетни појави во слоевита средина кој се базира на примена на егзактна електромагнетна теорија и решавање на електромагнетниот проблем со примена на Методот на моменти. Моделот е развиен врз основа на минимални упростувања, а применува голем број оптимизациски алгоритми кои му овозможуваат прецизни анализи кај големи и сложени системи, во фреквенциски опсег од 0 Hz до 100 MHz.

Со моделот се опфатени повеќето стандардни облици на побуда на системите, а истиот нуди можност за пресметка за различни електрични големини кои се од инженерски и истражувачки интерес во областа. Овие карактеристики му овозможуваат широк домен на примена во различни области на истражување и практична примена во изработка на проекти и студии во доменот на енергетиката.

Во овој труд електромагнетниот модел е применет во анализа на неколку карактеристични примери кои се од практичен интерес при проектирање на заштита и безбедносни анализи кај енергетски системи, со цел да се демонстрира неговиот широк опсег на применливост во различни инженерски апликации. Анализите исто така укажуваат на ситуации каде другите модели базирани на повисок степен на упростување се помалку ефикасни, стануваат несигурни за примена или пак се неприменливи.

Примената на компјутерски модел со висока точност, со можност за прецизно моделирање на системите и анализа на електромагнетни појави може да ги намали трошоците за заштита од електромагнетни влијанија, а да ја зголеми сигурноста на системите и безбедноста на луѓето кои работат во нивно опкружување.

5 ЛИТЕРАТУРА

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. “ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz).” *Health Physics* 99(6). pp. 818-836, 2010.
- [2] *Non-Ionizing Radiation Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields, Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*. Vol. 80. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, 2002.
- [3] *Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines*. Paris: CIGRÉ Working Group 36.02, 1995.
- [4] *Directives Concerning the Protection of Telecommunication Lines Against Harmful Effects From Electric Power and Electrified Railway Systems, Calculating Induced Voltages and Currents in Practical Cases – Vol. II*. Geneva: CCITT, 1989.
- [5] *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from, from electric power and electrified railway systems, Capacitive, inductive and conductive coupling: Physical theory and calculation methods – Vol. III*. Geneva: CCITT, 1989.
- [6] A. A. Smith. *Coupling of External Electromagnetic Fields to Transmission Lines*. New York: Wiley, 1977.
- [7] *MKC EN 50443:2012 - Ефекти од електромагнетна интерференција на цевководи предизвикано од висока волтажа на еднонасочни електрични системи за кочење и/или висока волтажа на еднонасочни системи за снабдување со електрична енергија*. Brussels: CENELEC, 2011.
- [8] *NACE SP0177-2014 - Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems*. Houston, Texas: NACE International, 2014.
- [9] *IEEE Std 80-2000 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York: IEEE, 2000.
- [10] *MKC EN 50522:2022 - Заземјување на енергетски инсталации кои надминуваат 1 kV a.c.*. Brussels: CENELEC, 2022.
- [11] *Guide for Assessment of Transferred EPR on Telecommunication Systems due to Faults in A.C. Power Systems*. Paris: CIGRÉ Working Group C4.207, 2014.
- [12] L. Grcev, B. Markovski. “Impulse Impedance and Effective Area of Grounding Grids.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 1183-1192, 2021.
- [13] L. Grcev, B. Markovski, M. Todorovski. “General Formulas for Lightning Impulse Impedance of Horizontal and Vertical Grounding Electrodes.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 4, pp. 2245-2248, 2021.
- [14] L. Grcev, B. Markovski, M. Todorovski. “Lightning Efficient Counterpoise Configurations for Transmission Line Grounding.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 2, pp. 877-888, 2023.
- [15] Б. Марковски. *Ефикасен електромагнетен модел за анализа на преодни појави кај големи заземјувачки системи во слоевита земја*. Докторска дисертација, Скопје, Македонија: Универзитет “Св. Кирил и Методиј” во Скопје, 2019.
- [16] R. F. Harrington. “Matrix methods for field problems.” *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 2, pp. 136–149, 1967.
- [17] L. Grcev and F. Dawalibi. “An electromagnetic model for transients in grounding systems.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1773–1781, 1990.
- [18] L. Grcev. “Computer analysis of transient voltages in large grounding systems.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 815–823, 1996.
- [19] V. Arnautovski-Toseva, L. Grcev. “Electromagnetic analysis of horizontal wire in two-layered soil.” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 168, no. 1-2, pp. 21-29, 2004.
- [20] B. Markovski, L. Grcev, V. Arnautovski-Toseva. “Fast and Accurate Transient Analysis of Large Grounding Systems in Multilayer Soil.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 598-606, 2021.
- [21] B. Markovski, L. Grcev, V. Arnautovski-Toseva. “Accurate Low-Frequency Approximation for Wires Within a Conducting Half-Space.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 1, pp. 272-275, 2020.
- [22] B. Markovski, L. Grcev, V. Arnautovski-Toseva, A. Kuhar. “Accurate Low-Frequency Approximation for Wires within a Two-Layered Earth.” *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 17, no. 10, pp. 13-25, 2020.

- [23] L. Grcev, A. Kuhar, B. Markovski, V. Arnautovski-Toseva. "Generalized Network Model for Energization of Grounding Electrodes." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 4, pp. 1082-1090, 2019.
- [24] *IEEE STD 2778 - IEEE Guide For Solar Power Plant Grounding For Personnel Protection*, IEEE, 2020.
- [25] *IEC 62110 - Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure*, Brussels: CENELEC, 2009.
- [26] B. Glushica, B. Markovski, V. Arnautovski-Toseva. "Assessment of Electric and Magnetic Field Exposure Near Overhead Transmission Lines Using 2D Finite Elements Method." *8-th Symposium on Applied Electromagnetics SAEM'2022*, 2022.
- [27] Б. Марковски, Л. Грчев. "Електромагнетно влијание на високонапонски преносни водови и останати елементи на ЕЕС врз подземни метални цевководи за транспорт на нафта и гас." *Зборник на трудови од 10-то советување на МАКО СИГРЕ*, 2017.