

1. УВОД

1.1 Регулатива

Проблематици утицаја електромагнетског поља на људе посвећена је последњих десетак година изузетна пажња. Међународна комисија за заштиту од нејонизујућих зрачења (ICNIRP) је у својим публикацијама [1,2], на основу резултата опсежних истраживања великог броја институција и стручњака различитих специјалности, дефинисала критичне величине електромагнетског поља и границе дозвољених вредности ових величина за становништво генерално и за запослене на пословима који се обављају у близини потенцијалних извора зрачења. Ове норме усвојила је велика већина земаља у свету. Оне су прописане и директивом Европског парламента и Савета [3] и Европским стандардом EN 504999 [4].

У Табели 1.1 приказане су граничне дозвољене вредности јачине електричног поља и магнетске индукције према овим документима.

Табела 1.1 Граничне дозвољене вредности карактеристичних величина за учестаност $f = 50 \text{ Hz}$

	Магнетска индукција, μT	Јачина електричног поља, kV/m
Становништво	100	5
Запослени	500	10

Недавно објављени домаћи прописи у области заштите од нејонизујућих зрачења за становништво [5] као граничне дозвољене вредности прописују $40 \mu\text{T}$ и 2 kV/m . Како је већ оцењено у [6], наведене граничне вредности су прениске и неутемељене, а могу довести до прекомерних и неоправданих трошкова код изградње различитих објеката и треба их што пре заменити претходно наведеним нормама према европским стандардима.

У свом скорашњем документу [2] комисија ICNIRP чак предлаже да се граница дозвољених вредности магнетске индукције за запослене подигне на 1 mT .

У оквиру мера које треба предузети у случају прекорачења неких од граничних вредности наведених у Табели 1.1 се, између осталих, наводи и ограничење времена излагања одговарајућим утицајима [4].

Могућа мера за смањење утицаја електромагнетског поља је скраћивање времена излагања [9].

1.2 Дозвољено трајање излагања деловању електромагнетског поља

Једно од основних мерила ефеката електромагнетског поља на човечији организам је енергија коју организам апсорбује у току излагања [1].

Лако се закључује да је енергија коју мора да апсорбује човечији организам за време изложености деловању електромагнетског поља пропорционална квадрату јачине електричног поља и магнетске индукције

$$Q_E = F_E E^2 t \quad (1.1)$$

$$Q_B = F_B B^2 t \quad (1.2)$$

Параметри F_E и F_B зависе од проводности делова тела на путевима успостављања струје. Може се сматрати да ови параметри имају типичне вредности за одрасло, запослено особље.

Нека је t_1 дозвољена дужина излагања електричном пољу јачине E_1 . Трајање излагања t_2 пољу јачине E_2 код кога изложена особа апсорбује исту енергију као у претходном случају може се на основу (9) одредити из израза

$$F_E E_1^2 t_1 = F_E E_2^2 t_2 \quad (1.3)$$

из кога следи

$$t_2 = t_1 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^2 \quad (1.4)$$

Сличним расуђивањем долази се и до израза за дозвољено трајање t_2 изложености магнетној индукцији B_2 ако је при индукцији B_1 ово трајање t_1

$$t_2 = t_1 \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^2 \quad (1.5)$$

Код анализе опасности треба имати у виду да се ефекти електричног поља и магнетске индукције не сабирају већ се сваки посматра засебно као да другог утицаја нема [1]. Ово се објашњава чињеницом да разматране електричне величине не образују струје на истим путевима кроз тело изложене особе.

2. ЗАШТИТА ОД МАГНЕТСКЕ ИНДУКЦИЈЕ

2.1. Опште

Заштита од магнетске индукције остварује се на различите начине у зависности од врсте извора магнетског поља и простора који се штити. Основни начини заштите су удаљавање штићене области од извора, промена распореда проводника извора, примена компензационих контура и коришћење штитова различитог облика од различитих материјала.

У овој се глави описују све поменуте методе заштите, дају аналитички изрази и дијаграми за процену вредности заштитног фактора у различитим ситуацијама и приказују нека изведена решења.

2.2. Положај и распоред проводника

2.2.1 Магнетска индукција око система проводника

Магнетска индукција око система проводника у ваздуху који проводе струје једнаке ефективне вредности чији је збир једнак нули може се проценити преко израза

$$B(r) = \frac{Id}{5\sqrt{2}r^2} \quad (\mu T) \quad (2.1)$$

Овде су

I – ефективна вредност струје у једном проводнику (А),

d – средње растојање између проводника (м),

r – растојање тачке у којој се рачуна магнетска индукција од центра геометријске симетрије система проводника (м).

Параметар d за трофазни систем проводника једнак је

$$d = \sqrt{d_{12}^2 + d_{13}^2 + d_{23}^2} \quad (2.2)$$

где су d_{ik} , $i, k=1, 2, 3$ растојања између проводника и (м).

Израз (2.1) може се применити ако је растојање r неколико пута веће од d .

Применом (2.1) за проводнике трофазног система распоређене у хоризонталној равни добија се

$$B(r) = \frac{\sqrt{3}Id_m}{5r^2} \quad (\mu T) \quad (2.3)$$

Ако су проводници распоређени у угловима једнакостраничног троугла, магнетска индукција на растојању r једнака је

$$B(r) = \frac{\sqrt{6}Id_m}{10r^2} \quad (\mu T) \quad (2.4)$$

У изразима (2.3) и (2.4) је са d_m означено растојање између проводника, изражено у (м).

Како се може закључити из (2.3) и (2.4), распоред у теменима једнакостраничног троугла производи за око 40% мању магнетску индукцију од оне која се има код хоризонталног распореда проводника. Може се показати да за исто d_m распоред у теменима једнакостраничног троугла производи најмању индукцију од других могућих распореда проводника.

У случају да трофазни систем струја садржи нулту компоненету, магнетска индукција услед ове компоненте на растојањима r небитно зависи од распореда проводника трофазног система и може се проценити применом израза

$$B(r) = \frac{I_0}{5r} \quad (\mu T) \quad (2.5)$$

Како се види, магнетска индукција услед нулте компоненте опада са првим степеном растојања проводника од посматране тачке за разлику од индукције код уравнотеженог симетричног система струја код кога магнетска индукција опада са квадратом овог растојања.

Општи израз (2.1) може се користити за процене магнетске индукције и у случајевима када се фазе трофазног система разбијају на више проводника или када се имају два или више система проводника преко којих теку уравнотежени системи струја једнаких ефективних вредности.

2.2.2 Мере за смањење јачине магнетске индукције

Како се види из претходно наведених израза, јачина магнетске индукције која потиче од уравнотеженог система струја које теку кроз проводнике опада са квадратом растојања од проводника. Према томе, једна од ефикасних мера заштите угрожених области је удаљавање проводника од ових области променом конструктивних решења. Код трофазних нисконапонских кола врло је важно да се неутрални проводник води у близини фазних проводника како би се умањио ефекат струје нултог редоследа која тече у овом проводнику. Генерално, све проводнике треба водити груписано и што даље од штићених области.

2.3 Компензација

2.3.1 Опште

Под компензацијом се подразумева постављање затворених контура проводника између извора променљиве магнетске индукције и штићене области. У овим контурама се под дејством променљиве магнетске индукције стварају струје које граде поље магнетске индукције које се супротставља изворном пољу и на тај начин се смањује јачина магнетске индукција у штићеној области. Компензација се сматра пасивном ако се користи искључиво природни ефекат супротстављања изворном пољу.

У заштитну контуру може се укључити извор који ће подешавати струју у контури према јачини изворне магнетске индукције да би се у штићеној области имала најмања могућа јачина магнетске индукције. Овакво решење назива се активна компензација. Оно се ретко користи због своје сложености и цене.

Пасивна компензација се обично примењује за сузбијање магнетске индукције коју стварају надземни или кабловски водови.

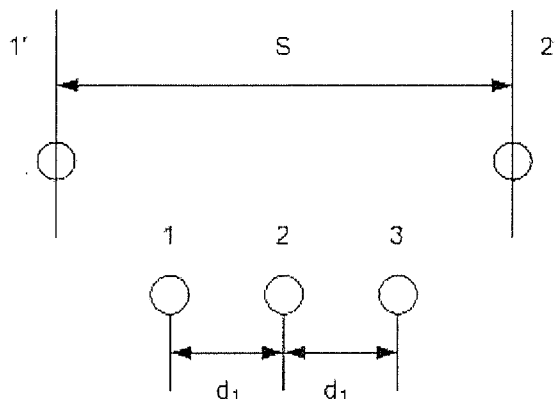
2.3.2 Особености примене

Да би се постигли жељени ефекти код примене описане заштите треба се придржавати неколико правила:

- а) Компензациона контура поставља се у хоризонталној равни испод или изнад проводника струјних кола који производе изворну индукцију у зависности од тога где се у односу на ове проводнике налази штићена област. Проводници компензационе контуре прате трасу проводника струјних кола који производе изворну индукцију дуж целе трасе на делу на коме је штићена област.
- б) Пресек и материјал проводника који чине компензациону контуру треба изабрати тако да електрични отпор буде бар три пута мањи од индуктивности ове контуре. Тиме се контура приближава идеалној индуктивној петљи у којој се ствара струја која узрокује магнетску индукцију која је тачно у опозицији према изворном пољу. Поред наведеног, код малих вредности електричног отпора су и мањи губици електричне енергије и мање загревање околине што може бити од значаја код кабловских водова којима се иначе могу отежати услови хлађења.
- в) Ради бољег обликовања резултујућег поља индукције и постизања већег фактора заштите у пракси се често користи већи број независних компензационих контура.
- г) Да би се повећала струја у компензационој контури у њу се, ради смањења импедансе, могу уградити кондензатори.
- д) Треба имати у виду да се применом компензационе контуре јачина магнетске индукције у простору који обухвата контура смањује јер се том простору поље произведено контуром супротставља изворном пољу. Изван контуре поље произведено компензацијом сабира се са изворним пољем што доводи до стварања индукције чија је јачина већа од јачине изворне индукције. То не мора да има негативне ефекте за заштиту јер је јачина магнетске индукције на тим периферним местима за штићену област мала.

2.3.3 Изрази за прорачун фактора заштите код примене компензације

Посматра се случај приказан на слици 2.1. Три кабла који чине трофазни кабловски систем положена су у тло у хоризонталној равни. Потребно је смањити јачину магнетске индукције на површини тла изнад каблова. Зато се изнад каблова поставља хоризонтална компензациона контура чија се вертикална оса симетрије поклапа са овом осом за каблове. Кроз проводнике кабла протиче струја ефективне вредности I . Систем струја је симетричан.



Слика 2.1 Трофазни кабловски систем и компензациона контура

Показује се да је струја I_L која се успоставља у компензационој контури услед деловања магнетског поља каблова једнака

$$\underline{I}_L = -\underline{K} \cdot I \quad (2.6)$$

где је

$$\underline{K} = \frac{\frac{\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \left[j \ln \left(\frac{d_{12'}}{d_{11'}} \cdot \sqrt{\frac{d_{32'}}{d_{31'}}} \right) - \sqrt{3} \ln \left(\sqrt{\frac{d_{31'}}{d_{32'}}} \right) \right]}{R + j \frac{\omega\mu_0}{\pi} \ln \left(\frac{s}{GMR} \right)} \quad (2.7)$$

или, ако се занемари отпор R компензационе контуре

$$\underline{K} = \frac{\ln \left(\frac{d_{12'}}{d_{11'}} \cdot \sqrt{\frac{d_{32'}}{d_{31'}}} \right) + j\sqrt{3} \ln \left(\sqrt{\frac{d_{31'}}{d_{32'}}} \right)}{2 \ln \left(\frac{s}{GMR} \right)} \quad (2.8)$$

У изразима (2.7) и (2.8) са d_{ik} означена су растојања између проводника i и k према слици 2.1. Са GMR је означен средњи геометријски полупречник проводника компензационе контуре

$$GMR = \sqrt{sr_p} \quad (2.9)$$

где је r_p полупречник проводника компензационе контуре, а s размак између њених проводника.

Zaštitni faktor postignut kompenzacionom konturom jednak je po definiciji odnosu jačine magnetske indukcije pre i posle zaštite

$$ZF(r) = \frac{|\underline{B}_S(r)|}{|\underline{B}_S(r) + \underline{B}_L(r)|} = \left| 1 + \frac{\underline{B}_L(r)}{\underline{B}_S(r)} \right|^{-1} \quad (2.10)$$

Овде су индексима S и L означене јачине магнетске индукције произведене проводницима каблова и компензационом контуром, респективно, на неком растојању r од центра симетрије кабловског система односно компензационе контуре.

Према општој релацији (2.1) је

$$B_S(r) = \frac{\sqrt{3}dI_s}{5r^2} \quad (\mu T) \quad (2.11)$$

где је

I - ефективна вредност струје по једном каблу, у (А),

d - растојање између суседних каблова кабловског система, у (м),

r - растојање тачке у којој се рачуна магнетска индукција од центра геометријске симетрије система каблова, у (м).

Исто тако је

$$\underline{B}_L(r) = \frac{\mu_0 s I_L}{5\sqrt{2}r^2} = -\underline{K}_s \frac{\mu_0 s I_s}{5\sqrt{2}r^2} \quad (2.12)$$

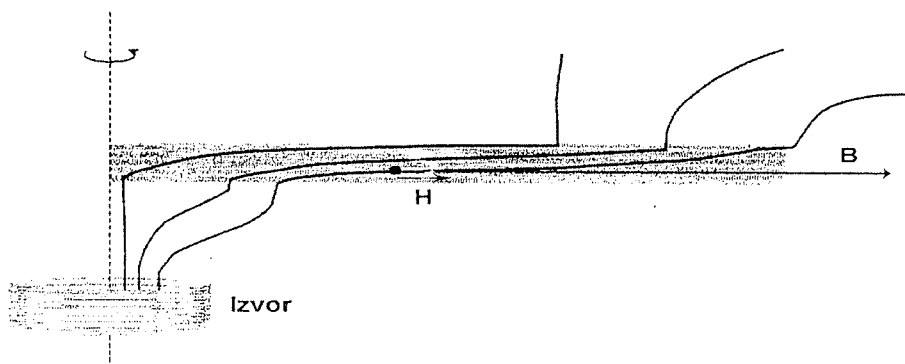
Када се претходни изрази уврсте у (2.10) добија се

$$ZF(r) = \left| 1 - \underline{K}_s \frac{s}{\sqrt{6}d} \right|^{-1} \quad (2.13)$$

2.4 Магнетски штит

2.4.1 Феромагнетски штит

Феромагнетски штитови се праве од материјала чији је пермеабилитет μ многоструко већи од пермеабилитета вакуума (ваздуха) μ_0 . Ако се извор магнетског поља налази у ваздуху, при упаду на штит од феромагнетског материјала линије поља магнетске индукције повијају се тако да иду дуж штита и не продиру у заштићену зону која се налази иза штита (слика 2.2).



Слика 2.2 Поље магнетске индукције у средини са штитом од феромагнетског материјала

У Табели 2.1 дати су подаци о феромагнетским материјалима који се могу користити за формирање штита од магнетске индукције.

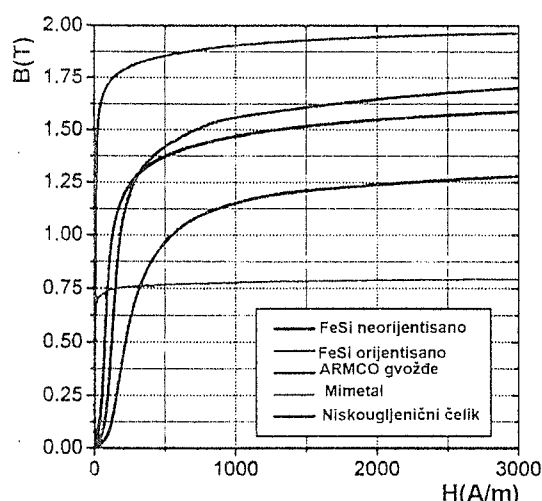
На слици 2.3 приказане су криве магнетнења за феромагнетске материјале који се најчешће користе у пракси.

Заштита од магнетске индукције може се постићи тако што се извор магнетског поља или простор који треба штити стављају у затворени оклоп - штит од феромагнетског материјала.

Код дугих линијских проводника који су извори магнетске индукције користе се цилиндрични оклопи, а код извора ограничених димензија сферични оклопи.

Табела 2.1 Карактеристике феромагнетских материјала

Материјал	Почетна релативна пермеабилност μ_{in}	Максимална релативна пермеабилност μ_{max}
Гвожђе чистоће 99.8 %	150	5000
Гвожђе чистоће 99.95 %	10000	200000
Челик 0.9% C	50	100
Челик са мало угљеника (LCS)	300-400	2000
Силиконски челик (Si 3%)	--	40000
Пермалој (μ - материјал)	8000	100000
Суперпермалој (μ - материјал)	100000	1000000
Кобалт, чистоће 99%	70	250
Никл, чистоће 99%	110	600



Слика 2.3 Криве магнећења за поједине материјале

Заштитни фактор за цилиндрични оклоп може се проценити помоћу израза

$$s = \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\Delta}{2a} \quad (2.14)$$

где је μ пермеабилитет феромагнетског материјала од кога је оклоп направљен, а Δ је дебљина зида оклопа. Са a је означен унутрашњи полупречник цилиндра.

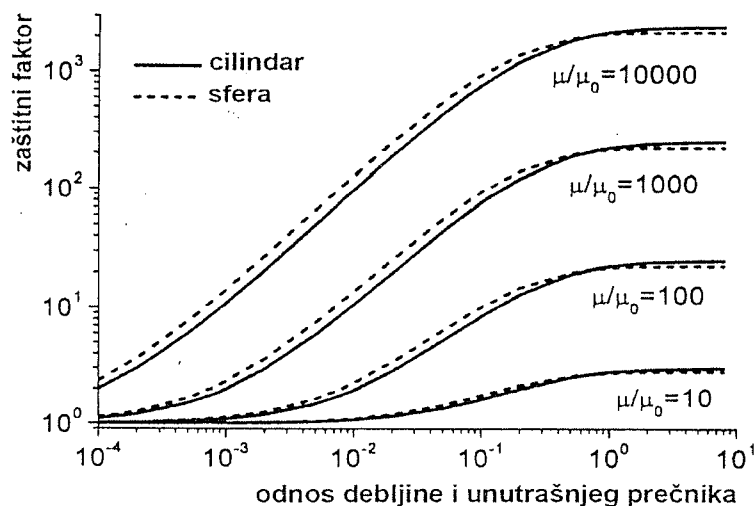
Заштитни фактор за оклоп у облику сфере приближно је једнак

$$s = 2 \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\Delta}{3a} \quad (2.15)$$

У оба разматрана случаја претпоставља се да је $a \gg \Delta$.

Изрази (2.14) и (2.15) важе за прорачуне заштитних фактора унутар цилиндра и сфере ако је извор магнетског поља ван ових оклопа и ван цилиндра и сфере ако је извор унутар оклопа.

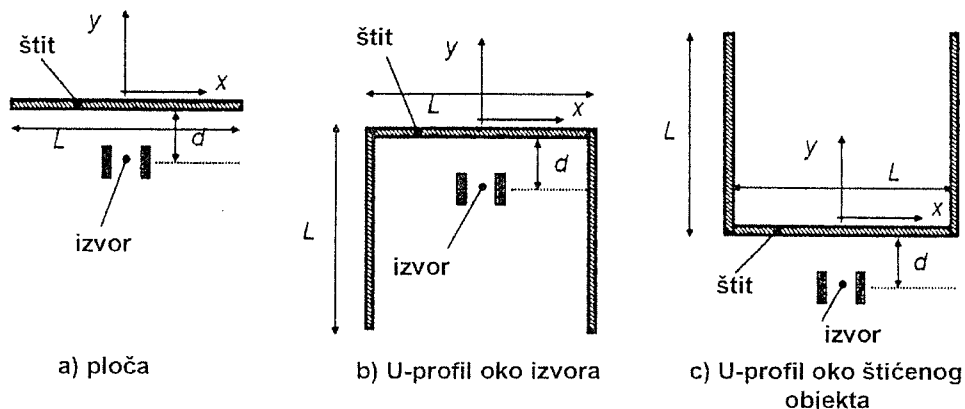
На слици 2.4 приказане су вредности заштитног фактора које се постижу цилиндричним и сферичним оклопом зависно од односа дебљине оклопа према унутрашњем пречнику. Подаци су дати за различите вредности релативног пермеабилитета феромагнетског материјала од кога је сачињен оклоп.



Слика 2.4 Заштитни фактор у зависности од односа дебљине оклопа и његовог унутрашњег пречника

Код израде затворених оклопа мора се водити рачуна о квалитету спојева делова конструкције како ови не би повећали магнетски отпор оклопа. Спојеве је најбоље заваривати.

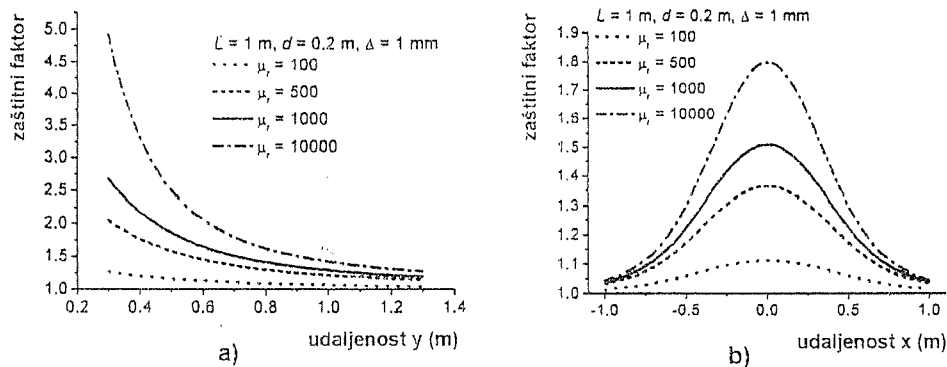
Магнетски штитови од феромагнетског материјала раде се и у облику плоча и U – профила око извора или штићене области, као што је показано на слици 2.5.



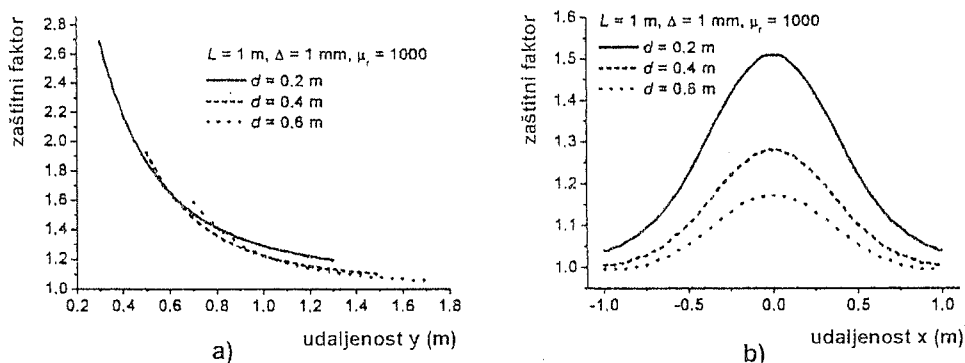
Слика 2.5 Различити облици заштите отвореним штитом

На слици 2.6 је показано како се за равни штит мења заштитни фактор са променом вертикалног растојања y (слика 2.6 а) и хоризонталног растојања x за $y = 0.7$ м (слика 2.6 б)).

На слици 2.7 приказано је како се код плочастог штита мења заштитни фактор за различита растојања d између извора и оклопа. Слика 2.7 а) нацртана је за $x = 0$ и разне вредности y , а слика 2.7 б) за разне вредности x тачака чије је вертикално растојање од проводника 0.5 м.

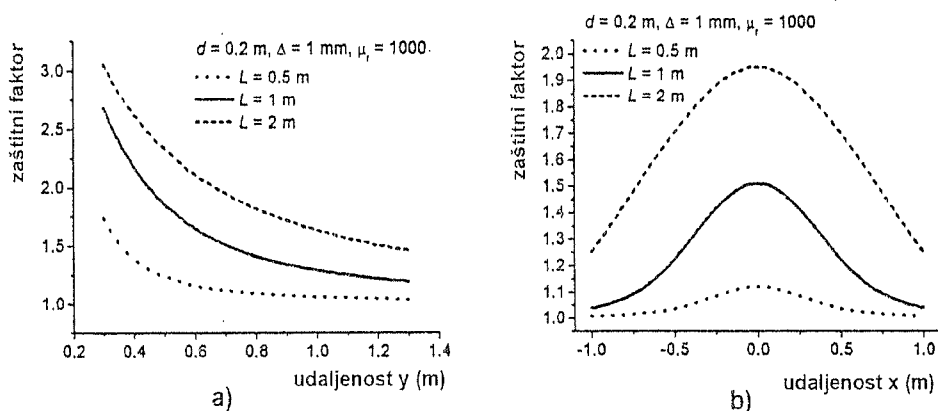


Слика 2.6 Заштитни фактор за плочу на карактеристичним правцима за различите вредности релативног пермеабилитета феромагнетског материјала



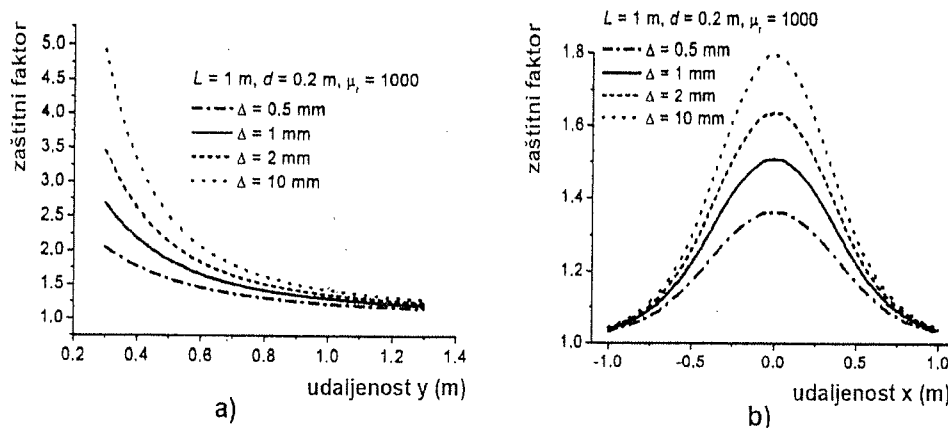
Слика 2.7 Заштитни фактор за плочасти штит дуж карактеристичних праваца

На слици 2.8 приказана је зависност заштитног фактора плочасти штита од његове димензије L . Криве а) дају вредности дуж правца y при $x = 0$, а криве б) дуж правца x за $y = 0.7$ м.



Слика 2.8 Вредности заштитног фактора плоче у зависности од димензија штита

На слици 2.9 приказана је зависност вредности заштитног фактора плоче од њене дебљине Δ . Слика 2.9 а) приказује промену вредности дуж осе y за $x = 0$, а слика 2.9 б) приказује промену вредности дуж осе x за $y = 0.7$ м

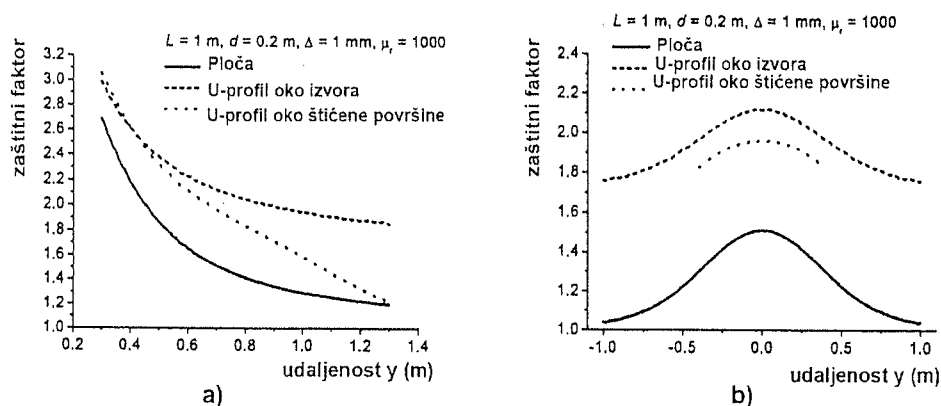


Слика 2.9 Зависност заштитног фактора плоче од њене дебљине

2.4.2 Штит од променљивих материјала

Под дејством променљивог поља магнетске индукције у штиту од проводних материјала индукују се електромоторне силе које стварају струје које се супротстављају изворном пољу магнетске индукције и тако смањују јачину резултујућег поља. Поменути ефекат штита јавља се само када је изворно поље магнетске индукције променљиво у времену за разлику од штита од феромагнетских материјала који су ефикасни и код временски непроменљивих поља.

Слика 2.10 приказује вредности заштитног фактора за сва три разматрана типа штита дуж карактеристичних праваца, слика а) дуж осе у за $x = 0$, слика б) дуж осе х за $y = 0.7$ м



Слика 2.10 Заштитни фактори за штитове са слике 2.5 дуж карактеристичних праваца

Разматрани штитови се, као и феромагнетски, изводе као затворени у облику цилиндра или сфере, зависно од облика извора магнетског поља или области коју треба заштитити.

Пун ефекат штита постиже се ако је његова дебљина знатно мања од дубине продорања електромагнетског поља

$$\Delta \ll \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (2.16)$$

У изразу (2.16) је δ дубина продирања електромагнетског поља, f је учестаност изворног магнетског поља, док су са σ и μ_0 означени специфична проводност и магнетски пермеабилитет материјала штита.

Ако је унутрашњи пречник штита a много већи од његове дебљине Δ , комплексни фактор заштите за дуги цилиндрични штит може се одредити применом изрази

$$\underline{s} = 1 + j\pi f\tau \quad (2.17)$$

где је

$$\tau = \mu_0 \sigma a \Delta \quad (2.18)$$

За сферични штит комплексни фактор заштите једнак је

$$\underline{s} = 1 + j\frac{2}{3}\pi f\tau \quad (2.19)$$

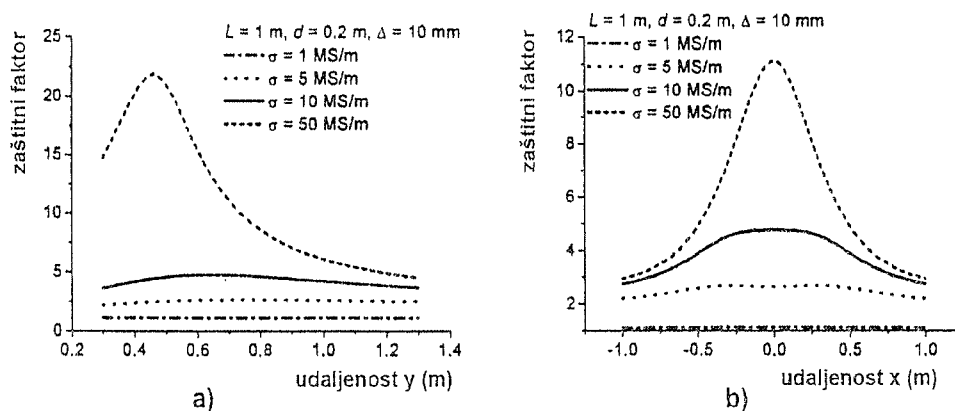
са истим значењем ознака као раније.

Изрази (2.17) и (2.19) важе уз претпоставку да је дебљина зида штита знатно мања од дубине продирања изворног поља магнетске индукције.

Наведени фактори заштите важе када се извор поља налази унутар штита, а област која се штити ван штита и обрнуто.

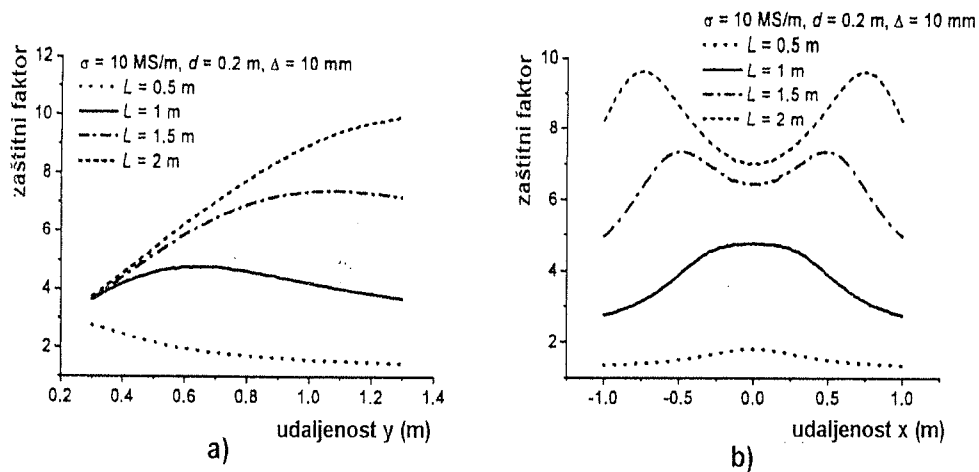
Поред затворених штитова користе се и штитови у облику плоча. Посматра се плоча од проводног материјала са истим геометријским карактеристикама као плоча на слици 2.5 а).

На слици 2.11 приказана је зависност вредности заштитног фактора дуж карактеристичних праваца за материјале различитих проводности за ту плочу. Слика а) приказује промену дуж осе y за $x = 0$, а слика б) дуж осе x за $y = 0.7$ м.



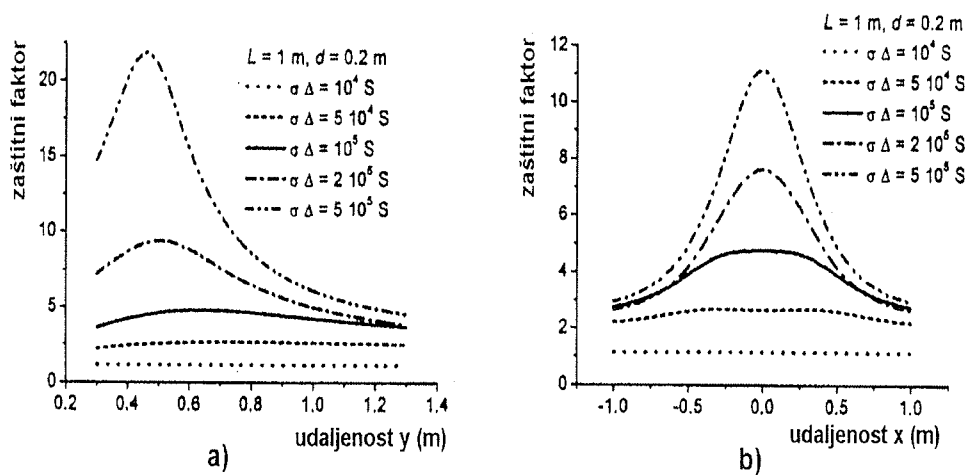
Слика 2.11 Вредности заштитног фактора дуж карактеристичних праваца за материјале различитих проводности

Слика 2.12 показује промену вредности заштитног фактора за различите ширине плоче са истим карактеристикама као плоча на слици 2.5 а). Сlike а) и б) односе се на исте правце као на слици 2.11.



Слика 2.12 Вредности заштитног фактора дуж карактеристичних праваца за различите ширине плоче

Зависност вредности заштитног фактора разматране плоче од њене дебљине показана је на слици 2.13.



Слика 2.13 Заштитни фактор плоча различите дебљине дуж карактеристичних праваца

У Табели 4.2 наведене су вредности специфичних проводности за метале који се најчешће користе за магнетске штитове.

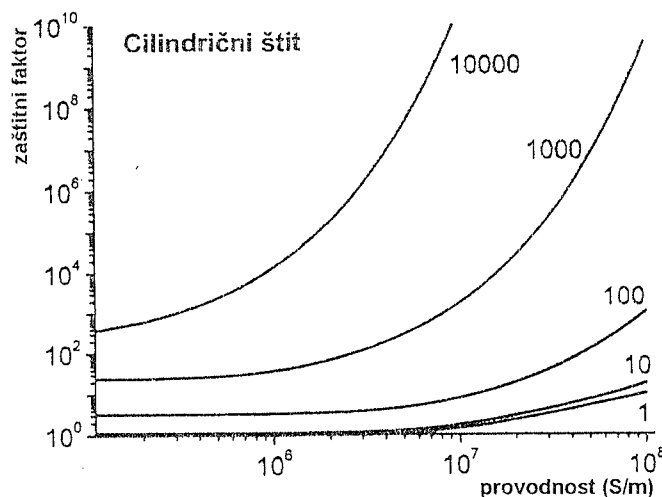
Табела 2.2 Специфичне проводности појединих материјала

Метал	Проводност, Sm/mm^2
Бакар	59
Алуминијум	36
Гвожђе	10
Челик	6
Структурно оријентисани челик	2
Пермалој	1.8

2.4.3 Штит од феромагнетских проводних материјала

У претходним одељцима разматрани су ефекти материјала са великим магнетским пермеабилитетом или великом специфичном проводношћу. Многи феромагнетски материјали који се користе као штитови су проводни па се у сузбијању поља магнетске индукције јављају једновременно и ефекти екранирања и индукције.

На слици 2.14 приказане су промене вредности заштитног фактора дугог цилиндричног штита у зависности од проводности материјала штита при различитим вредностима његовог релативног пермеабилитета. Унутрашњи полупречник штита је 0.1 м, дебљина 5 мм, а учестаност променљивог поља магнетске индукције је 50 Hz.



Слика 2.14 Зависност заштитног фактора цилиндричног штита од проводности и релативног магнетског пермеабилитета материјала од кога је направљен

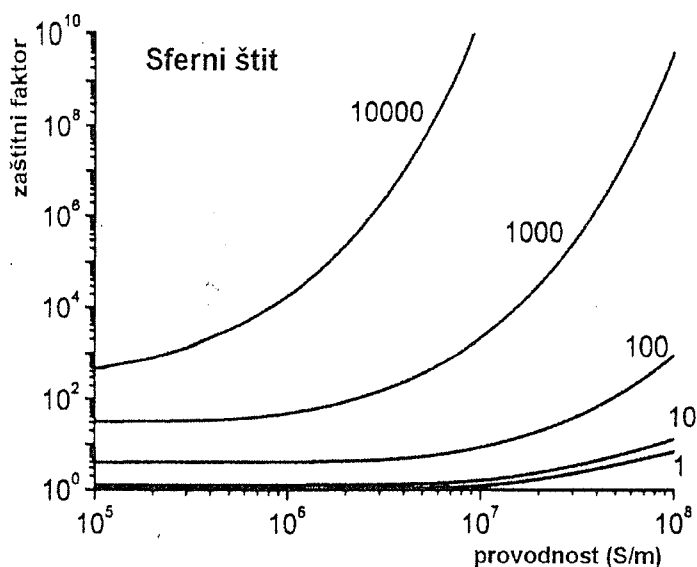
Као што се види, повећање магнетског пермеабилитета и електричне проводности материјала доводе до повећања заштитног фактора.

Зависност заштитног фактора штита у облику сфере од магнетског пермеабилитета и проводности материјала показана је на слици 2.15. Унутрашњи полупречник сфере је 0.2 м, дебљина штита је 5 мм, а учестаност изворног поља магнетске индукције је 50 Hz.

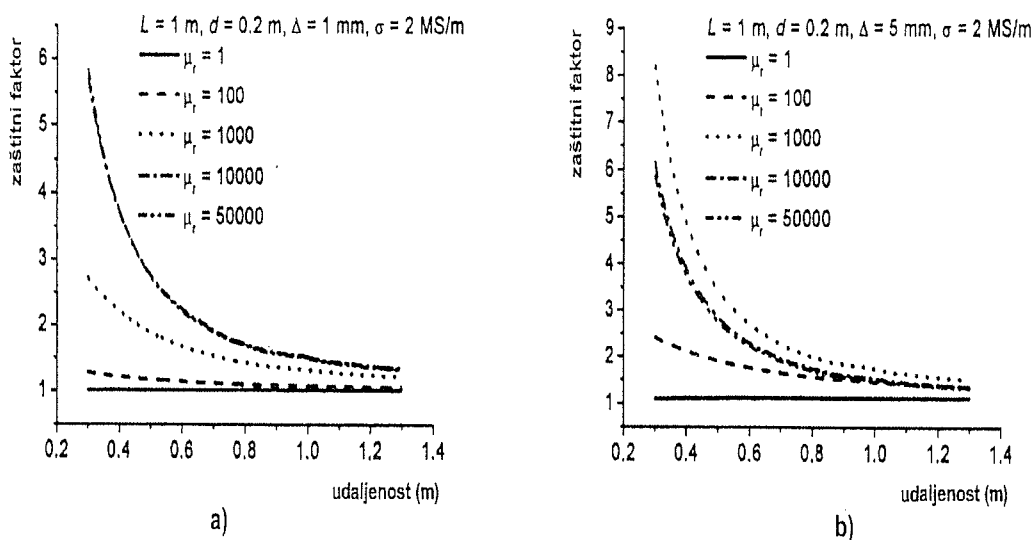
Из слике 2.15 се може закључити да се, као и код цилиндричног штита, повећањем магнетског пермеабилитета и проводности материјала штита добијају веће вредности заштитног фактора.

Ефекти једновременог екранирања и индукције осетни су и код штитова у облику плоче. На слици 2.16 приказана је зависност заштитног фактора плоче са слике 2.5 а) за правац нормалан на плочу и дуж њене осе симетрије. Претпостављено је да проводност материјала $2 \text{ Smm}^2/\text{m}$, а да је удаљеност извора од плоче 0.2 м.

У претходним разматрањима претпостављало се да не долази до магнетског засићења материјала од кога је направљен штит, односно да његов магнетски пермеабилитет не зависи од вредности успостављеног магнетског поља. Зато у практичној примени може доћи до одступања од кривих приказаних на претходним сликама. Имајући то у виду, код димензионисања штита најбоље је, ради сигурности, претпоставити ниже вредности магнетског пермеабилитета од максималних за дати материјал.



Слика 2.15 Зависност заштитног фактора штита у облику сфере од проводности и релативног магнетског пермеабилитета коришћеног материјала

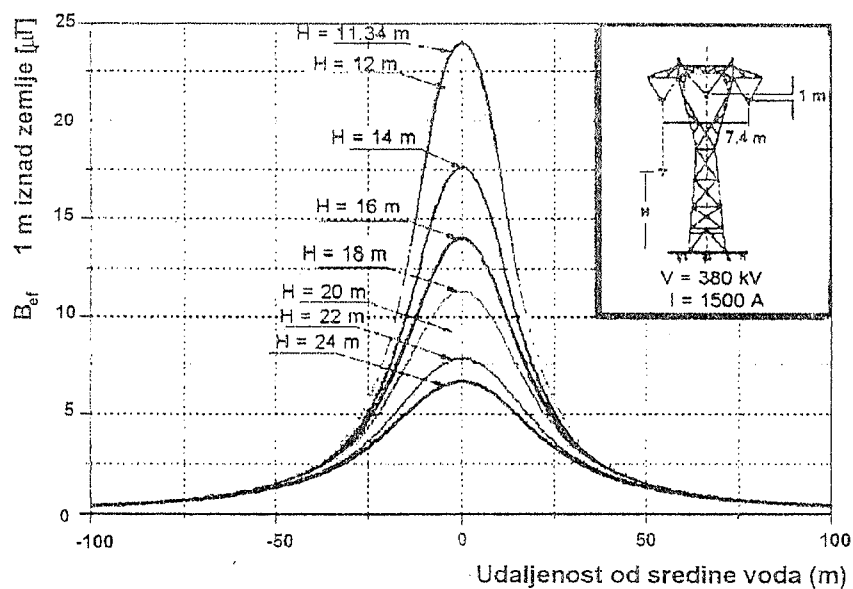


Слика 2.16 Зависност заштитног фактора плоче дуж вертикалне осе симетрије код различитих дебљина плоче

2.5. Примери изведених решења

2.5.1 Надземни водови највиших напона

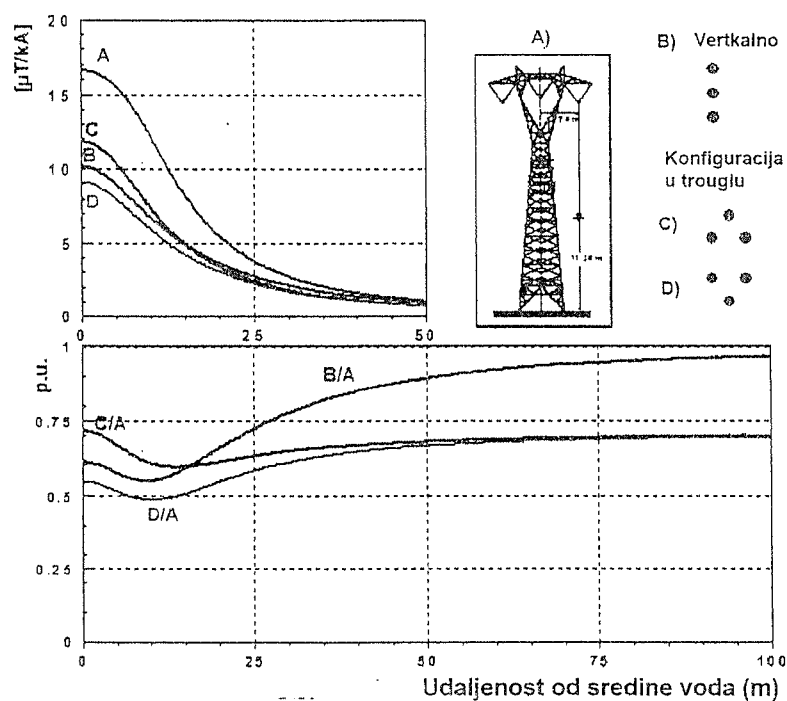
Магнетска индукција се смањује повећањем висине вешања проводника. На слици 2.17 приказано је како на јачину магнетске индукције мерене на 1 м изнад тла утиче висина H проводника на месту највећег угиба. Показана је промена јачине магнетске индукције на правцу нормалном на трасу вода на разним растојањима од његове осе симетрије. Називни напон вода је 380 kV, а струјно оптерећење 1500 A.



Слика 2.17 Јачина магнетске индукције на 1 м изнад тла у зависности од висине проводника

На јачину магнетске индукције, посебно у простору испод самог далековода, утиче и распоред проводника на глави стуба.

Слика 2.18 показује вредности јачине магнетске индукције на 1 м изнад тла у близини једног далековода 380 kV, са струјама 1500 A, код различитог распореда проводника.



Слика 2.18 Јачина магнетске индукције на 1 м изнад тла на разним растојањима од осе далековода

Подаци су дати за четири распореда проводника:

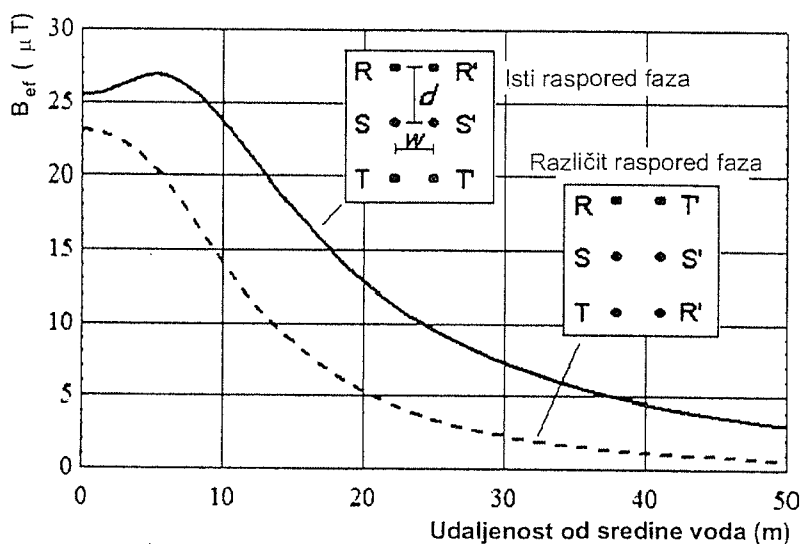
- у хоризонталној равни (A),

- у вертикалној равни (B),
- у троуглу (C)
- у обрнутом троуглу (D).

У доњем делу слике приказани су односи јачина магнетске индукције код различитих решења. Како се види, најнеповољнији је распоред у хоризонталној равни, а најповољнији у облику обрнутог троугла. Код овог распореда се испод далековода добијају скоро два пута мање јачине поља него код распореда у хоризонталној равни. Са удаљењем од осе вода разлике у јачини магнетске индукције код разматраних распореда проводника се смањују. Међутим, и на овим удаљењима је уочљива предност оба распореда у облику троугла у односу на друга два разматрана распореда.

Код двоструких водова значајан утицај на магнетску индукцију има распоред фаза. На слици 2.19 приказана је расподела јачине магнетске индукције код двоструког далековода 380 kV на 1 м изнад тла за различита растојања на правцу нормалном на трасу далековода. Струјно оптерећење по фази оба трофазна система је 1500 А. Фазни ставови струја у истим фазама трофазних система имају једнаке вредности.

Како се види, код неједнаког распореда фаза се, због узајамног деловања различитих фаза, смањује јачина магнетске индукције дуж целог разматраног правца.



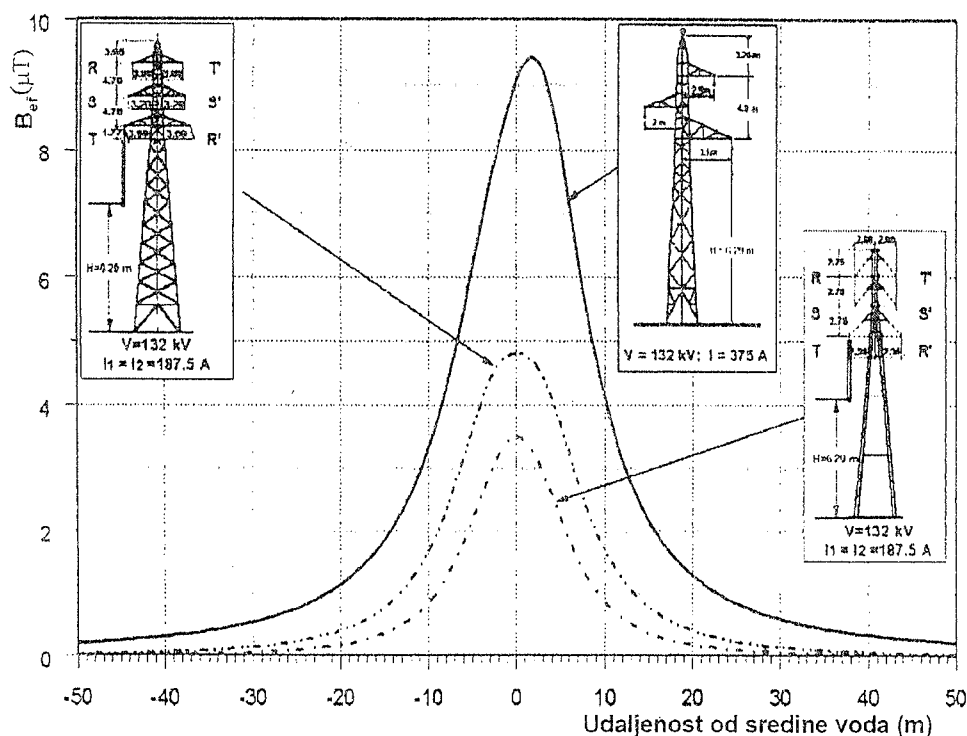
Слика 2.19 Јачина магнетске индукције на 1 м изнад тла на различитим растојањима од осе двоструког далековода ($d = 8$ m, $w = 15$ m)

Значајно смањење јачине магнетске индукције може се постићи раздвајањем једног трофазног система у два таква система једнаких карактеристика.

На слици 2.20 показана је расподела јачине магнетске индукције 1 м изнад тла код једног далековода 132 kV у случајевима када је изведен као један систем и као два система.

У средини слике дата је скица далековода када је изведен као једноструки. Лево од ње је скица далековода раздвојеног у два трофазна система са уобичајеним растојањима између фаза, а на скици десно, претходно решење са смањеним растојањима између фаза (компактни далековод).

Како се види, раздвајањем фазних проводника у два трофазна система и одговарајућим избором распореда фаза на глави стуба постижу се значајна смањења јачине магнетске индукције дуж целог разматраног правца. Ово је посебно изразито код компактне конструкције.



Слика 2.20 Расподела јачине магнетске индукције 1 м изнад тла на правцу нормалном на трасу далековода 132 kV када је вод изведен као једнострук и двострук

На слици 2.21 приказана је расподела јачине магнетске индукције 1 м изнад тла код једног далековода 380 kV код кога је примењена компензациона метода за ограничење индукције. У компензационо коло дуго 400 м и широко 30 м укључен је кондензатор од 12 mF ради повећања индуковане струје.

Слика показује да се компензацијом јачина магнетске индукције испод осе далековода смањује за око 40%. На већим удаљенима од осе далековода процентуално смањење је још изразитије.

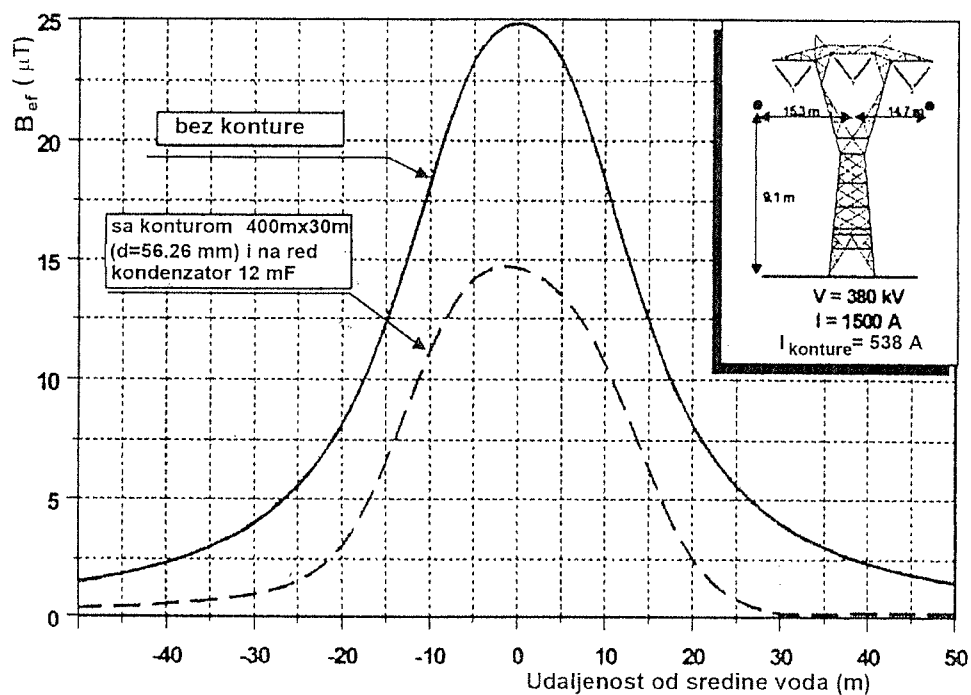
2.5.2 Надземни водови дистрибутивне мреже

Код надземних водова високих дистрибутивних напона се, ако је то потребно, јачина магнетске индукције може смањити на исте начине као и код надземних водова највиших напона. Најмање јачине магнетске индукције имају се код самоносивих кабловских водова (СКС), посебно ако се ови уплићу.

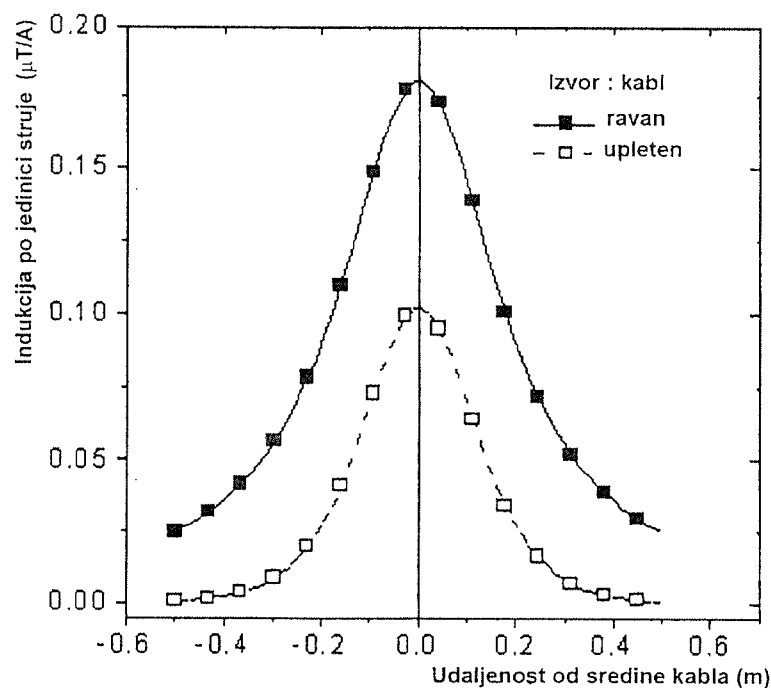
На слици 2.22 показано је колико уплитање кабловског снопа смањује јачину магнетске индукције дуж правца нормалног на линију вода.

Уочава се да се уплитањем јачина магнетске индукције смањује за око 60%.

Код нисконапонских кола врло је важно да се неутрални/нулти проводник води паралелно са фазним проводницима на најмањем дозвољеном растојању. Ово умањује ефекте неједнаког оптерећења фаза.



Слика 2.21 Расподела јачине магнетске индукције 1 м изнад тла на правцу нормалном на трасу далековода 380 kV без и са компензационим колом



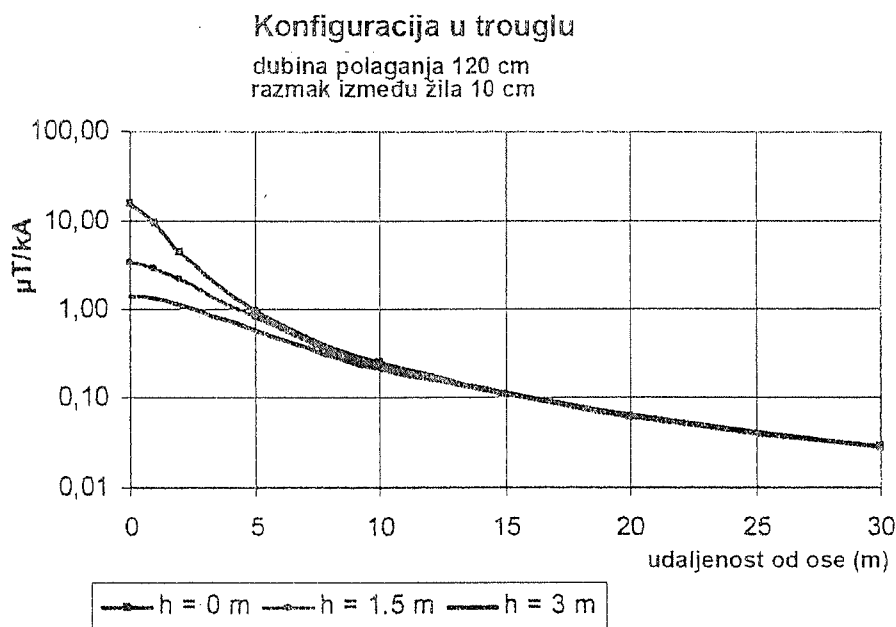
Слика 2.22 Ефекти уплитања самоносећег кабловског снопа на правцу 0.2 м испод кабла

2.5.3 Каблови

Јачина магнетске индукције која се појављује изнад кабовских траса зависи од начина полагања каблова. Веће вредности магнетске индукције имају се код полагања каблова у хоризонталној равни, нарочито код већих размака између

каблов. Код полагања каблов у троугаоном распореду јачина магнетске индукције изнад трасе кабла је осетно мања него код хоризонталног распореда каблов.

На слици 2.23 приказана је расподела јачине магнетске индукције изнад трасе кабла у троугаоном распореду на правцу нормалном на трасу. Јачина магнетске индукције рачуната је на различитим висинама h изнад површине тла. Каблови су положени на дубини од 120 цм, а растојање између оса каблов је 10 цм. Наведени подаци дати су за струју од 1000 А. Јачина магнетске индукције је сразмерна струји кабла тако да се из кривих на слици може одредити јачина магнетске индукције код било ког струјног оптерећења каблов.



Слика 2.23 Расподела јачине магнетске индукције изнад трасе каблов у троугаоном распореду

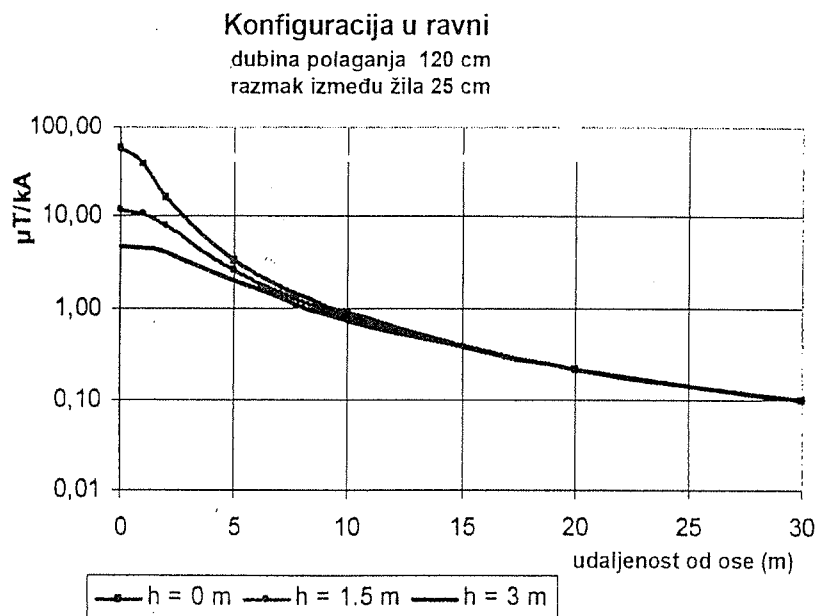
Слика 2.24 даје исте податке као слика 2.23 за кабл са распоредом проводника у хоризонталној равни. Подаци се односе на каблове који су положени на дубини 120 цм на међусобним растојањима од 25 цм.

Како се закључује из приложених слика, код хоризонталног распореда каблов имају се јачине магнетске индукције које су знатно веће него код распореда у троуглу.

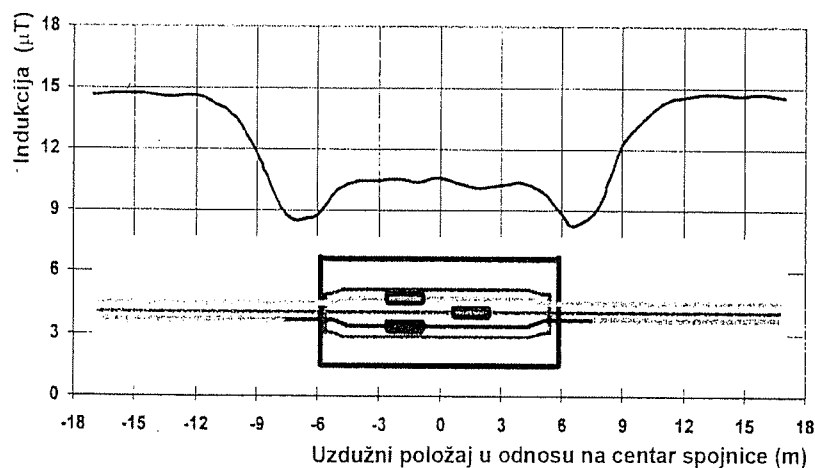
На местима настављања каблови се, из конструктивних разлога, морају распоредити у хоризонталној равни што доводи до повећања јачине магнетске индукције изнад кабла на овој локацији. Ово повећање може се избећи уградњом компензационе контуре око каблов на делу на коме су они у хоризонталном распореду.

На слици 2.25 приказана је расподела јачине магнетске индукције на површини тла дуж кабла на делу са спојницом после уградње две компензационе контуре пресека 300 мм². Струјно оптерећење кабла је 1000 А.

Јачина магнетске индукције дата је за случај без подешавања компензације, када постоји само обична компензациона контура дужине 500 м са струјом 77 А и када је у компензациону контуру стављен кондензатор 13 mF ради смањења импедансе контуре. Називни напон кабла је 132 kV а струјно оптерећење 250 А. Како се види, уградњом кондензатора у компензациону контуру значајно се смањује јачина магнетске индукције дуж целог анализираних правца.



Слика 2.24 Расподела јачине магнетске индукције изнад трасе каблова у хоризонталном распореду



Слика 2.25 Јачина магнетске индукције на површини тла дуж кабла изнад спојница код примене компензационих контура

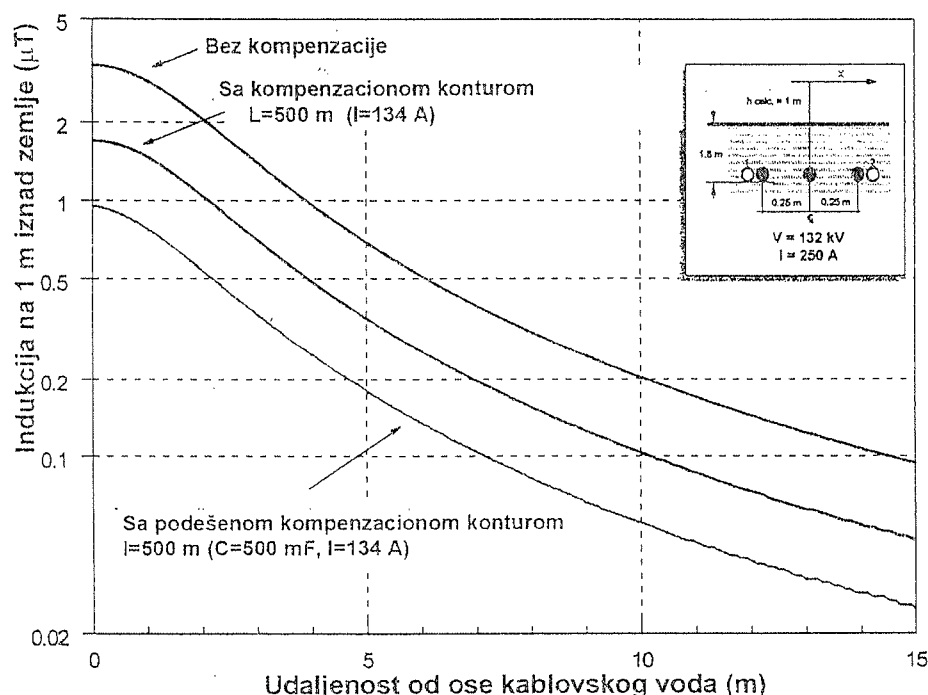
На слици 2.26 показано је како компензационе контуре утичу на смањење јачине магнетске индукције код каблова положених у хоризонталној равни.

На слици 2.27 приказано је решење које је примењено за ограничење јачине магнетске индукције код каблова 400 kV са струјом 1500 A. Каблови су положени на дубину од 2.7 м. Примењене су две компензационе контуре помоћу којих је јачину магнетске индукције на површини тла изнад кабла ограничила испод захтеваних 15 μT .

2.5.4 Трансформаторске станице X kV/0.4 kV

На слици 2.28 приказана је трансформаторска станица (ТС) 22 kV/0.4 kV, 750 kVA, у згради. Изнад ТС налази се радна просторија са рачунарима. Код решења у коме се

нисконапонски водови воде дуж стропа ТС у просторији изнад ТС појављивала се магнетска индукција чија је јачине варијала између $1\mu T$ и $5\mu T$, што је ометало рад рачунара. После измештања каблова јачина магнетске индукције битно се смањила. На слици десно су приказане јачине магнетске индукције на различитим местима унутар ТС пре и после модификације ТС, утврђене мерењем.

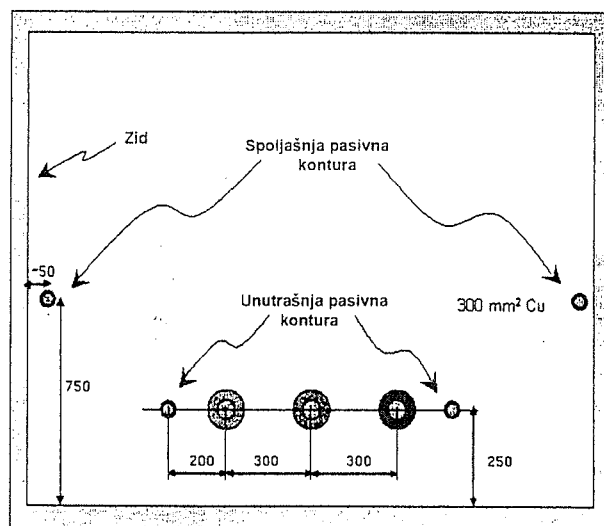


Слика 2.26 Јачина магнетске индукције од кабла на 1 м изнад тла на различитим растојањима од осе симетрије кабла на правцу нормалном на трасу

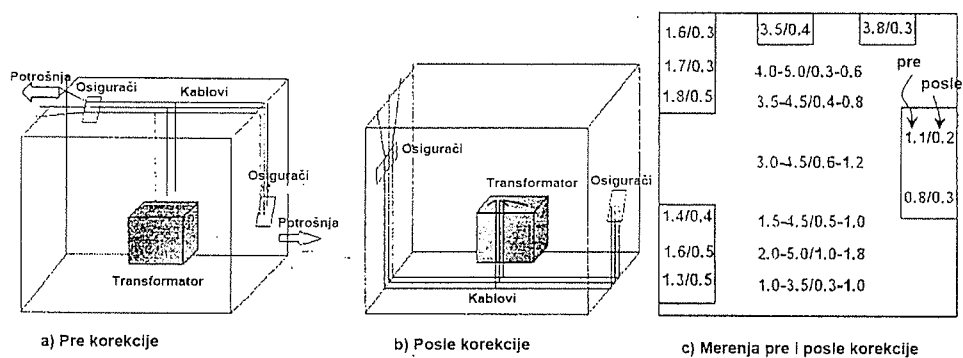
На слици 2.27 приказано је решење које је примењено за ограничење јачине магнетске индукције код каблова 400 kV са струјом 1500 A. Каблови су положени на дубину од 2.7 м. Примењене су две компензационе контуре помоћу којих је јачину магнетске индукције на површини тла изнад кабла ограничила испод захтеваних $15\mu T$.

2.5.5 Постројења у зградама

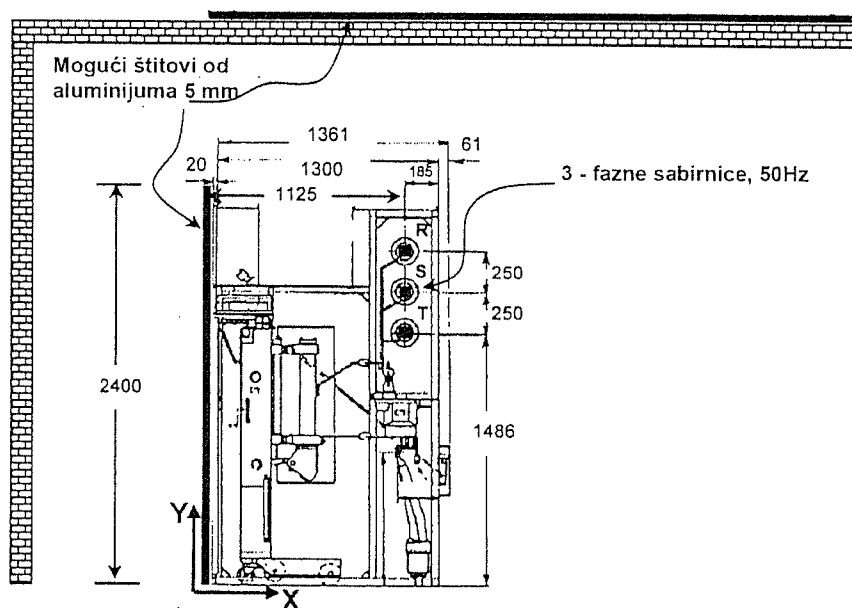
На слици 2.29 приказано је постројење СН/НН које се налази у згради. На спрату непосредно изнад постројења требало је јачину магнетске индукције ограничити на максимално $0.5\mu T$, са средњом вредношћу у току дана не већом од $0.2\mu T$. Да би се то постигло, испод пода просторије изнад постројења постављен је екран од алуминијума дебљине 5 мм.



Слика 2.27 Примена две компензационе контуре код каблова 400 kV



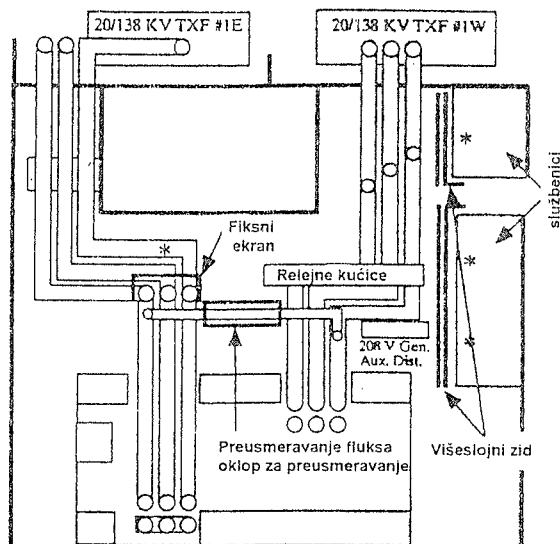
Слика 2.28 Ефекти измештања нисконапонских проводника у ТС



Слика 2.29 Уградња алуминијумског заштитног екрана

2.5.6 Постројење у електрани

На слици 2.30 приказано је решење које је примењено за смањивање магнетске индукције у радним просторијама једне електране у близини генераторских сабирница. Између генераторских сабирница и поменутих просторија постављен је заштитни екран дужине 12.1 м и висине 3.6 м. Екран се састоји од једне челичне плоче дебљине 6.35 мм, као прве заштите и плоче од муметала дебљине 1.56 мм, као друге заштите. Између плоча је ваздушни зазор ширине 50.8 мм. Плоча од муметала додатно смањује магнетску индукцију пошто је ефикасност прве, челичне плоче нешто умањена због засићења услед великих вредности магнетске индукције.



Slika 2.30 Zaštita u postrojenju elektrane

Експерименти су показали да је применом описаног штита јачина магнетске индукције смањена 25 пута (фактор заштите постављеног екрана једнак је 25). Уштићеним просторијама јачина магнетске индукције измерена на различитим местима износила је $(10 \div 90) \mu\text{T}$. Како се види на слици, појединачни екрани постављени су и на неколико места дуж сабирница да би се поље магнетске индукције преусмерило на мање критичне области.

3. ЗАШТИТА ОД ЕЛЕКТРИЧНОГ ПОЉА

3.1 Опште

Заштита од електричног поља остварује се удаљавањем проводника под напоном од области која се штити, постављањем мреже уземљених проводника између делова под напоном и области која се штити, као и постављањем, уместо мреже, уземљених екрана од различитих проводних материјала.

3.2 Положај и распоред проводника у односу на штићену област

Може се показати да је код симетричних трофазних система неизолованих проводника у ваздуху, какви су, на пример, надземни водови, јачина електричног поља у некој тачки у околини проводника под напоном обрнуто пропорционална квадрату растојања те тачке од центра симетрије проводника. Нека је средња геометријска висина проводника трофазног система у односу на тло H , а тачка у којој се одређује максимална јачина електричног поља на висини x . Тада се максимална јачина електричног поља испод разматраног трофазног система може проценити применом израза

$$E_{\max} = \frac{Ud}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \cdot \left[\frac{1}{(H-h)^2} + \frac{1}{(H+h)^2} \right] \quad (3.1)$$

Са d је означено средње геометријско растојање између проводника трофазног система, а r је полупречник проводника. Израз (3.1) може се применити и на једноструке и двоструке водове. Како се види, $E_{\max}$ је приближно пропорционално средњем геометријском растојању између проводника што значи да се јачина поља смањује компактизацијом далековода.

3.3 Заштита уземљеним проводницима

3.3.1 Степен редукције јачине електричног поља

У литератури се често за оцену ефикасности предвиђене заштите уместо заштитног фактора користи степен редукције. Он се дефинише као однос смањења изворног поља и самог изворног поља

$$S_e = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (3.2)$$

где су са E_0 и E означене јачина електричног поља пре и после предузетих заштитних мера.

У литератури се за оцену ефикасности заштитних мера користи и заштитни фактор који се дефинише на сличан начин као заштитни фактор за магнетску индукцију

$$ZF_e = \frac{E_0}{E} \quad (3.3)$$

Између два разматрана показатеља постоји веза

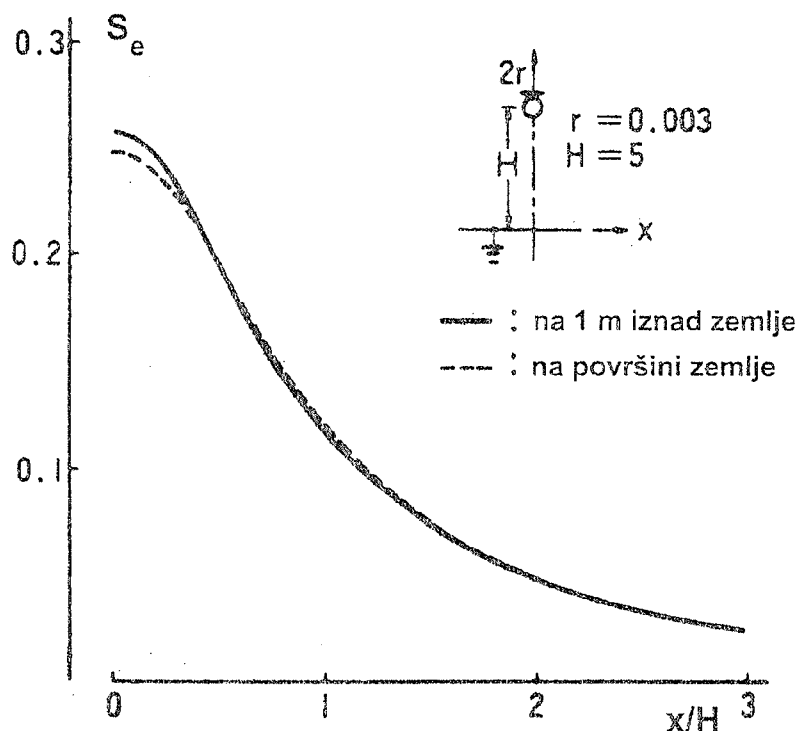
$$S_e = 1 - \frac{1}{ZF_e} \quad (3.4)$$

Ако је, на пример, $ZF_e = 1$, степен редукције је једнак $S_e = 0$. За $ZF_e = 10$, степен редукције је $S_e = 0.9$. Код идеалне заштите када је изворно поље анулирано применом заштитних мера је $E = 0$, $ZF_e = \infty$ и $S_e = 1$.

3.3.2 Утицај уземљених проводника

Јачина електричног поља испод далековода може се смањити постављањем уземљених проводника испод фаза далековода. Ови проводници се обично постављају на целом критичном распону и уземљују на оба краја везивањем за стубове далековода. Уземљени проводници се могу поставити и само изнад штићеног објекта при чему се морају уземљити повезивањем са уземљивачем овог објекта или посебно положеним уземљивачем. Уземљени проводници, ако их има више, постављају се у хоризонталној равни и прате линију проводника далековода. Удаљени су од најнижег проводника далековода у складу са постојећим прописима за минимално дозвољена удаљења проводника далековода од уземљених делова.

Слика 3.1 показује степен редукције који се постиже једним уземљеним проводником на хоризонталном правцу испод проводника нормалном на проводник. Степен редукције је рачунат на висини 1 м у односу на површину тла и на површини тла. Претпостављено је да је изворно поље хомогено.

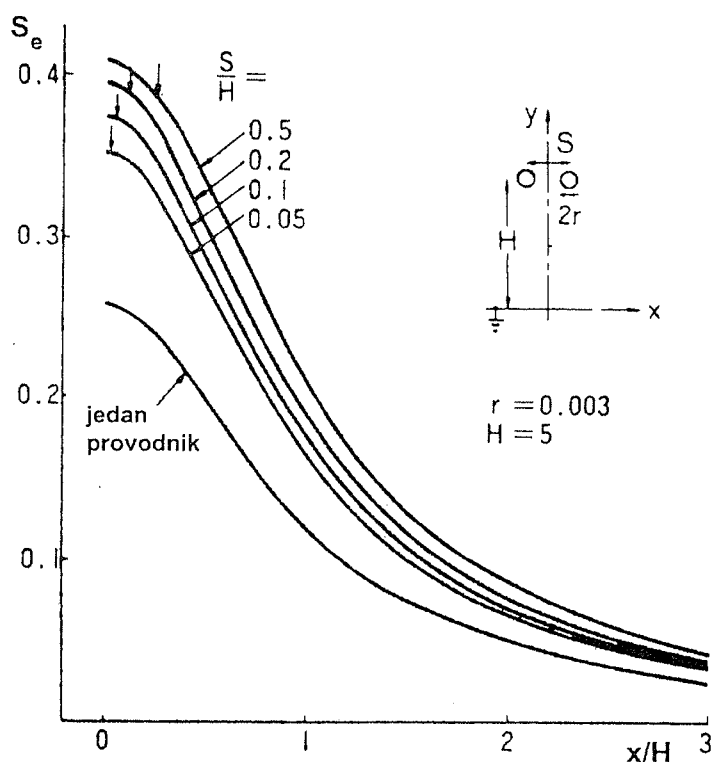


Слика 3.1 Степен редукције који се постиже једним проводником на површини тла и 1 м изнад тла на различитим растојањима x од осе симетрије

Како се види, максимални степен редукције јачине изворног поља постиже се испод уземљеног проводника и реда је 0.25, односно 25%.

Промена степена редукције који се постиже са два уземљена проводника на различитим растојањима на управном хоризонталном правцу приказан је на слици 3.2. Степен редукције рачунат је на 1 м изнад тла. Вредности степена редукције дате су за неколико односа растојања S између уземљених проводника и њихове висине H . Изворно поље је хомогено.

Највећи степен редукције постиже се на верикалној оси симетрије уземљених проводника и налази се у интервалу 0.35 до 0.42. Веће вредности имају се код већих размака S уземљених проводника.



Слика 3.2 Степен редукције на 1 м изнад тла у случају постављања два уземљена проводника

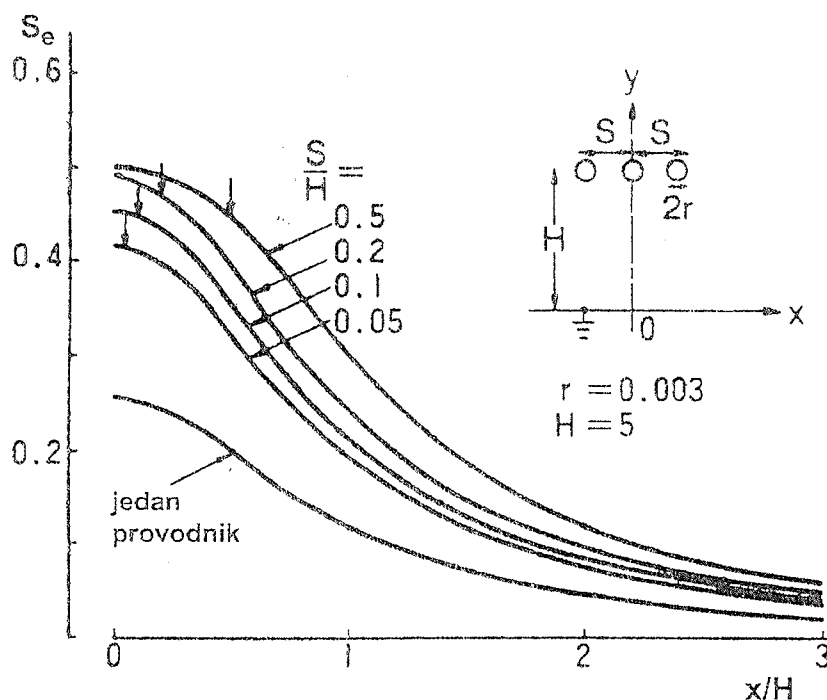
Вредности степена редукције које се постижу на висини 1 м изнад тла са три уземљена проводника за случај хомогеног изворног поља дате су на слици 3.3.

Види се да се максималне вредности степена редукције опет постижу на вертикалној оси симетрије проводника, а крећу се у опсегу 0.42 до 0.50.

У случају да је заштитна мрежа сачињена од већег броја проводника, на пример 5 и више, за процену S_e које се постиже на површини тла овим решењем може се користити релација

$$S_e = \frac{P \sinh(P)}{\cosh(P) - \cos\left(\frac{Px}{H}\right)} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{2H}{Pr}\right) + \ln(\sinh(P))} \quad (3.5)$$

која строго важи за случај када је број проводника бесконачан а изворно поље хомогено.



Слика 3.3 Степен редукције на 1 m изнад тла за три уземљена проводника на различитим међусобним растојањима

Овде је

$$P = \frac{2\pi H}{S} \quad (3.6)$$

У (3.5) и (3.6) је, као раније, H висина проводника над тлом, S њихово међусобно растојање, r полупречник проводника, а x хоризонтално растојање од вертикалне осе симетрије.

У већини случајева у пракси P је врло велико тако да се у изразу (3.5) може занемарити *cosinus* члан и сматрати да је

$$\cosh(\alpha) = \sinh(\alpha) \cong \frac{e^\alpha}{2}$$

Уз поменућу претпоставку израз (3.5) постаје

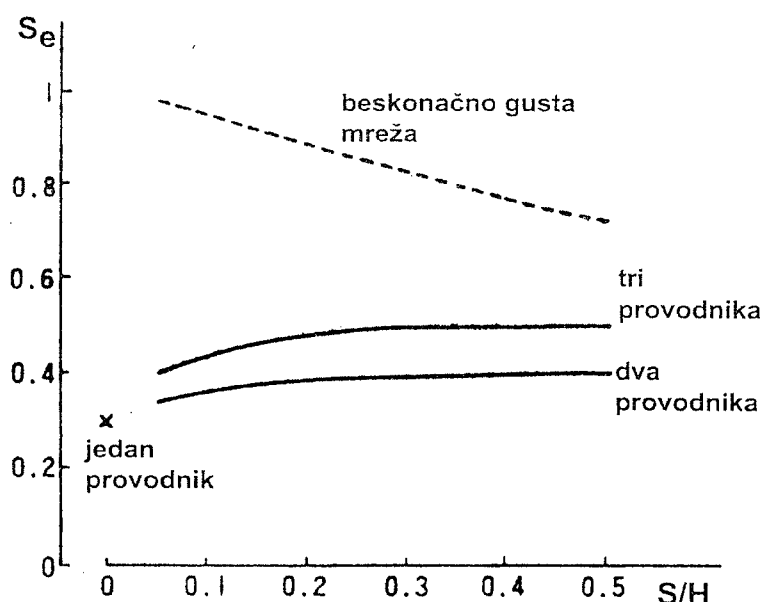
$$S_e = \frac{1}{1 - \frac{1}{P} \ln\left(\frac{Pr}{H}\right)} \quad (3.7)$$

У пракси, код коначног броја уземљених проводника израз (3.7) даје практично тачне вредности степена редукције дуж верикалне осе симетрије мреже уземљених проводника која се по правилу поклапа са осом симетрије проводника трофазног система од кога потиче изворно поље. Поље дуж разматране осе је обично критично

за штићени објект који се налази испод мреже тако да се применом (3.7) добија управо најмеродавнији податак.

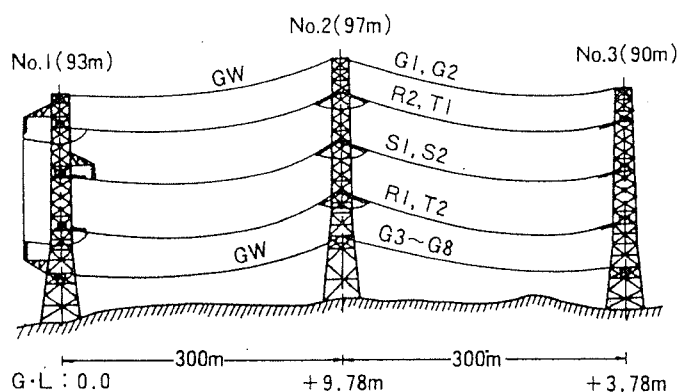
Слика 3.4 приказује максималне вредности степена редукције који се код хомогеног изворног поља постижу са различитим бројем уземљених проводника у зависности од односа S/H .

Код практичне примене датих релација и кривих на приложеним сликама треба имати у виду да оне пружају добру оцену степена редукције који се постижу непосредно испод проводника трофазног система где је јачина електричног поља највећа. У простору који није непосредно испод ових проводника јачине електричног поља су мање критичне тако да извесне грешке у проценама степена редукције на овим местима добијене уз претпоставку да је изворно поље хомогено немају велики практични значај.



Слика 3.4 Максималне вредности степена редукције на површини тла које се постижу са једним, два или три проводника и бесконачно густом мрежом уземљених проводника

Слика 3.5 приказује једно решење за ограничење јачине електричног поља испод двоструког далековада напона 1100 kV примењено у Јапану.



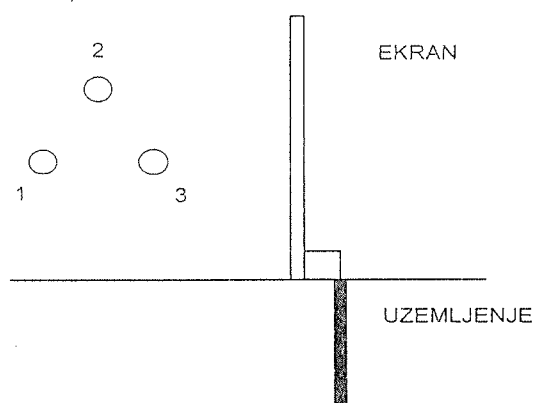
Слика 3.5 Далековод 2 x 1100 kV са заштитном мрежом испод фазних проводника

Далековод има два заштитна ужета изнад фазних проводника и заштитну мрежу сачињену од 6 проводника који су распоређени у хоризонталној равни испод фазних проводника који прате линију фазних проводника. Проводници заштитне мреже уземљени су везивањем за стубове далековода.

Овим решењем је на 1 м изнад тла на оси симетрије далековода постигнут степен редукције јачине електричног поља од 0.4.

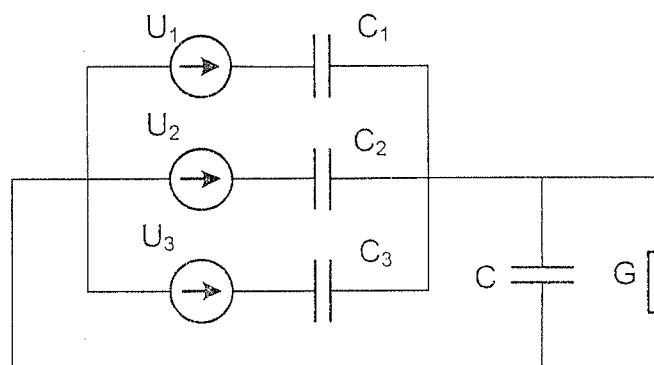
3.4 Примена проводних заштитних екрана

Заштита од електричног поља може се постићи постављањем екрана од проводног материјала између извора електричног поља и области која се штити. Ефикасна заштита се постиже ако је постављени екран уземљен преко малог отпора уземљења. На слици 3.6 приказан је трофазни систем проводника поред кога се поставља уземљени метални екран како би се смањило електрично поље иза екрана.



Слика 3.6 Проводници под напоном и заштитни екран

Потенцијал на који долази заштитни екран може се израчунати на основу заменске шеме приказане на слици 3.7.



Слика 3.7 Еквивалентна шема за прорачун напона на који долази метални екран

Једноставно се показује да се потенцијал U на који долази заштитни екран може израчунати применом израза

$$U = \left| \frac{\sum_{k=1}^3 U_k j\omega C_k}{G + j\omega C + \sum_{k=1}^3 j\omega C_k} \right| \quad (3.7)$$

Са $\underline{U}_k$ су означени напони трофазног система проводника, C_k су међусобни капацитети ових проводника и екрана, C је капацитет екрана, а G одводност уземљења екрана.

Ако је одводност уземљења много већа од капацитивне кондуктансе екрана према земљи ($G \gg \omega C$), што треба постићи, израз (3.7) постаје

$$U = \left| \frac{\sum_1^3 \underline{U}_k j \omega C_k}{G} \right| \quad (3.8)$$

Јачина електричног поља иза екрана утолико је мања што је мањи напон U који се успоставља на екрану. Како се види, овај напон се смањује смањивањем отпора уземљења преко кога је уземљен екран. Такође се уочава да је напон U већи што су веће разлике између међусобних капацитета поједих фаза и екрана. У тривијалном случају, када су ови капацитети једнаки а систем напона симетричан, напон U био би једнак нули и када екран не би био уземљен. Супротно, што су разлике између поменутих капацитета веће већи је и напон екрана. Поменуте разлике расту са приближавањем екрана проводницима.

Највећи степен редукције електричног поља постиже се у непосредној близини екрана на његовом средишњем делу.

Као што је познато, метални екрани се користе код већине конструкција каблова високог напона где они служе за радијализацију електричног поља око проводника. Њима се, међутим, електрично поље око кабла ограничава само ако су уземљени, како се закључује из претходне анализе. Затворени цилиндрични екрани од алуминијума или челика се користе код постројења изолованих гасом SF6 и код генераторских сабирница у електранама. Пошто су од проводног материјала, разматрани екрани уједно смањују и јачину магнетске индукције у области која се штити, како је показано у Глави 2.

