

# Tehnologija rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima

---

**Arić, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:505030>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**TEHNOLOGIJA RADA POD NAPONOM NA  
VISOKONAPONSKIM POSTROJENJIMA**

**Diplomski rad**

**Matej Arić**

**Osijek, 2018.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 14.05.2018.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Matej Arić
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D 900, 27.09.2017.
<b>OIB studenta:</b>	49546038533
<b>Mentor:</b>	Doc.dr.sc. Goran Knežević
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	Vladimir Caha
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr.sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Krešimir Fekete
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Tehnologija rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Diplomski rad će obraditi trenutno postojeće tehnologije rada pod naponom na postrojenjima visokog napona u svijetu, specifične uvjete zaštite elektromontera i postrojenja prilikom izvođenja radova, te upotrebe različitih rješenja za sigurno dovođenje elektromontera na potencijal postrojenja. (sumentor: Vladimir Caha, HEP NOC)
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	14.05.2018.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 23.05.2018.

**Ime i prezime studenta:**

Matej Arić

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D 900, 27.09.2017.

**Ephorus podudaranje [%]:**

2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Tehnologija rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Goran Knežević

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. POVIJEST TEHNOLOGIJE RADA POD NAPONOM NA VNP-u .....	3
3. RAZLIČITE TEHNOLOGIJE RADA POD NAPONOM NA VNP-u .....	6
3.1. Rad pod naponom na VNP-u u Francuskoj.....	6
3.1.1. Trening i obuka osoblja za rad pod naponom .....	7
3.1.2. Monteri obučeni za rad na visokonaponskoj prijenosnoj mreži.....	8
3.1.3. Pravila rada pod naponom.....	10
3.1.4. Sigurnost montera .....	11
3.1.5. Tri metode rada pod naponom .....	12
3.2. Rad pod naponom na VNP-u u Rumunjskoj.....	14
3.2.1. Održavanje nadzemnih prijenosnih vodova .....	14
3.2.2. Najčešći radovi pod naponom na VNP-u.....	15
3.3. Rad pod naponom na VNP-u u Poljskoj .....	22
3.3.1. Obuka za rad pod naponom.....	22
3.3.2. Izvođenje radova pod naponom .....	25
3.3.3. Upotreba helikoptera i bespilotnih letjelica .....	26
3.4. Rad pod naponom na VNP-u u Portugalu.....	28
3.4.1. Trening centar za rad pod naponom.....	29
3.4.2. Metode čišćenja pod naponom.....	31
3.5. Rad pod naponom na VNP-u u Italiji.....	34
3.5.1. Onečišćenje i rad pod naponom .....	34
4. UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKOG POLJA NA ČOVJEKA .....	37
4.1. Električno polje .....	38
4.2. Magnetsko polje .....	42
4.2.1. Simulacija utjecaja magnetskog polja.....	42
4.2.2. Zaštita od magnetskog polja.....	46

5. OSTALE OPASNOSTI PRI RADU POD NAPONOM NA VNP-u.....	49
5.1. Opasnost od električnog luka .....	49
5.1.1. Razlozi upotrebe opreme za zaštitu od električnog luka.....	49
5.1.2. Upotreba odijela za zaštitu od električnog luka .....	50
5.1.3. Upotreba rukavica za zaštitu od električnog luka .....	50
5.1.4. Upotreba kacige za zaštitu od električnog luka.....	51
5.1.5. Softver za proračun energije električnog luka ( <i>BSD Arc Calculator</i> ) .....	52
5.2. Opasnost od pada .....	52
5.2.1. Oprema za pozicioniranje montera .....	53
5.2.2. Oprema za sprječavanje pada montera na tlo.....	53
6. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA RADA POD NAPONOM NA PRIJENOSNOJ MREŽI .....	56
6.1. Vrste troškova koji se javljaju pri održavanju.....	56
6.2. Proračun troškova.....	58
7. ZAKLJUČAK .....	62
LITERATURA.....	63
SAŽETAK.....	65
ABSTRACT .....	65
ŽIVOTOPIS .....	66

## 1.UVOD

Živimo u svijetu u kojem su zahtjevi tržišta za kvalitetnom i pouzdanom isporukom električne energije sve veći, stoga je cilj svih svjetskih elektroprivreda svojim kupcima omogućiti takvu isporuku. Razlozi za to u našem su okruženju i ponekad ih nismo ni svjesni. Zamislimo samo koji problemi nastaju pri prestanku isporuke energije u prometu zbog ispada semafora, koliko se nesreća i krađa dogodi pri isključenju rasvjete, koliko je nezadovoljstvo ljudi kojima je onemogućen prijem informacija na televiziji, radiju i sl. Navedene stavke bitne su, no najveći problemi pri prekidu napajanja javljaju se u industriji, gdje i najkraći ispad iz pogona može prouzročiti jako velike štete i financijske gubitke. Kako bi se štete i gubitci sveli na minimum, a kvaliteta isporuke električne energije podigla na najvišu moguću razinu, sve veću pozornost dobiva tehnologija rada pod naponom.

Nekada se rad pod naponom obavljao samo u iznimnim situacijama, dok danas on zauzima sve veću ulogu pri dogradnji, popravku, zamjeni, kao i čišćenju svih dijelova elektroenergetskog sustava bez prekida opskrbe potrošača električnom energijom. Ono što je bitno kod tehnologije rada pod naponom jest to da u elektroenergetskim sustavima nisu potrebne nikakve preinake za njezinu primjenu jer su postojeći alati i oprema toliko unaprijeđeni i prilagođeni upravo standardnim sustavima, no kod izgradnje novih sustava svakako treba uzeti u obzir sve bitne stavke kako bi se olakšali budući radovi pod naponom.

Uvođenjem tehnologije rada pod naponom svaka elektroprivreda mora biti spremna na ulaganja i izdvajanje novčanih sredstava za opremu, obuku, itd. Međutim, ta uložena sredstva vraćaju im se kroz uštede nastale izvođenjem radova pod naponom, a može se reći da tako ulažu i u ugled svoje elektroprivrede, što na kraju rezultira i zadovoljnim kupcima električne energije. Još jedna pozitivna strana te tehnologije jest da zbog ulaganja u obuku i sigurnost izvršitelja radova pod naponom kao i bitne mjere i provjere koje se provode prije obavljanja radova dovode do toga da se broj nesreća sveo gotovo na nulu.

Poznato je da se elektroenergetske mreže prema visini napona mogu podijeliti na niskonaponsku mrežu (< 1 kV), sredjenaponsku ili distribucijsku mrežu (1 kV – 35 kV) te visokonaponsku ili prijenosnu mrežu (>110 kV), sukladno tome i tehnologija rada pod naponom može se podijeliti na tri razine. U ovom radu detaljno je opisana upravo tehnologija rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima (dalje u tekstu „VNP“), odnosno na prijenosnoj mreži.

Tehnologija rada pod naponom na VNP-u javlja se već tridesetih godina prošlog stoljeća. Može se reći da je trenutno dosta zastupljena u svijetu, a one elektroprivrede kod kojih ta tehnologija još uvijek nije u primjeni svakako rade na tome da ju omoguće u bližoj budućnosti.

U prvom dijelu ovoga rada navedeno je nešto o povijesti tehnologije rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima, točnije prikazan je razvoj te tehnologije od prvih postavljanja radnika na potencijal vodiča pa sve do danas. Drugi dio rada prikazuje različite organizacije tehnologije rada pod naponom u zemljama koje su, možemo reći „korak ispred“ po zastupljenosti takve vrste tehnologije. Opisan je razvoj tehnologije u svakoj od njih, organizacija obuke i treninga te iznesene najčešće vrste radova koje se obavljaju na postrojenjima visokog napona. U radu su također obrađene moguće opasnosti za montera, utjecaj elektromagnetskog polja te opasnost od električnog luka i opasnost od pada. Za svaku od njih detaljno su opisani vrlo učinkoviti načini zaštite kako se ni na koji način ne bi ugrozilo zdravlje montera. U posljednjem dijelu rada na primjeru prijenosne mreže prikazana je tehno-ekonomska analiza rada pod naponom na VNP-u koja uspoređuje troškove izmjene odstojnika učinjene u beznaponskom stanju s troškovima kada se primjenjivala tehnologija rada pod naponom.



## 2. POVIJEST TEHNOLOGIJE RADA POD NAPONOM NA VNP-u

Rad pod naponom se smatra novom tehnologijom, ali već početkom prošloga stoljeća ljudi shvaćaju koliko bi ta vrsta tehnologije doprinijela radu elektroenergetskog sustava i zadovoljstvu potrošača. Glavne metode izvođenja radova bile su metoda rada u dodiru (niski napon) te metoda rada na udaljenosti (srednji napon), a pojavom visokih napona kao i velikih konstrukcijskih rastojanja između radnih dijelova dolazi se do ideje tehnologije rada pod naponom na visokonaponskom postrojenju (VNP), gdje je glavna metoda rad na potencijalu, kod koje se montera postavlja na potencijal vodiča, nakon čega obavlja potrebne radove na uobičajen način. Naravno postoje zemlje koje su prednjačile, a samim time i danas prednjače u takvoj vrsti tehnologije, te će u nastavku biti riječi o razvoju tehnologije rada pod naponom na VNP-u u nekima od tih zemalja.

U bivšem SSSR-u bilježe se prve primjene rada pod naponom na VNP-u, gdje se 1942. godine izvode radovi na dalekovodima naponske razine 110 kV s drvenim stupovima. Ondje je korištena metoda rad na potencijalu, pri čemu drveni stup predstavlja izolaciju prema zemlji. Zbog navedenoga metoda rada na potencijalu naziva se i ruska metoda.

Godine 1948. izmijenjeni su ovjesni izolatori na vodu naponske razine 287 kV u Los Angelesu. Pojavom viših napona, a samim time i dužih motki koje su u početku bile izrađene od drveta, dolazi do problema zbog nemogućnosti rukovanja zbog njihove težine. Rezultat je toga, sredinom 1950-ih, usvajanje stakloplastike (engl. *fiberglass*) kao materijala za rad pod naponom. 1959. godine počeo se koristiti novi materijal, stručnjacima poznat pod nazivom *epoxyglass*, koji je korišten na vrlo visokim naponskim vodovima (735 kV) u SAD-u i Kanadi, te je potpuno istisnuo upotrebu drveta kao materijala za izradu motki. Tehnologija rada pod naponom u Brazilu javlja se 1955. godine na naponskoj razini od 500 kV. 1981. godine u Peruu je zabilježena izmjena izolatora na vodu 220 kV.

U Švedskoj je prvi slučaj rada pod naponom na VNP-u zabilježen 1951. godine. Bila je to izmjena izolatora na prijenosnom vodu naponske razine 132 kV.

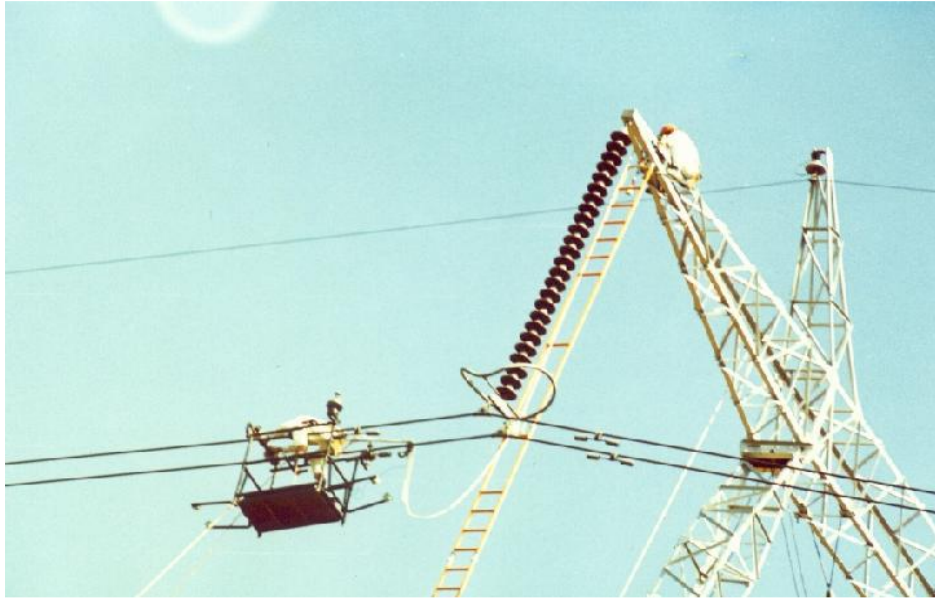
U Engleskoj specifične meteorološke prilike donekle odgađaju primjenu rada pod naponom. Ipak, 1955. godine velika zamjena drvenih stupova predstavlja početak razvoja primjene rada pod naponom na sredjenaponskim i visokonaponskim dalekovodima [1].

Rad pod naponom na VNP-u u Francuskoj javlja se 1965. godine. Veliki zamah primjene rada pod naponom na 400 kV počinje razvojem nuklearnog programa. Optimalno visoki angažman nuklearnih elektrana ne bi se mogao ostvariti bez većih dogradnji 400 kV mreža da se ostalo pri remontima uz isključenje voda iz pogona. Ondje se primjenjuju sve metode rada pod naponom. Smatra se da danas imaju najveći stupanj obuhvata rada pod naponom i vrlo uzornu organizaciju razvoja tehnologija, opreme i obrazovanja [1].

Povećanjem potražnje za električnom energijom u Mađarskoj se pojavljuju naponske razine 400 kV i 750 kV, pa samim time raste i potreba za rad pod naponom na tim visokonaponskim razinama. Sredinom 1970-ih godina zahvaljujući obukama u Francuskoj, kao i istraživanjima vlastitih inženjera, uvodi se metoda rada na potencijalu koja je i danas ondje isključivo jedina metoda za rad na visokonaponskim postrojenjima. Danas imaju i posebno odvojene obrazovne centre za rad pod naponom (niski, srednji i visoki napon).

Razvoj rada pod naponom na VNP-u u Poljskoj kreće 1975. godine kada preuzimaju iskustva za rad na naponskim razinama 110 – 750 kV od Mađarske, Amerike, Rusije i Njemačke. Godine 1990. održana je obuka za trenere i radnike (montere) za rad pod naponom na visokonaponskim nadzemnim vodovima utemeljena na Njemačkoj tehnologiji, te se iste godine obavlja prvi rad na visokonaponskom postrojenju u toj zemlji (zamjena izolatora na 400 kV razini). Od 1994. neki radovi na VNP-u obavljaju se uz pomoć helikoptera, što je dosta učinkovito i daje odlične rezultate. Od 2003. godine pomno prate rad pod naponom u Argentini i usvajaju metode tamošnjih inženjera u teoriji i praksi.

Zanimanje za rad pod naponom u Rumunjskoj javlja se 1975. godine, što rezultira ugovorom s bivšim DDR-om za provedbu rada pod naponom 1978. godine. Neposredno nakon toga kreće obuka tima za rad pod naponom u Njemačkoj. Rezultat obuke bila je prva izmjena izolatora kao i tehnička revizija vodiča koristeći mobilnu korpu na naponskoj razini 400 kV, što je vidljivo na Slici 2.1.



*Sl. 2.1. Prvi rad pod naponom u Rumunjskoj [2].*

Rad pod naponom na VNP-u u Portugalu prvi se puta primjenjuje 1991. godine. Bilo je to pranje visokonaponskih vodova sa zemlje i do tada gotovo nije ni postojalo. Od 1993. godine ondje se primjenjuje pranje vodova uz pomoć helikoptera (Sl. 2.2.). Metoda je usvojena, a razlog su brzina i učinkovitost, što je bitno jer je bilo potrebno oprati linije duljine i do 1000 km, pa se time smanjuje vjerojatnost kvarova uzrokovanih onečišćenjem. Ako govorimo o zamjeni dijelova visokonaponskih vodova, treba spomenuti da je 1992. godine izmijenjen izolator na 400 kV vodu.



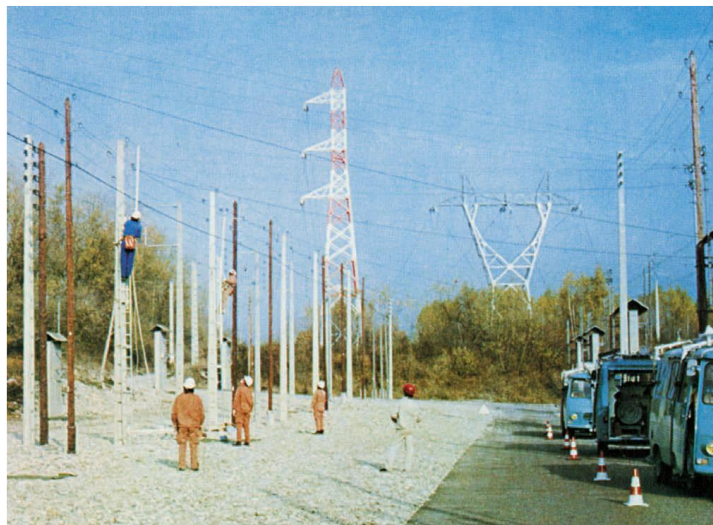
*Sl. 2.2. Pranje uz pomoć helikoptera [3].*

### 3. RAZLIČITE TEHNOLOGIJE RADA POD NAPONOM NA VNP-u

#### 3.1. Rad pod naponom na VNP-u u Francuskoj

EDF (franc. *Electricite de France*), odnosno Francuska elektroprivreda počinje razmatrati rad pod naponom pedesetih godina prošlog stoljeća. 1957. godine prekidi opskrbe kupaca uglavnom su bili posljedica prekida napajanja zbog radova te iznenadnih kvarova. Ti prekidi opskrbe bili su nezgodni za kupce koji teže povećanju kvalitete opskrbe. EDF je stoga odlučio započeti istraživačke misije u zemljama koje već koriste tehnologiju rada pod naponom, osobito u SAD-u, bivšem SSSR-u i Švedskoj. Cilj je bio ispitati pod kojim uvjetima se taj rad provodi te proučiti način na koji bi se isti mogao primijeniti na Francusku. 14. rujna 1960. EDF je osnovao Tehnički odbor za studije rada pod naponom, koji se sastojao od odjela za distribuciju, proizvodnju, prijenos, odjela za istraživanja i razvoj te odjela za stručno osposobljavanje čija je uloga bila značajna. Odjel za prijenos stvorio je grupu za rad pod naponom na VNP-u. Ta grupa bila je odgovorna za prikupljanje podataka iz istraživačkih misija te za početak razvoja metoda i alata pogodnih za francusku mrežu.

1964. godine postavljena je eksperimentalna mreža na otoku Ottmarsheim. Koristila se kako za razvoj operativnih postupaka tako i za trening montera na naponskoj razini 90 kV. Iste godine podignuti su poligoni za naponske razine 220 kV i 380 kV te su isti prikazani na Slici 3.1. Timovi su osposobljeni da sustavno provode radove pod naponom koji se brzo razvijao. 1965. godine započela je primjena metode rada na udaljenosti na visokonaponskim vodovima, a 1967. započinje provedba metode rada na potencijalu [4].



Sl. 3.1. Poligon za obuku montera iz 1964. godine (220 i 380 kV) [4].

Prekretna godina za rad pod naponom bila je 1970., kada je Odbor za rad pod naponom dovršio propise poznate pod naslovom Opće upute za rad pod naponom. Ti propisi temelje se na tri osnovne stavke: uporaba odobrenih alata i opreme, provjerena procedura te adekvatna obuka.

U kombinaciji s iskustvima drugih zemalja koje vrlo dugo primjenjuju rad pod naponom, Francuska je istaknula činjenicu da su metode rada pod naponom rezultat usklađivanja između dvaju dominantnih interesa za bilo kojeg distributera električne energije, a to su sigurnost montera i kvaliteta isporuke električne energije.

Početak devedesetih godina obilježila je upotreba helikoptera pri radu pod naponom. Također, početkom devedesetih godina francuski, mađarski, talijanski, portugalski i španjolski Odbor za rad po naponom odlučili su potaknuti razvoj tehnologija za rad pod naponom. Da bi to ostvarili, tih pet država osnovalo je međunarodnu konferenciju za rad pod naponom ICOLIM (engl. *International Conference on Live Maintenance*). Prva je održana 1992. u Mađarskoj, zatim 1994. u Francuskoj, 1996. u Italiji, 1998. u Portugalu i 2000. u Španjolskoj. Novi članovi konferenciji se pridružuju nakon 2000. godine, među kojima je i Hrvatska u kojoj se održala konferencija 2011. godine [4].

### **3.1.1. Trening i obuka osoblja za rad pod naponom**

Trening osoblja za rad pod naponom omogućuje 17 trening centara raširenih diljem zemlje. Jedan takav prikazan je na Slici 3.2. Svaki je odobren od strane Odbora za rad pod naponom. Trening centri su u vlasništvu Francuskog distributera električne energije (ERDF) i operatora prijenosne mreže Francuske (RTE). Prema dokumentu iz 2013. godine Francuski distributer električne energije (ERDF) ima 9 trenera za rad pod naponom u distribucijskom sustavu, dok operator prijenosne mreže Francuske (RTE) ima 5 trenera za obuku za rad pod naponom na VNP-u u prijenosnom sustavu.





*Sl. 3.2. Trening centar u Francuskoj [4].*

Profesionalni razvoj radnika za rad pod naponom temelji se na analizi rizika, proučavanju metoda te primjeni najboljih tehnologija u radu. Tečaj za trenere također se temelji na obučavanju i radu s iskusnim trenerima.

U skladu sa zahtjevima Odbora za rad pod naponom, treninzi imaju pristup koji dovodi do cilja da monterima imaju sposobnost prepoznavanja rizika. Treninzi uključuju teorijski i praktični dio. Praktični dio može se odrađivati izravno na mreži ili na poligonima za obuku. U početku se prolazi temeljna obuka, a nakon nje se monterima dalje specijaliziraju prema specifičnostima radnog mjesta za koje se obučavaju [4].

### **3.1.2. Monteri obučeni za rad na visokonaponskoj prijenosnoj mreži**

Postoji više od 300 montera diljem zemlje kako u specijaliziranim timovima za održavanje trafostanica tako i u timovima za održavanje visokonaponske prijenosne mreže. Rad u trafostanicama uglavnom uključuje zamjenu rastavne sklopke ili izolatora, zamjenu mjerne opreme, itd. Na prijenosnim vodovima (uglavnom 225 kV ili 400 kV) radovi uključuju zamjenu izolatora, popravak vodiča, zatezanje vodiča, postavljanje zaštite za ptice itd.

Ovisno o složenosti zadatka, pet do sedam montera može raditi pod nadzorom rukovoditelja radova (poslovođe). Taj posao zahtijeva vrlo precizne pokrete kako bi se održala vlastita sigurnost kao i sigurnost ostalih montera. Karakteristika tih visokonaponskih razina je velika sigurnosna (izolacijska) udaljenost kako bi se monteri zaštitili od električnih udara, što opremu i alat čini težima za rukovanje (teške izolacijske motke). Druga posebna značajka rada pod naponom na VNP-u je prisutnost intenzivnijeg elektromagnetskog polja. Iz tog razloga monter je opremljen posebnim vodljivim odijelom koje ga razlikuje od montera na nižim naponskim razinama. To radno odijelo radi na principu Faradayevog kaveza koji u potpunosti štiti od djelovanja električnog polja.

Kada je riječ o monterima potrebno je spomenuti i one koji obavljaju radove uz pomoć helikoptera. Operator prijenosne mreže Francuske (RTE) u svom vlasništvu ima 10 helikoptera, a još 2 su im na raspolaganju od strane podružnice *Airtelis*. Helikopter nudi brz i siguran način rada, osobito u brdovitim i teško dostupnim područjima. Svake godine obavi se između 30 i 50 radova pod naponom uz pomoć helikoptera, uglavnom na 225 kV i 400 kV naponskim razinama (Sl. 3.3.). Rad pomoću helikoptera najčešće obavljaju monteri koji su „nošeni“ u korpi ovješenoj o helikopter, no postoje i druge tehnologije.



*Sl. 3.3. Zamjena upozoravajućih kugli na prijenosnom vodu uz pomoć helikoptera [4].*

RTE, prema dokumentu iz 2013. godine, ima 64 obučena montera za tu vrstu rada pod naponom za održavanje visokonaponske prijenosne mreže. Za komplicirane i vremenski zahtjevnije radove korpa se postavlja na vodove te, nakon što je osigurana, otkapča se od helikoptera, dok kod jednostavnijih radova, kao što je postavljanje zaštite za ptice, korpa lebdi 30 do 80 metara ispod stabiliziranog helikoptera. Stoga veliku ulogu „igraju“ i piloti kako zbog već navedenog stabiliziranja helikoptera tako i zbog neizbježne komunikacije sa monterima. Kako bi se osigurala dobra komunikacija i piloti moraju biti prisutni u završnim fazama priprema za rad pod naponom koje traju 1 – 2 tjedna s ciljem detaljne razrade planiranih radova. Valja još spomenuti kako se uz sve zahtjeve trebaju uzeti u obzir i aeronautički zahtjevi kao što su pravila o zračnom prometu, red letenja zrakoplova te krivulje utjecaja vjetrova, temperature i nadmorske visine na performanse helikoptera [4].

### **3.1.3. Pravila rada pod naponom**

Postoje definirana pravila koja monteri moraju slijediti pri radu pod naponom. Za razliku od najraširenijih pristupa koji se temelje na skupu detaljnih i unaprijed određenih operativnih postupaka za svaku vrstu rada pod naponom, francuska tehnologija rada pod naponom više se temelji na inicijativi i slobodi radnika. Temeljnih pet načela te tehnologije su: pravila određena prema radnim uvjetima (engl. *Working conditions*), odobreni i redovno ispitivani alati, posebna obuka za rad pod naponom od strane odobrenih trening centara, priprema i organizacija mjesta rada te nadzor pri obavljanju radova.

Pravila određena prema radnim uvjetima omogućuju kontrolu rizika kratkog spoja i električnog udara. Za svaku naponsku razinu definirani su određeni radni uvjeti koji prate slijed svih operacija od početka izvođenja rada pod naponom sve do završetka. Kao i radni uvjeti, tehnički opisi alata svrstavaju se prema naponskim razinama. Svaka tehnička lista određuje funkciju pojedinog alata, njegove električne i/ili mehaničke karakteristike, kao i njegova područja primjene, skladištenja, održavanja i kontrolna ispitivanja. U praksi prije svakog posla bez obzira na naponsku razinu, posao koji se izvodi isplaniran je do najsitnijeg detalja. Rukovoditelj radova analizirat će rizike, odabrati metodu rada koja će se koristiti, definirati potrebne alate i napisati postupak izvođenja radova. Na početku rada rukovoditelj opisuje postupak izvođenja radova svim monterima, tako da svi znaju svoju ulogu, nakon čega se kreće u pravilno izvođenje radova. Taj pristup omogućava prepoznavanje određenih rizika unaprijed te tako i njihovo sprječavanje [4].



### 3.1.4. Sigurnost montera

Pravila za rad pod naponom sastavljena su iz određenih studija, izračuna, eksperimenata kao i analizom rizika. Kao prvo, bitno je osigurati u bilo kojem trenutku i za svaku naponsku razinu izolaciju montera i ostalih vodljivih dijelova koji se nalaze u radnom području (osim metode rada na potencijalu). Ako je izolacija probijena između dvije točke na različitim potencijalima (faza/zemlja ili između faza) nastaje kratki spoj, a ako je i monter uključen u taj krug, nastaje električni udar. Održavanje izolacije zahtijeva definiranje minimalnih udaljenosti između montera i vodljivih dijelova te proučavanja vodljivosti alata. Pri definiranju tih udaljenosti uzima se u obzir radni prenapon (uspostavljanjem određenog režima rada) i prenapon uslijed udara munje (zabranom rada tijekom olujnog nevremena). Osim izolacije, preporučuje se kontrolirati i različite tokove snaga na mreži tijekom rada pod naponom kako bi monter bio zaštićen od posljedica električnog udara, kao i slučajnog električnog luka. Uzimaju se u obzir tri toka snage. Prva je radna snaga zbog prolaska struje kroz mrežu, zatim jalova snaga zbog indukcije, ako se radi na mreži pod naponom koja nije opterećena te snaga kratkog spoja u slučaju kvara izolacije.

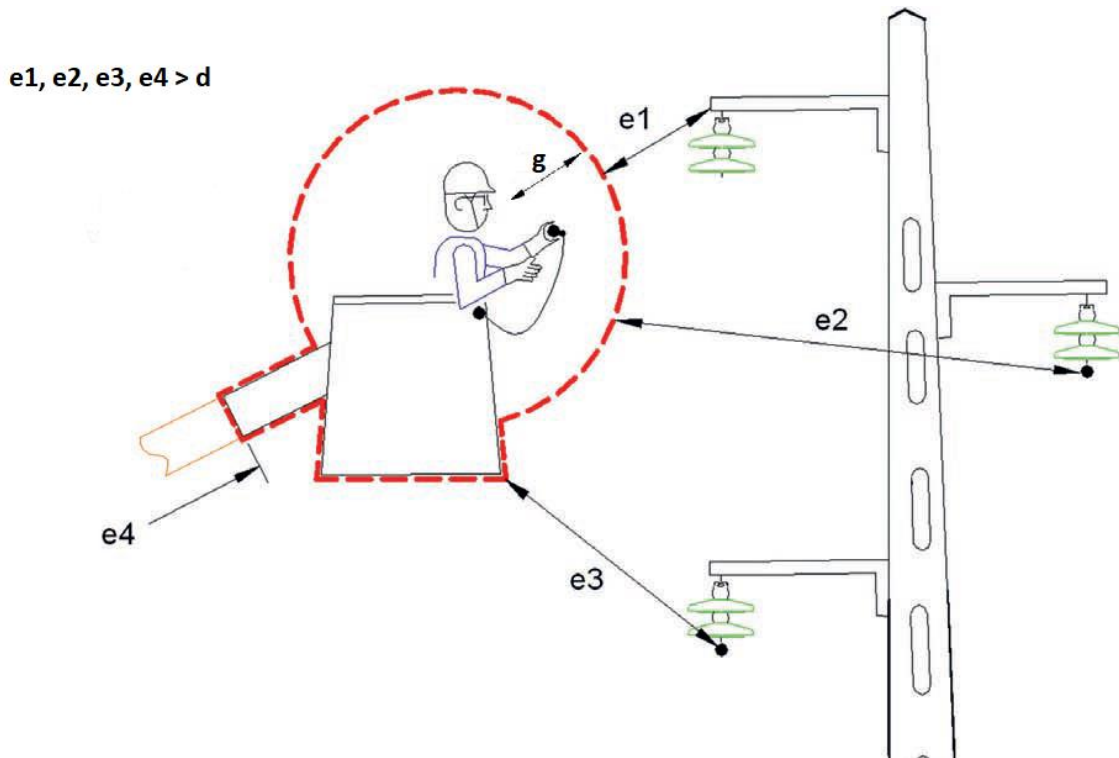
Na prijenosnoj se mreži kao izolator koristi zrak koji ima visoka dielektrična svojstva. Osnovni je princip zaštite montera konstantno održavanje zračne udaljenosti između montera i dijelova koji su pod naponom (osim kada je u pitanju metoda rada na potencijalu). Ta sigurna udaljenost, odnosno radna udaljenost ( $d_{LW}$ ), je zbroj potrebne naponske udaljenosti ( $d$ ) te udaljenosti koja uzima u obzir kretnje montera ( $g$ , za visoki napon iznosi 0.5 m) [4].

$$d_{LW} = d + g \quad (3-1)$$

**Tab. 3.1.** Definirane radne udaljenosti [4].

Naponska razina	Naponska udaljenost (d)	Radna udaljenost ( $d_{LW}$ )
<i>Do 1000 V</i>	<i>0 m</i>	<i>0,30 m</i>
<i>20 kV</i>	<i>0,10 m</i>	<i>0,60 m</i>
<i>63 kV</i>	<i>0,30 m</i>	<i>0,80 m</i>
<i>90 kV</i>	<i>0,50 m</i>	<i>1,00 m</i>
<i>225 kV</i>	<i>1,10 m</i>	<i>1,60 m</i>
<i>400 kV</i>	<i>2,00 m</i>	<i>2,50 m</i>

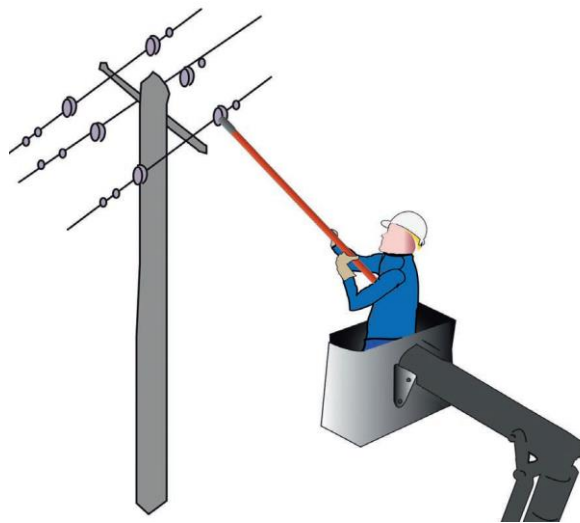
Na slici 3.4. označena je udaljenost  $g$ , kao i udaljenosti  $e1$ ,  $e2$ ,  $e3$ ,  $e4$ , koje moraju biti veće od potrebne naponske udaljenosti  $d$  definirane za svaku naponsku razinu prema Tablici 3.1.



Sl. 3.4. Definirane udaljenosti za rad pod naponom [4].

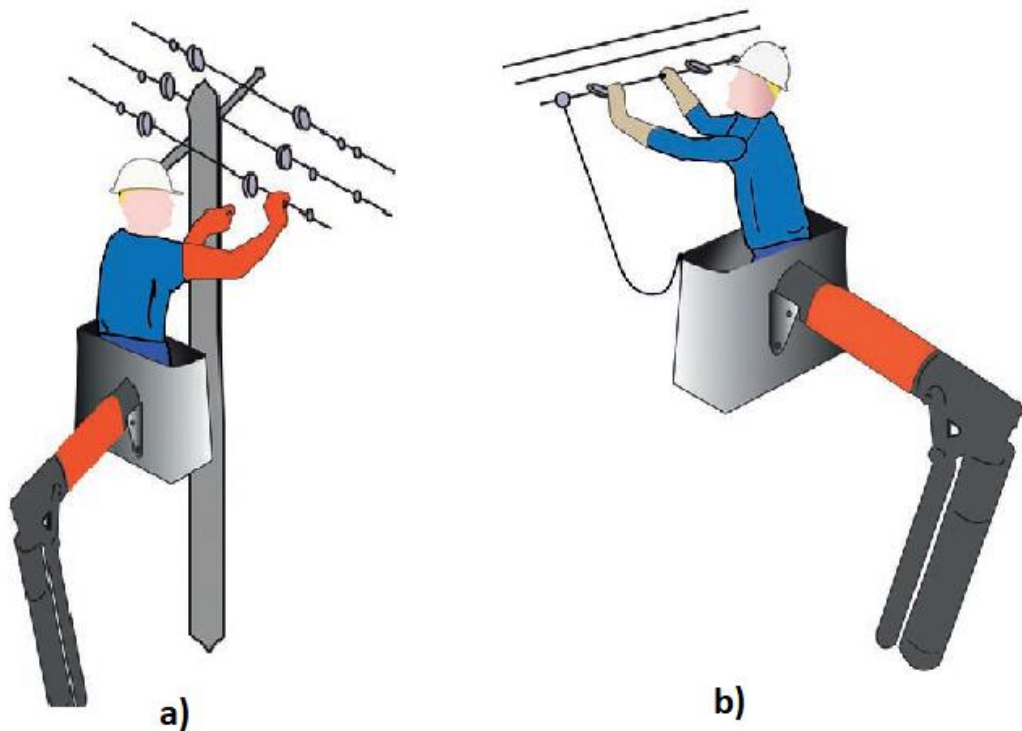
### 3.1.5. Tri metode rada pod naponom

Postoje tri metode rada pod naponom: metoda rada na udaljenosti, metoda rada u dodiru te metoda rada na potencijalu.



Sl. 3.5. Metoda rada na udaljenosti [4].

Kod metode rada na udaljenosti (metoda koja se prva razvila), monter se nalazi na potencijalu zemlje (Sl. 3.5.). Kako ne bi došao u dodir s izloženim dijelovima pod naponom, koristi izolacijske alate postavljene na kraju motke ili izolacijsku užad. Ta se metoda koristi na svim naponskim razinama i zahtijeva niske investicije, ali je ergonomski ograničena, osobito kada se treba raditi na velikim udaljenostima.



*Sl. 3.6. a) Metoda rada u dodiru, b) Metoda rada na potencijalu [4].*

Metoda rada u dodiru, prikazana iznad na Slici 3.6.a), kako i sam naziv govori, izvodi se direktnim dodirivanjem dijelova pod naponom korištenjem izolacijskih rukavica. Treba napomenuti kako tu metodu nije moguće koristiti pri radu pod naponom na VNP-u. Na slici 3.6.b) prikaz je metode rada na potencijalu, gdje je monter izoliran od zemlje i postavljen na potencijal voda (slično kao ptice koje stoje na vodiču). Tijekom rada uvijek se mora održavati sigurnosna udaljenost između drugih dijelova na različitom potencijalu (ostale faze i dijelova na potencijalu zemlje). Ta je metoda ergonomski jako prihvatljiva. Rad na potencijalu obavlja se uz pomoć izolacijskih platformi, izolacijskih ljestvi te mobilnih korpi za rad na vodovima [4].

## **3.2. Rad pod naponom na VNP-u u Rumunjskoj**

Rad pod naponom u Rumunjskoj započeo je obučavanjem tima iz Sibiu 1979. godine u Berlinu-Neuenhagenu (bivša Njemačka Demokratska Republika). 1982. i 1983. godine održano je osposobljavanje pet timova za rad pod naponom u Sibiu. Bivša tvrtka *SUCREE* – Sibiu (danas *RETRASIB*) proizvela je niz alata za opremanje novih timova odnosno za dopunu njihovih setova alata za rad pod naponom. Između 1982. i 1994. razvijeno je i testirano 58 tehnologija (procedura) rada pod naponom za sve naponske razine.

2002. godine osnovan je Nacionalni odbor za rad pod naponom. Odbor zajedno s Rumunjskim operatorom prijenosnog sustava (rum. *C. N. Transelectrica S. A.*) i podružnicom za održavanje prijenosnog sustava (rum. *S. C. Smart S. A.*) sudjeluje svake tri godine na ICOLIM-u, međunarodnoj konferenciji o radu pod naponom.

Danas se tehnologije za rad pod naponom neprekidno razvijaju i koriste široku paletu alata proizvedenih u Njemačkoj, Rumunjskoj, Francuskoj, SAD-u, Brazilu i Poljskoj.

Budući da je *S. C. Smart S. A.* tvrtka za održavanje oko 10000 kilometara nadzemnih prijenosnih vodova, jedan je od glavnih zadataka poboljšanje kvalitete rada pod naponom te razvoj novih tehnologija [5].

### **3.2.1. Održavanje nadzemnih prijenosnih vodova**

#### ***1. Pregled nadzemnih vodova***

Pregled vodova podrazumijeva radnje koje se sastoje od ocjenjivanja sukladnosti kroz promatranje, mjerenja ili usporedbe sa standardom opreme sustava. Cilj je pregleda procjena stanja svih komponenata vodova koji se sastoji od: općeg stajališta nadzemnog voda, vegetacije u trasi nadzemnog voda, križanja (telekomunikacijska linija, prijenosni ili distribucijski vodovi, ceste, željeznice, rijeke), pristupa, zgrada i drugih prepreka ispod nadzemnih vodova, komponenata voda, stanja temelja, stanja stupova, stanja aktivnih vodiča, stanja zaštitnog vodiča, stanja uzemljenja te aktivnosti korone.

#### ***2. Radovi u okruženju nadzemnog voda***

Radovi u okruženju nadzemnog voda izvode se u okruženju nadzemnog voda, ali ne pripadaju tehnologiji rada pod naponom. To podrazumijeva svu radnu aktivnost u kojoj radnik dijelom

svog tijela, alatom ili bilo kojim drugim predmetom nalazi u blizini nadzemnog voda bez da uđe u aktivnu zonu rada pod naponom. Neke od tih vrsta radova su: rezanje vegetacije na trasi, provjera temelja, provjera uzemljenja, provjera strukture stupa, provjera vertikalnog stanja stupa, provjera uporišta. To su radovi koji se mogu vršiti bez primjene pravila rada pod naponom.

### ***3. Radovi u blizini dijelova pod naponom***

Neki radovi trebaju se obaviti dok je nadzemni vod pod naponom, ali radnici ne ulaze u aktivnu zonu rada pod naponom. Neke od tih vrsta radova su: obnavljanje ili zamjena uporišta, uklanjanje neželjenih predmeta sa stupova, uklanjanje neželjenih predmeta s izolatorskih lanaca i vodiča, radovi na noćnim uređajima za upozorenje, priprema stupa za bojanje, bojanje stupa, radovi na uzemljenju, provjeravanje i održavanje upozoravajućih kugli.

### ***4. Radovi na dijelovima pod naponom***

Radovi na dijelovima pod naponom mogu biti:

- a) Radovi na aktivnim vodičima: popravak oštećenih vodiča, pregled i održavanje odstojnika, pregled i održavanje prigušivača vibracija, odmrzavanje vodiča.
- b) Radovi na izolatorskim lancima: pregled i zamjena izolatora, pregled i održavanje iskrišta, pregled i održavanje stezaljki, zamjena jednostrukog s dvostrukim izolatorskim lancima, pranje izolatora.
- c) Složeni radovi na nadzemnim vodovima (neki radovi teži su i zahtijevaju kompleksni inženjering i pripremu): podešavanje provjesa vodiča (zatezanje), zamjena aktivnih vodiča, postavljanje novih stupova ili zamjena starih [5].

## **3.2.2. Najčešći radovi pod naponom na VNP-u**

### ***1. Provjera trase***

Obično se pregledi nadzemnih prijenosnih vodova sastoje od: pregleda s tla, pregleda na visini, standardnog vizualnog pregleda helikopterom (Sl. 3.7.) te detaljnog vizualnog, infracrvenog i ultraljubičastog pregleda iz helikoptera.



*Sl. 3.7. Priprema helikoptera za pregled iz zraka [5].*

Danas je helikopter zamijenjen bespilotnim letjelicama (engl. *drone*) koje mogu imati različite oblike i tehničke karakteristike. Najnoviji je tip pregleda robot ovješeno vodiču. Postoje roboti koji se koriste za opće te oni koji se koriste za posebne preglede (pregled izolatorskih lanaca, pregled vodiča i procjena njegovog stanja te ostalo). Roboti koje su razvili *Hydro-Quebec*, *KEPCO* te *HIBOT* mogu prijeći prepreke na vodu (upozoravajuće kugle, odstoynike, ovjesne izolatore i dr.). Oni su korisni za provjeravanje dugih raspona vodiča.

Postavlja se pitanje može li se pregled voda od strane robota smatrati radom pod naponom. Odgovor na to pitanje jest pozitivan, sve dok roboti rade na vodu koji je pod naponom, taj rad smatra se radom pod naponom, ali ako oni nisu u kontaktu s vodom i održavaju udaljenost veću od minimalne udaljenosti pristupa, tada se to ne smatra radom pod naponom. Za robote koji su ovješeni smatra se da od početka pripadaju radu pod naponom jer su u izravnom kontaktu s vodičem.

Najnovija je tehnika pregleda LIDAR (eng. *Light Detection and Ranging*), skeniranje voda pomoću laserskih uređaja. Vod se skenira laserom koji je postavljen na trup helikoptera. On pruža digitalne 3D informacije o obliku zemljine površine. Koristeći tu metodu može se odrediti vegetacija i teren. Dobiju se 3D digitalne karte vodova i trasa, kao i fotorealističkih 3D prikaza. Svi se podaci mogu obrađivati pomoću raznih programa [5].

## ***2. Zamjena vodiča pod naponom***

Zamjena vodiča (koristeći istu vrstu vodiča ili visoko temperaturni vodič) treba neke pomoćne strukture postavljene na postojeće stupove ili blizu njih. Sigurnosnu udaljenost treba održavati cijelo vrijeme. U nekim slučajevima koriste se pomoćni drveni stupovi postavljeni u blizini stupova. Postoje konkretni slučajevi gdje su za zamjenu vodiča upotrijebljene dodatne strukture postavljene na stupovima kao i robotska ruka za privremeni ovjes vodiča (Sl. 3.8.). Ta robotska ruka može se koristiti za ovjes jedne ili sve tri faze. Također se za neke projekte mogu koristiti dvije robotske ruke ili više njih.



***Sl. 3.8. Primjer sve tri faze ovješene na robotsku ruku [5].***

Radovi se mogu vršiti pomoću raznih uređaja (kamioni, helikopteri i dr.). Tijekom tih operacija sustav uzemljenja predstavlja opasnost za sigurnost montera. Mjere opreza trebaju uključivati prostirke koje se koriste za održavanje sve opreme na zajedničkom potencijalu, sigurnosne mjere pristupa toj podlozi i ograde za kontrolu pristupa [5].



### ***3. Podešavanje provjesa vodiča***

Podešavanje provjesa vodiča vrlo je težak postupak održavanja koji se obavlja u uvjetima rada pod naponom.

Pronađena je metoda za privremeno poboljšanje provjesa u određenom rasponu. Tehnologija se sastoji od smanjenja provjesa pomoću stezaljki sa šipkama, što je vidljivo na Slici 3.9. Vod se zateže pomoću kolotura i blokira se stezaljkama. Velika je prednost kratko vrijeme potrebno za izvršavanje metode kao i to da nema rezanja vodiča jer je to samo privremeni posao. Tek kada se vod može dovesti u beznaponsko stanje (isključiti), vodiču se treba dugoročno podesiti provjes.



*Sl. 3.9. Podešavanje provjesa vodiča na prijenosnom nadzemnom vodu [5].*



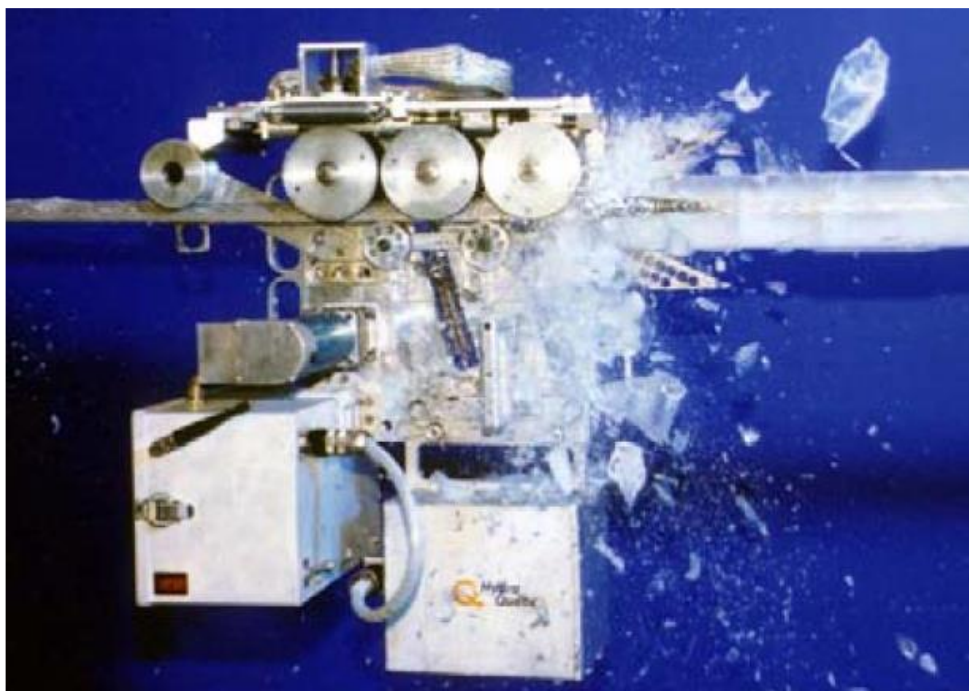
Za korištenje metode rada na potencijalu, odnosno za postavljanje radnika na potencijal voda koristi se dizalica (Sl. 3.10.), a u slučaju nižih naponskih razina, s manjim razmakom vodiča od zemlje, može se koristiti izolirana skela [5].



*Sl. 3.10. Postavljanje radnika na potencijal vodiča pomoću dizalice [5].*

#### **4. Odleđivanje vodiča**

Veliki problem za održavanje visokonaponskih prienosnih vodova je odleđivanje vodiča. To se može učiniti korištenjem različitih tehnika, ali samo u nekim okolišnim uvjetima. Tvrtka *Hydro-Quebec* razvila je robot *LineROVer* koji se u početku koristio za odmrzavanje vodiča (Sl.3.11.). Taj je robot dalje razvijen i korišten za pregled vodiča [5].



*Sl. 3.11. Odleđivanje pomoću LineROver robota [5].*

### ***5. Zamjena stupa***

Zamjena je stupa uobičajeni posao za niskonaponske i sredjenaponske vodove. Zamjena stupa znači korištenje privremene izolacijske strukture postavljene blizu stupa, što privremeno zamjenjuje postojeći stup.

Na visokonaponskim vodovima problem nije tako lako rješiv, ali postoje rješenja. Novi se stup gradi na novom temelju te se za prebacivanje vodiča na novi stup koristi dizalica s izoliranom rukom i/ili helikopter.

Ta vrsta zahtjevnih poslova nije redovna vrsta rada pod naponom. Ali ponekad, zbog važnosti vodova (vodovi za prijenos snage iz elektrana) i ekonomskih ograničenja, takvi radovi izvršavaju se pod naponom. Naravno, s obzirom na složenost projekta, potrebno je izvršiti mehaničke i električne proračune [5].

### ***6. Korištenje helikoptera pri radu pod naponom***

Korištenje helikoptera bitno je pri radu pod naponom. S obzirom na to da se sve više novih vodova izgrađuje isključivo dobavom opreme helikopterom (nepristupačna područja), i radovi pod naponom na takvim vodovima mogu biti učinjeni pomoću helikoptera. Nizanje vodiča i

postavljanje stupova samo su neki od radova koji se obavljaju pomoću helikoptera. Postoje i drugi manji radovi izvedeni pomoću helikoptera u područjima gdje druga vrsta pristupa nije moguća.

Helikopter se koristi za pregled, postavljanje montera na potencijal, radove na zaštitnim vodičima (zamjena upozoravajućih kugli, zamjena ili premještanje prigušivača vibracija, postavljanje naprava za zaštitu ptica, popravak zaštitnog vodiča) te ostale radove koje obilježava teški pristup radnom području [5].

### ***7. Pranje izolatora***

Pranje izolatora neophodno je u zagađenim područjima. Sve razvijene metode uključuju rad pod naponom. Pranje se može obaviti sa stupa, pomoću posebnog vozila s tla (Sl. 3.12.) te korištenjem helikoptera [5].



*Sl. 3.12. Pranje izolatora s autoplatforme [5].*

### **3.3. Rad pod naponom na VNP-u u Poljskoj**

Rad pod naponom u Poljskoj započeo je 1933. godine. Od 1975. godine započela su preuzimanja francuskog iskustva za rad pod naponom na niskonaponskim postrojenjima, irskog iskustva za rad na srednjenaponskim postrojenjima, kao i mađarskog, njemačkog, ruskog, talijanskog te američkog iskustva za rad pod naponom na visokonaponskim postrojenjima 110 – 750 kV [6].

1987. godine u Mađarskoj je obučen prvi monter za rad pod naponom na 400 kV mreži [7].

Unatoč konstrukcijskim razlikama između poljskih i mađarskih 750 kV mreža 1988. godine na poljskoj mreži izveden je rad pod naponom koji su proveli mađarski inženjeri [8].

Godine 1990. u Poljskoj je održana prva obuka trenera i montera za rad na 400 kV mreži, nakon čega su oni započeli provedbu programa rada pod naponom na visokonaponskoj mreži.

Prvi rad koji je izveden bila je izmjena izolatorskih šeširića, a 1992. godine izvedena je prva izmjena izolatora na 220 kV mreži [7].

1994. godine započinje upotreba helikoptera u svrhu rada pod naponom. 1997. godine oni su se koristili za nadzor nadzemnih vodova tijekom poplava, a 1998. godine za nadzor tijekom požara. Pokazalo se kako je helikopter izuzetno važan i pouzdan za izvođenje brojnih radova na nadzemnim vodovima [9].

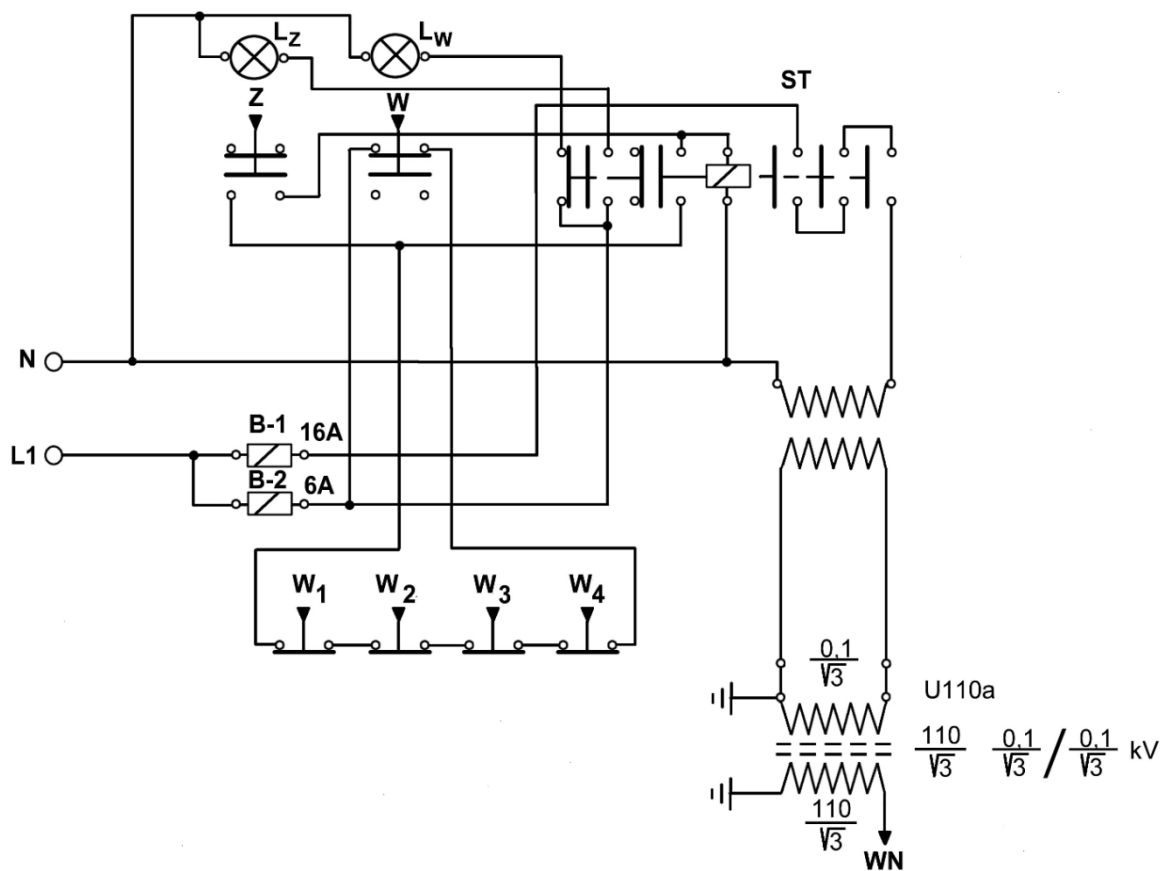
#### **3.3.1. Obuka za rad pod naponom**

Centar za obuku u Straszynu ima najbolje opremljen poligon za obuku u Poljskoj. Između ostalih sadrži poligone i za naponske razine 400, 220 i 110 kV i jedini su takvi u Poljskoj.

Poligon za rad na 400 kV nadzemnim vodovima, duljine 377 m, projektiran je i izgrađen 1990. godine (Sl. 3.14). Razlog njegove izgradnje bilo je povećanje kvarova staklenih kapastih izolatora i potpornih izolatora, instaliranih na 400 kV nadzemnim vodovima, koje je proizveo bivši Sovjetski Savez. Stupovi koji se koriste na poligonu, rešetkasti od pocinčanog čelika, također se koriste i u postojećoj 400 kV mreži u Poljskoj.

Gotovo sve vrste izolatora i izolatorskih lanaca koji se nalaze na nadzemnim vodovima u Poljskoj postavljene su na stupove za obuku. U slučaju postavljenog 220 kV ovjesnog izolatora moguće je obaviti obuku za rad pod naponom na 220 kV nadzemnoj mreži. Na poligonu kao fazni vodiči koriste se: 2 x AFL 8 – 525 mm<sup>2</sup>, 2 x AFL 6 – 240 mm<sup>2</sup> i vodič 1 x AFL 6 – 240 mm<sup>2</sup>. Vodiči su za zaštitu od udara munja tipa 2 x AFL 1,2 – 35 mm<sup>2</sup>, a njihov ovjes usklađen je

s ovjesom faznih vodiča. Ti su vodiči uzemljeni na svakom stupu i otpor uzemljenja zadovoljava zahtjeve zaštite od groma. Na poligonu se koriste informativne ploče i ploče za upozorenja. Tijekom praktičnog dijela obuke za rad pod naponom, pojedinačne faze (uvijek jedna po jedna) puštaju se u pogon (63 kV). Na svakom stupu postavljena je sigurnosna sklopka, što omogućuje trenutno prekidanje napajanja u slučaju nužde. Shematski prikaz napajanja 400 kV poligona naponom od 63 kV prikazan je na Slici 3.13.



Sl. 3.13. Shematski prikaz napajanja 400 kV poligona [10].



*Sl. 3.14. Pogled na 400 kV poligon [10].*

Proces osposobljavanja za rad pod naponom na 400 kV nadzemnim vodovima sastoji se od nekoliko faza. Prva faza uključuje proučavanje opreme za tehnologiju rada pod naponom i proučavanje osnovnih radova koji se izvode. To se obavlja na raspovima spuštenih stupova. Nakon što sudionici obuke svladaju vještine korištenja opreme i izvođenje osnovnih radova, započinje sljedeća faza, odnosno obuka izvođenja svih tehnologija rada pod naponom na uobičajenoj strukturi nadzemne mreže.

Poligon za obuku na 110 kV nadzemnoj mreži, vidljiv na Slici 3.15., duljine je 360 m, bio je izgrađen u blizini poligona za 400 kV nadzemne vodove, a 1993. moderniziran je za potrebe praktične obuke zaposlenih na nadzemnim vodovima visokog napona, uključujući i tehnologiju rada pod naponom. Pri izgradnji poligona primjenjivala su se ista tehnička rješenja kakva se pojavljuju i u poljskim mrežama. Stupovi korišteni na poligonu bili su tipični stupovi koji se koriste na aktivnim 110 kV nadzemnim mrežama u Poljskoj. Gotovo sve vrste izolatorskih lanaca i svih vrsta izolatora koji se pojavljuju u Poljskoj mreži instalirani su na stupovima za obuku, a nakon postavljanja 220 kV ovjesnog izolatora moguće je izvoditi obuku za rad pod naponom na 110 i 220 kV nadzemnoj mreži. U skladu s tradicijom izgradnje mreže u Poljskoj ovjesni izolatori su jednostruki. Fazni vodiči koji se koriste su AFL6 – 120, 185, 240 mm<sup>2</sup> i AFL8 – 525 mm<sup>2</sup>. Poligon je također opremljen i zaštitnim vodičem tipa 1 x AFL1.7 – 50 mm<sup>2</sup>. Opći pogled na 110 kV poligon prikazan je na Slici 3.15. [10].





*Sl. 3.15. Opći pogled na 110 kV poligon [10].*

### **3.3.2. Izvođenje radova pod naponom**

Rad pod naponom na 400 kV mreži izvodi se na temelju usvojene i prilagođene njemačke tehnologije rada na potencijalu. Monteri koji obavljaju rad pod naponom moraju posjedovati certifikat koji dobiju nakon osposobljavanja i polaganja teorijskog te praktičnog dijela ispita. Tim koji obavlja radove na nadzemnim vodovima sastoji se od 9 članova (rukovoditelj radova te 8 montera). Rukovoditelj radova ne sudjeluje u izravnom radu, već on neprestano nadgleda izvođenje radova te analizira potencijalne mehaničke i električne rizike.

Tim provodi radove pod naponom koji se temelje na pisanom nalogu za izvođenje rada. Prije početka zaposlenici tima potpišu izjavu da su fizički i psihički sposobni za rad. Rad pod naponom izvodi se prema 21 proceduri (tehnologiji). Dvanaest procedura vezano je uz izmjenu različitih vrsta izolatora na nosivim i zateznim stupovima, četiri procedure odnose se na zamjenu opreme na izolatorima, jedna procedura vezana je uz zamjenu i popravak iskrišta, dvije procedure za popravak vodiča pod naponom, jedna procedura odnosi se na popravak odnosno izmjenu odstojnika te jedna procedura na uklanjanje stranih tijela s vodiča.

Izvedba rada pod naponom na nosivim stupovima ne stvara veće organizacijske ili tehničke probleme. Metoda rada na potencijalu može se izvesti pomoću izolacijskih ljestvi, izolacijske platforme ili mobilne korpe. Rad na potencijalu s izolacijskih ljestvi i izolacijske platforme ima svoje prednosti i nedostatke. S izolacijskih ljestvi lakše je obavljati radove vezane uz odvajanje izolatora i preuzimanje opterećenja vodiča izolacijskom šipkom. U slučaju poteškoća pri

odvajanju izolatora uzrokovanog nepravilnom montažom tijekom izgradnje nadzemnog voda, monter koji radi s izolacijske platforme ima poteškoće pri radu.

Prije početka rada pod naponom potrebno je provjeriti svu opremu, izolacijske motke i ljestve moraju se očistiti te se mora ispitati električna otpornost izolacijskih dijelova. Tijekom rada ne smije se dogoditi da bilo koji metalni dio dođe između iskrišta ili paralelno s izolatorskim lancem kako ne bi došlo do proboja izolacije.

Izvedba rada pod naponom na zateznim stupovima puno je teža operacija, posebno u slučaju velikog kuta zavoja jer se dovođenje montera na potencijal odvija preko posebnog prilaza.

U slučaju dvostrukih 220 kV nadzemnih vodova, monter se postavlja na potencijal pomoću dvije izolacijske ljestve ili ljestve i izolacijske platforme.

Vremenski uvjeti potrebni za izvođenje radova pod naponom na 400 i 220 kV nadzemnim vodovima sljedeći su:

- apsolutna vlažnost zraka ne smije biti veća od 90 %
- temperatura ne smije biti manja od -10 °C
- brzina vjetra ne smije biti veća od 10 m/s
- stupovi ne smiju biti prekriveni ledom [7].

### **3.3.3. Upotreba helikoptera i bespilotnih letjelica**

S ciljem izvođenja radova na području elektroenergetike u Poljskoj helikopteri se koriste od 1994. godine. Pomoću helikoptera moguće je skratiti vrijeme potrebno za obavljanje popravka kao i za premještanje montera. Redovni i izvanredni pregledi iznimno visokih nadzemnih vodova dali su vrlo dobre rezultate jer se radovi mogu izvesti izravno s helikoptera ili preko ovješene korpe koja se može učvrstiti i na vod. Nakon završetka rada helikopter odmakne korpu s voda. Koriste se uglavnom mali i lagani helikopteri.

Trenutni poslovi koji se obavljaju iz helikoptera uključuju sljedeće operacije:

- zakazani pregledi vodova
- termovizijska mjerenja odabranih prijenosnih i distribucijskih vodova
- pregled linija različitih naponskih razina nakon kvara
- zračne usluge za izvanredne slučajeve i
- vizualni pregled trase.



Osim upotrebe helikoptera za provođenje pregleda radi procjene općeg stanja voda te donošenja odluke o obavljanju radova, helikopteri mogu postati učinkovita potpora pri radu pod naponom omogućivši brzo prenošenje kompetentnog osoblja na određenu točku i osobito olakšavanje prijevoza i isporuke opreme:

- raznih tipova izolatora
- opreme za popravak uzemljenih i vodiča pod naponom
- elementa potporne konstrukcije
- identifikacijskih pločica i sigurnosnih oznaka te
- osnovne i pomoćne opreme za rad pod naponom.

Također je potrebno spomenuti i da postoji mogućnost korištenja malih bespilotnih letjelica za promatranje i dijagnostiku vodova te drugih objekata (Sl. 3.16.) [9].



*Sl. 3.16. Mala bespilotna letjelica [9].*

### 3.4. Rad pod naponom na VNP-u u Portugalu

Od 1986. do 1996. južni dio Portugala prolazio je kroz ciklus suše koji je obilježen razdobljima bez kiše između svibnja i listopada, a tijekom ostalih mjeseci također vrlo niskom razinom padalina. Većina izolacije u mreži dimenzionirana je za nisku razinu onečišćenja, što je stvaralo velike poteškoće tijekom tog razdoblja te dovelo do potrebe masovnog pranja kao jedinog načina rješavanja problema.

Uzastopni dozemni kratki spojevi prouzročeni zagađenjima doveli su i do uništavanja izolatorskih lanaca, što je usput ukazalo na greške u proizvodnji nekih vrsta izolatora postavljenih na vodove. Tako je postalo neizbježno zamijeniti izolatore kako na vodovima tako i u trafostanicama.

U južnom dijelu zemlje bijela roda intenzivno se gnijezdi na stupovima visokog napona. Na stupovima u vlasništvu REN-a (port. *Redes Energeticas Nacionais*), odnosno Portugalske elektroprivrede, postoji oko 400 gnijezda. Populacija roda glavni je uzrok proboja iz tri razloga, a to su: onečišćenje koje nastaje uslijed taloženja izmeta, materijali koji tijekom faze izgradnje padaju iz gnijezda te kratki spoj kada one same prolaze blizu voda.

Prema planu dogovorenom između REN-a i ICN-a (engl. *Institute for the Conservation of Nature*), odnosno Instituta za zaštitu prirode, ugrađene su platforme za gnijezda u manje opasne prostore na stupovima, kao i uređaji za odvratanje slijetanja ili gniježđenja u opasnim prostorima, a gnijezda koja ugrožavaju rad mreže premještaju se. Treba napomenuti kako gnijezda koja se zapale kao rezultat kratkog spoja mogu izazvati velike šumske požare.

Taj cijeli niz okolnosti potaknuo je primjenu rada pod naponom kao alternativnog pristupa učinkovitoj intervenciji.

Prva akcija pranja pod naponom sa zemlje dogodila se 1991. godine te je ta tehnologija zadržana i do danas. Od 1993. godine REN je počeo koristiti i helikoptere u svrhu pranja. Sve veća potreba za pranje cijelih vodova, pokrivajući udaljenosti do 1000 km, dovela je do razmatranja tog načina pranja kao učinkovite alternative jer razdoblje između trenutka kada je identificirana potreba za pranjem i kada je akcija završena bilo je dovoljno kratko da jamči minimalnu mogućnost incidenata izazvanih onečišćenjem.

Tablica 3.2. prikazuje količinu pranja i njihov približni trošak u početnim fazama tih metoda pranja.

*Tab. 3.2. Količina pranja i njihov približni trošak [3].*

Godina	Broj izolatorskih lanaca		Broj trafostanica		Cijena (USD)
	Sa zemlje	Helikopterom	Pranje	Četkanje	
1995.	10750	6700	7	7	470,000
1996.	10040	5690	5	5	450,000
1997.	-	-	2	2	15,000

Kod zamjene opreme, prva je akcija izvršena 1992. godine, a sastojala se od zamjene svih vanjskih izolatorskih lanaca na dva 400 kV voda. Od tada lanci su intenzivno mijenjani svake godine. Tablica 3.3. daje podatke o zamjeni izolatora na vodovima.

*Tab. 3.3. Podaci o zamjeni izolatora na vodovima [3].*

Godina	Broj zamijenjenih izolatorskih lanaca	Cijena (USD)
1995.	288	160,000
1996.	240	130,000
1997.	813	130,000

Godine 1993. došlo je do zamjene svih rastavljača u trafostanici koja se nalazi između sjevernog i južnog područja, zbog čega je postupak bilo važno obaviti bez prekida napajanja [3].

### **3.4.1. Trening centar za rad pod naponom**

Trening centar za obuku nalazi se u središnjem dijelu Portugala i ima objekte koji se nalaze na površini od 15000 m<sup>2</sup> (Sl. 3.17.). Glavna zgrada centra za obuku ima četiri prostorije za vježbanje, spavaonicu, restoran, sanitarne čvorove, a prostor oko zgrade opremljen je infrastrukturnama koje omogućuju praktične obuke u stvarnom radnom okruženju.



*Sl. 3.17. Opći pogled na trening centar [11].*

Poligon za obuku nalazi se na području koje okružuje zgradu, a nudi jedinstvene uvjete za provođenje praktične obuke u stvarnim uvjetima, od područja niskog napona pa sve do 220 kV.

Vanjski objekti poligona sastoje se od visokonaponske mreže (tri vrste 220 kV vodova), 60 kV nadzemnih vodova (četiri vrste betonskih i čeličnih stupova), 15 kV nadzemnog voda, niskonaponskog nadzemnog voda, podzemne mreže niskog napona, trafostanice te skupa ploča opremljenih električnim brojljima.

Za teorijski dio obuke zaduženi su visokokvalificirani treneri s velikim iskustvom i stručnim znanjima iz područja rada pod naponom, što uključuje: minimalne obrazovne kvalifikacije, posjedovanje profesionalnog certifikata i minimalno petogodišnje radno iskustvo na području koje podučavaju.

Za praktični dio obuke treneri moraju imati: minimalne obrazovne kvalifikacije, položen profesionalni certifikat, najmanje dvije godine iskustva u radu pod naponom i poznavanje najčešćih rizika koji su uključeni u radove te njihovu prevenciju i sigurnost.

Polaznici se odabiru na temelju obrazovanja, radnog iskustva, znanja o materijalima, alatima i opremi koja će se koristiti, ovisno o obuci koju upisuju. Moraju uvijek imati: položenu zaštitu na radu, kvalifikacije za tečaj na koji se prijavljuju te liječničku potvrdu da su fizički i psihički zdravi za rad pod naponom.

Primjeri obuka za rad pod naponom na VNP-u:

- čišćenje i održavanje transformatorskih stanica, primjer je Slika 3.18. (obuka traje 10 dana, a stečena kvalifikacija vrijedi tri godine)
- moguće metode za rad pod naponom na mrežama do 400 kV (obuke traju šest mjeseci, a stečena kvalifikacija vrijedi tri godine).

2013. godine trening centar održao je 20 tečajeva te obučio ukupno 200 vježbenika za rad pod naponom [11].



*Sl. 3.18. Suho čišćenje izolatora [11].*

### **3.4.2. Metode čišćenja pod naponom**

#### ***1. Čišćenje izolatora s demineraliziranom vodom (maksimalna vodljivost 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )***

- a) Upotreba uređaja za pranje sa zemlje u transformatorskim stanicama otvorenog tipa (Sl. 3.19. a),
- b) Korištenje uređaja za pranje sa stupa (unutar rešetki stupa) za srednje, visoke i vrlo visoke nadzemne vodove (Sl. 3.19. b),
- c) Helikopter s mlaznicom za čišćenje izolatora na nadzemnim vodovima visokog i vrlo visokog napona (Sl. 3.20.).





*Sl. 3.19. a) Pranje sa zemlje u trafostanicama, b) Pranje sa stupa [12].*

Ti načini čišćenja specifični su za uklanjanje onečišćenja zbog prašine, soli, itd. Problem kod tih metoda je što se neke vrste onečišćenja, poput izmeta ptica, ne mogu ukloniti mlazom vode. Pranje sa zemlje u trafostanicama iznimno je brzo, dok je pranje sa stupa sporo te zahtijeva dosta vremena. Neke vrste opreme u trafostanicama poput strujnih i naponskih mjernih transformatora te odvodnika prenapona ne mogu se očistiti metodom pranja s demineraliziranom vodom.



*Sl. 3.20. Čišćenje s helikoptera [12].*

Prednost čišćenja s helikoptera je brzina, dok je nedostatak, u usporedbi s navedenim metodama, naravno cijena.

## **2. Suho čišćenje izoliranim četkama na užetu u transformatorskim stanicama otvorenog tipa**

Prednosti te metode jesu učinkovitost čišćenja (trenje) te uklanjanje raznih vrste onečišćenja uključujući sol, silikon i slične proizvode, dok je nedostatak vrijeme potrebno za provedbu same metode.

## **3. Čišćenje mlazom suhog leda ( $CO_2$ ) u niskonaponskim postrojenjima (ili u postrojenjima srednjeg, visokog i vrlo visokog napona koja su izvan pogona)**

Prednost je velika učinkovitost i ne ostavlja nikakve tragove. Nedostatak je cijena te mogućnost primjene samo u niskonaponskim postrojenjima.

## **4. Suho čišćenje mlazom organskih tvari na srednjim i visokim naponskim razinama**

- a) Čišćenje pomoću čestica ljuski oraha, lješnjaka, riže i gipsa (žbuke) (Sl. 3.21.)
- b) Čišćenje pomoću čestica pluta.



**Sl. 3.21.** Čišćenje pomoću čestica ljuski oraha, lješnjaka, riže i gipsa (žbuke) [12].

Te metode nude učinkovito čišćenje uklanjajući razne vrste zagađenja. Čišćenje pomoću čestica pluta ima prednost jer abrazivni učinak čisti izolator bez utjecaja na površinski sloj. Zbog sastava pluta na kraju procesa izolatori imaju vanjski sloj sličan nepropusnoj zaštiti voska ili silikona. Uz to, pluto je nacionalni proizvod (Portugal je najveći svjetski proizvođač), dok druga metoda zahtijeva uvozne proizvode [12].

### **3.5. Rad pod naponom na VNP-u u Italiji**

Rad pod naponom na postrojenjima visokog napona u Italiji započeo je 1985. godine, a usmjeren je posebno na održavanje izolatorskih lanaca i pripadajuće opreme. U početku se rad pod naponom temeljio na metodi na rada na udaljenosti (132 kV, 150 kV i 220 kV) koja je imala prednost nad metodom rada na potencijalu. Rezultat toga bilo je usmjeravanje studijskih i eksperimentalnih aktivnosti u prepoznavanje opreme i operativnih metoda koje su najprikladnije za konfiguraciju talijanske prijenosne mreže. Rad pod naponom postupno je usvojen i na 380 kV vodovima koji predstavljaju okosnicu prijenosa električne energije u Italiji.

Dugi proces koji zahtijeva visok stupanj specijalizacije potreban za rad na izolatorskim lancima (visoki troškovi obuke i opreme) te rijetka potreba za takvim intervencijama ograničili su broj timova obučeni za rad pod naponom [13].

#### **3.5.1. Onečišćenje i rad pod naponom**

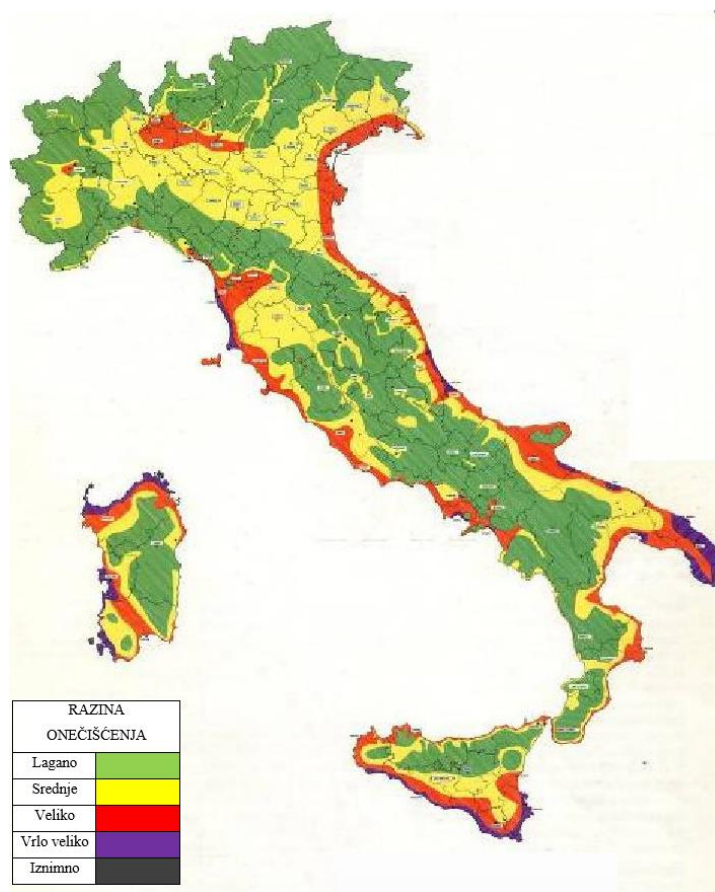
Zagađenje izolatora visokonaponskih postrojenja uvijek je izazivalo probleme, te su mnogi operatori prijenosnih sustava kao i proizvođači elektroenergetskih izolatora razvili rješenja koja osiguravaju kontinuitet servisiranja vlastitih visokonaponskih sustava. U Italiji je od ranih sedamdesetih značajan razvoj „anti-sol“ metode.

Ta metoda nalaže provođenje određenih koraka:

- periodično ispiranje
- mijenjanje silikonske zaštite jednom godišnje
- zamjena izolatora
- stavljanje silikonskih premaza u tvornici na potporne i ovjesne izolatore
- upotreba kompozitnih izolatora.

Na Slici 3.22. može se vidjeti talijansko područje podijeljeno prema razinama onečišćenja. Problem zagađenja osobito je važan u obalnim područjima.





*Sl. 3.22. Karta onečišćenja u Italiji [14].*

Često se na izolatore nanose velike količine soli koje u kombinaciji s poljoprivrednim i industrijskim onečišćenjem stvaraju sloj onečišćenja na površinama izolatora.

To zagađenje obično nije vodljivo dok je suho, no postaje vodljivo kada je vlažno, posebno u ranim jutarnjim satima i pri zalasku sunca, kada visoka relativna vlažnost zraka i promjena temperature stvaraju kondenzaciju.

Za pranje izolatorskih lanaca koriste se dvije tehnologije rada pod naponom, a to su pranje s demineraliziranom vodom te čišćenje sa suhim česticama.

Klasični izolatorski lanci zamijenjeni su lancima sa silikonskim premazom koji jamče neutralizaciju ili oslabljuju prianjanje onečišćujuće tvari. Mogu se koristiti oko 12 – 18 mjeseci, dvostruko više od razdoblja koje je zajamčeno staklenim ili porculanskim izolatorima koji nisu tretirani silikonskim premazima. Najveći problem kod zamjene izolatorskih lanaca bila je zagađena masnoća koja može kontaminirati užad, alate i opremu.

Premaz staklenih izolatora pokazao se nepouzdanim i neprikladnim jer se nije mogla osigurati ravnomjerna debljina. Najbolji rezultati dobiveni su premazivanjem izolatora u tvornici, međutim pojavile su se neke sumnje o korištenju te metode, stoga je odlučeno koristiti kompozitne izolatore.

Krajem osamdesetih godina prošlog stoljeća počela je ugradnja kompozitnih izolatora. Širom svijeta nekoliko grupa radnika pronašlo je rješenja kako sigurno i pouzdano koristiti kompozitne izolatore, posebno s tehnikama rada pod naponom.

Danas se može potvrditi da više od 150 operatora prijenosnih sustava diljem svijeta usvaja sljedeće metode za otkrivanje grešaka na kompozitnim izolatorima: vizualni pregled s tla i sa stupa, inspekcija izolatora u UV području za otkrivanje utjecaja korone, mjerenje longitudinalnog električnog polja (Sl. 3.23.) [14].



*Sl. 3.23. Postupak otkrivanja grešaka (oštećenja) na kompozitnim izolatorima [14].*

## 4. UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKOG POLJA NA ČOVJEKA

Na temelju najnovijih istraživanja i smjernica ICNIRP-a (engl. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*), odnosno Međunarodne komisije za zaštitu od neionizirajućeg zračenja, elektromagnetska polja krajnje niske frekvencije (engl. ELF – *extra low frequency*) imaju nekoliko kratkoročnih i dugoročnih učinaka na zdravlje. Kratkoročni učinci mogu se otkriti, no dugoročni učinci uglavnom su nepoznati i dostupni su samo rezultati epidemioloških istraživanja. Uglavnom se električna polja određuju naponom opreme, a magnetska polja stvaraju se strujama koje prolaze kroz vodiče. U slučaju rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima, visoki napon i struje mogu ugroziti sigurnost radnika. Od električnog polja može se lako zaštititi vodljivim odijelom, čiji se rad temelji na principu Faradayevog kaveza, ali samo pravilno oblikovana i proizvedena odijela mogu jamčiti potrebnu učinkovitost. Taj princip zaštite od električnog polja nije učinkovit protiv magnetskog polja. Rezultati izračuna, simulacija i mjerenja dokazuju da u nekim slučajevima inducirana struja u tijelu radnika koji radi pod naponom premašuju zadane granice.

Kako je navedeno, zaštita od električnog polja jamči se vodljivim odijelom koje djeluje kao Faradayev kavez, točnije unutar zatvorene vodljive površine električno polje je teoretski nula. U praksi su na odijelu neophodne rupe na kavezu, tzv. Faradayeve rupe (engl. *Faraday holes*), ali u slučaju pravilnog oblikovanja te rupe ne smanjuju značajno zaštitni učinak. Mreža preko lica uvijek je potrebna kako bi se jamčila potrebna učinkovitost. Izračuni, simulacije i mjerenja u Laboratoriju visokog napona na budimpeštanskom sveučilištu za tehnologiju i ekonomiju (engl. *High Voltage Laboratory of Budapest University of Technology and Economics*) dokazuju da, iako postoje razlike među proizvodima različitih proizvođača, odijela s odgovarajućom mrežom preko lica mogu jamčiti sigurnost radnika kod rada pri električnim poljima niske frekvencije.

ICNIRP definira maksimalno dopuštene vrijednosti za električna i magnetska polja. Na inicijativu Instituta za istraživanje raka koji je dio WHO-a (engl. *World Health Organization*) i Međunarodne agencije za istraživanje raka (engl. IARC – *International Agency for Research on Cancer*) referentne vrijednosti za magnetska polja su 2010. godine dvostruko povećane u odnosu na izvorne vrijednosti definirane 1998. Prethodne i trenutačne vrijednosti za električna i magnetska polja sažete su u Tablici 4.1.

**Tab. 4.1.** Prethodne i trenutačne maksimalno dopuštene vrijednosti za električna i magnetska polja [15].

	<b>Granične vrijednosti izloženosti za pučanstvo</b>	<b>Granične vrijednosti izloženosti za radnike</b>
<b>Ograničenja za električno polje prije 2010. [kV/m]</b>	5	10
<b>Trenutna ograničenja za električno polje [kV/m]</b>	5	10
<b>Ograničenja za magnetsko polje prije 2010. [<math>\mu</math>T]</b>	100	500
<b>Trenutna ograničenja za magnetsko polje [<math>\mu</math>T]</b>	200	1000

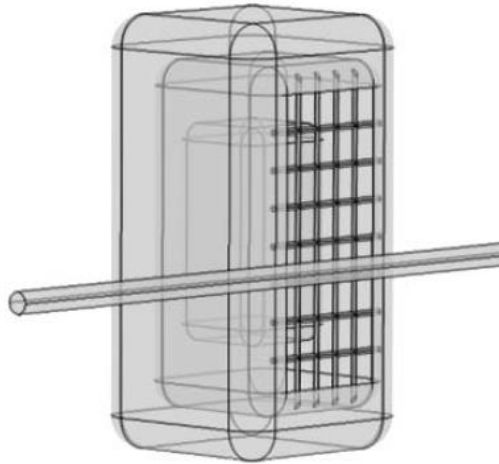
ICNIRP u svojim smjernicama za ograničavanje izloženosti električnim i magnetskim poljima navodi da se na udaljenosti manjoj od 20 cm od izvora polja javlja i inducirana struja u ljudskom tijelu koja mora biti izračunata od slučaja do slučaja. Granicu za induciranu struju definira i Europsko vijeće (engl. *European council*) te ona iznosi  $10 \text{ mA/m}^2$ , jer svaka inducirana struja u ljudskom tijelu iznad te granice prema rezultatima epidemioloških istraživanja ugrožava sigurnost radnika [15].

#### **4.1. Električno polje**

Tijekom rada pod naponom na VNP-u, kako je već rečeno, postoji opasnost od utjecaja električnog polja. Kako bi se smanjili učinci električnog polja na površini ljudskog tijela koristi se vodljivo odijelo sa zaštitnom mrežom preko lica koje radi na principu Faradayevog kaveza, odnosno zatvorena metalna površina s Faradayevim rupama. Veličina tih „rupa“ na masci mora biti uravnotežena između ispravne zaštite od električnog polja, dobre vidljivosti i pravilnog dotoka zraka.

Kako bismo se bolje upoznali s problemom utjecaja električnog polja na montera, kao i njegovim sprječavanjem, u nastavku su prikazani rezultati simulacija. Model koji se koristio u simulaciji prikazan je na Slici 4.1. Istražena su dva različita slučaja. U prvom slučaju monter se približava faznom vodiču visokonaponskog voda (400 kV), nalazi se na udaljenosti od 50 cm te potencijalna stezaljka vodljivog odijela još uvijek nije povezana s vodičem. U drugom slučaju

vodljivo odijelo povezano je s vodičem, a razmak između lica montera i vodiča iznosi samo 10 cm.



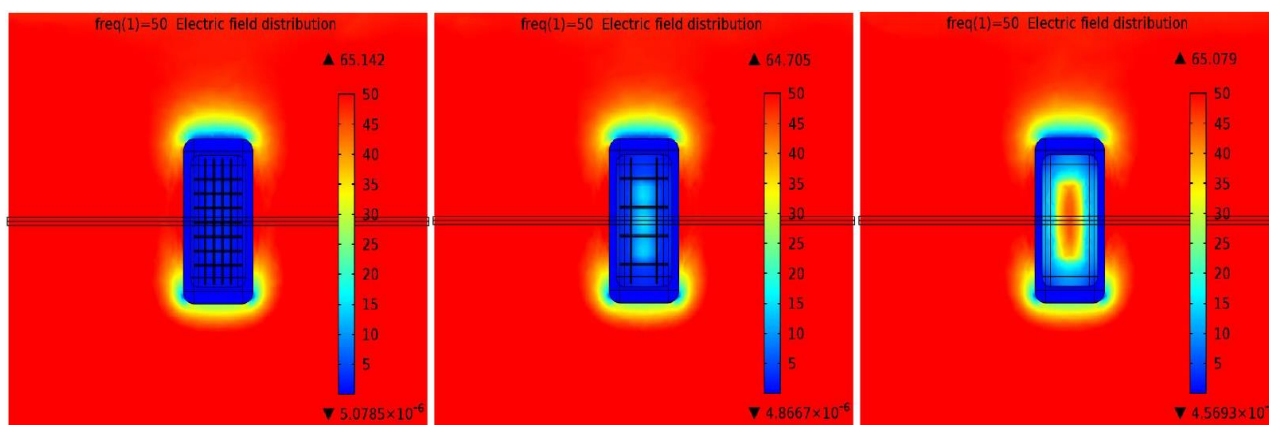
*Sl. 4.1. Model koji se koristio u simulaciji [16].*

Izračuni su izvršeni za tri različite vrste vodljivih odijela. „Tip A“ imao je normalnu mrežu preko lica s prosječnom veličinom otvora od 2,96 cm. „Tip B“ imao je mrežu s većim otvorima preko lica i prosječna veličina otvora bila je 7,13 cm (Sl. 4.2.). „Tip C“ bilo je vodljivo odijelo koje se testiralo bez ikakve zaštitne mreže preko lica [16].



*Sl. 4.2. Vodljivo odijelo s mrežom preko lica (veći otvori) [17].*

Mnogo je vodljivih odijela proizvedeno bez zaštitne mreže za lice, tako da su sve 3 vrste vodljivih odijela korištenih u simulaciji zapravo bile utemeljene na stvarnim odijelima. Slika 4.3. prikazuje rezultate tipa A, B i C u slučaju približavanja vodiču.



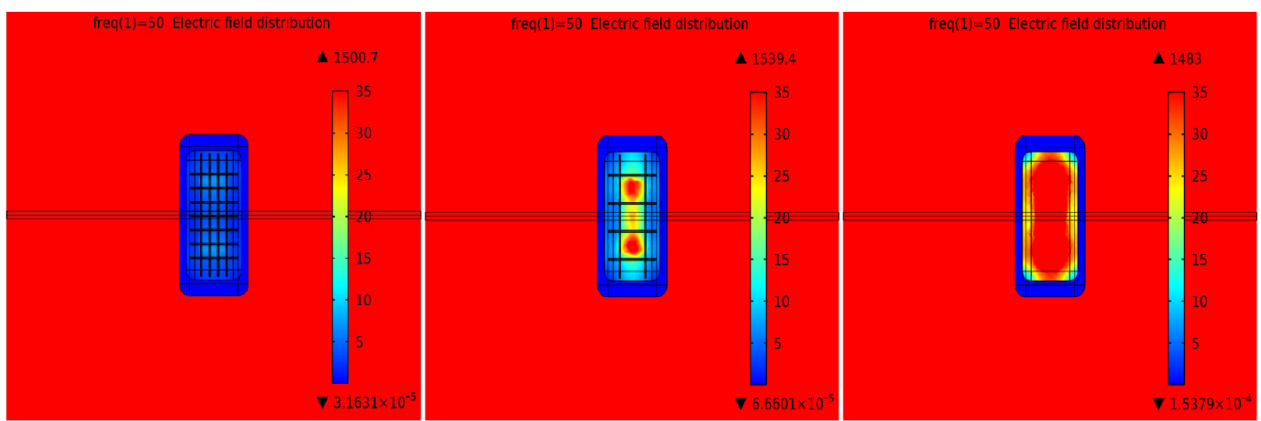
*Sl. 4.3. Raspodjela električnog polja za tip A, B i C u slučaju približavanja vodiču [16].*

Minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti jakosti električnog polja izračunate su ispred lica montera. U slučaju normalne mreže preko lica („Tip A“) čak i maksimalne vrijednosti jakosti električnog polja ostaju ispod dopuštenih granica. Prosječne vrijednosti jakosti električnog polja prihvatljive su i kod zaštitne mreže s većim otvorima („Tip B“), ali maksimalne vrijednosti mogu biti iznad dopuštenih granica. Najopasniji slučaj štetnog utjecaja električnog polja je onaj s vodljivim odijelom bez zaštitne mreže preko lica („Tip C“), gdje su i prosječne i maksimalne vrijednosti jakosti električnog polja iznad dopuštenih granica tijekom prilaska vodiču. Točne vrijednosti jakosti električnog polja prikazane su u Tablici 4.2. Vrijednosti koje su iznad dopuštenih granica označene su crvenom bojom [16].

*Tab. 4.2. Izračunate vrijednosti jakosti električnog polja za prvi slučaj [16].*

	<b>Normalna maska preko lica</b>	<b>Maska preko lica s većim otvorima</b>	<b>Bez maske preko lica</b>
<b>Minimalna vrijednost jakosti električnog polja</b>	0,62 [kV/m]	1,49 [kV/m]	6,38 [kV/m]
<b>Maksimalna vrijednost jakosti električnog polja</b>	2,47 [kV/m]	16,73 [kV/m]	45,68 [kV/m]
<b>Prosječna vrijednost jakosti električnog polja</b>	1,59 [kV/m]	6,75 [kV/m]	24,89 [kV/m]

Ista vrsta simulacije izvršena je i za drugi slučaj, gdje je vodljivo odijelo bilo povezano s vodičem pomoću potencijalne stezaljke. Jakost električnog polja je, kao i u prethodnom slučaju, izračunata ispred lica radnika. Prema Tablici 4.3. kod „Tipa A“ sve vrijednosti jakosti električnog polja bile su ispod dopuštenih granica. U slučaju vodljivih odijela s većim otvorima i bez mreže preko lica prosječne i maksimalne vrijednosti jakosti električnog polja iznad su dopuštenih granica. Vidljivo je kako vodljiva odijela bez mreže preko lica uvelike ugrožavaju zdravlje montera jer su sve vrijednosti jakosti električnog polja iznad dopuštenih granica, pa čak i minimalne vrijednosti. Distribucija jakosti električnog polja za drugi slučaj prikazana je na Slici 4.4.

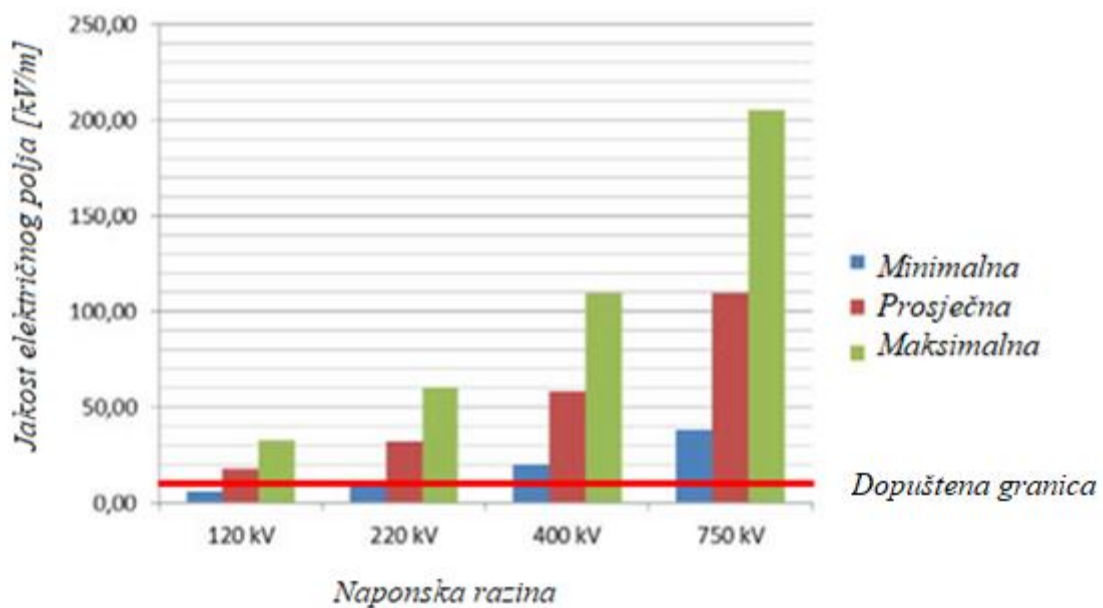


Sl. 4.4. Raspodjela električnog polja za tip A, B i C u slučaju priključene stezaljke [16].

Tab. 4.3. Izračunate vrijednosti jakosti električnog polja za prvi slučaj [16].

	Normalna maska preko lica	Maska preko lica s većim otvorima	Bez maske preko lica
<b>Minimalna vrijednost jakosti električnog polja</b>	1,7 [kV/m]	4,53 [kV/m]	21,05 [kV/m]
<b>Maksimalna vrijednost jakosti električnog polja</b>	8,06 [kV/m]	41,03 [kV/m]	112,93 [kV/m]
<b>Prosječna vrijednost jakosti električnog polja</b>	4,17 [kV/m]	16,23 [kV/m]	60 [kV/m]

Slika 4.5. prikazuje jakost električnog polja ispred lica montera koji radi pod naponom ovisno o naponskoj razini (slučaj vodljivog odijela bez mreže preko lica).



Sl. 4.5. Jakost električnog polja ispred lica montera ovisno o naponskoj razini [16].

Vidljivo je da su čak i na 120 kV i prosječne i maksimalne vrijednosti iznad dopuštene granice, te je očito kako je na svim visokonaponskim razinama neprihvatljivo koristiti vodljivo odijelo bez zaštitne mreže preko lica [16].

## 4.2. Magnetsko polje

### 4.2.1. Simulacija utjecaja magnetskog polja

Poznato je da u nekim slučajevima inducirane struje u ljudskom tijelu tijekom rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima premašuju zadanu granicu. Za određivanje kritičnih udaljenosti i trenutnih vrijednosti s aspekta gustoće inducirane struje rađene su simulacije i izračuni. Za simulaciju korišten je model ljudskog tijela prikazan na Slici 4.6. Odabrani radijus aluminijskog vodiča bio je 1 cm.

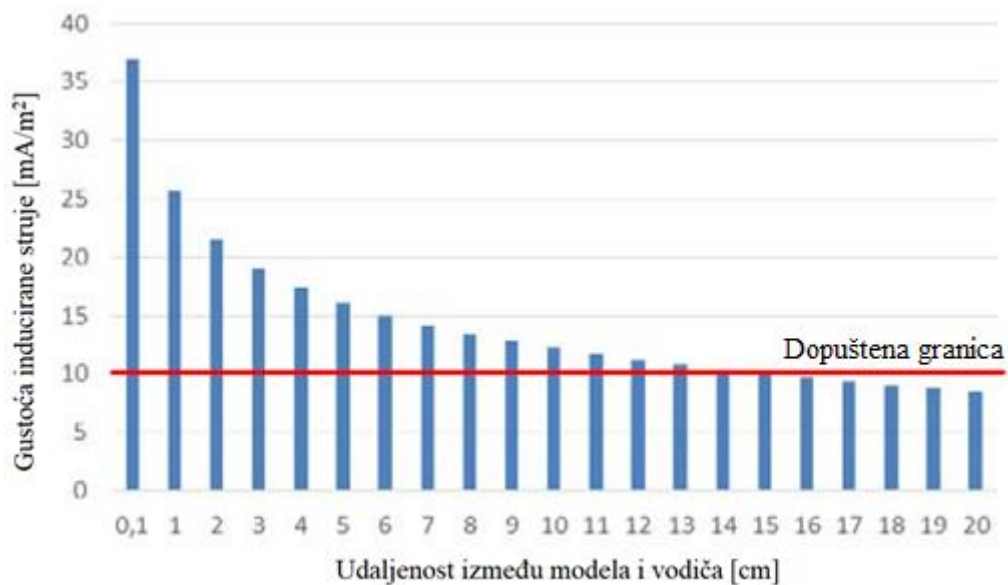




*Sl. 4.6. Model ljudskog tijela [15].*

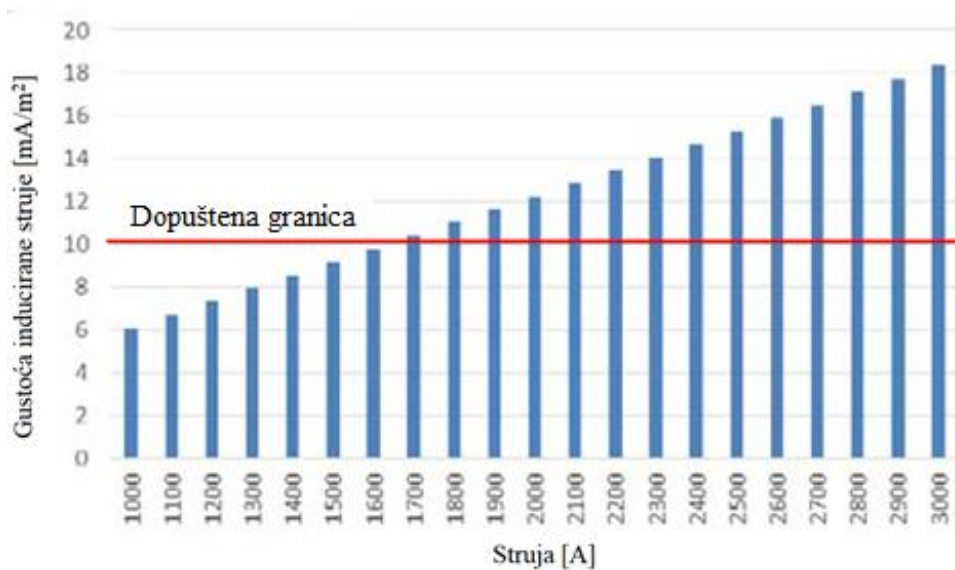
Tijekom proračuna mijenjana su dva parametra: udaljenost glave modela ljudskog tijela od vodiča te struja koja teče kroz vodič.

U prvom slučaju udaljenost između modela i vodiča bila je između 0,1 cm i 20 cm s trenutnom vrijednosti struje od 2 kA. Rezultati su prikazani na Slici 4.7.



*Sl. 4.7. Gustoća inducirane struje u ovisnosti o udaljenosti tijela i vodiča [15].*

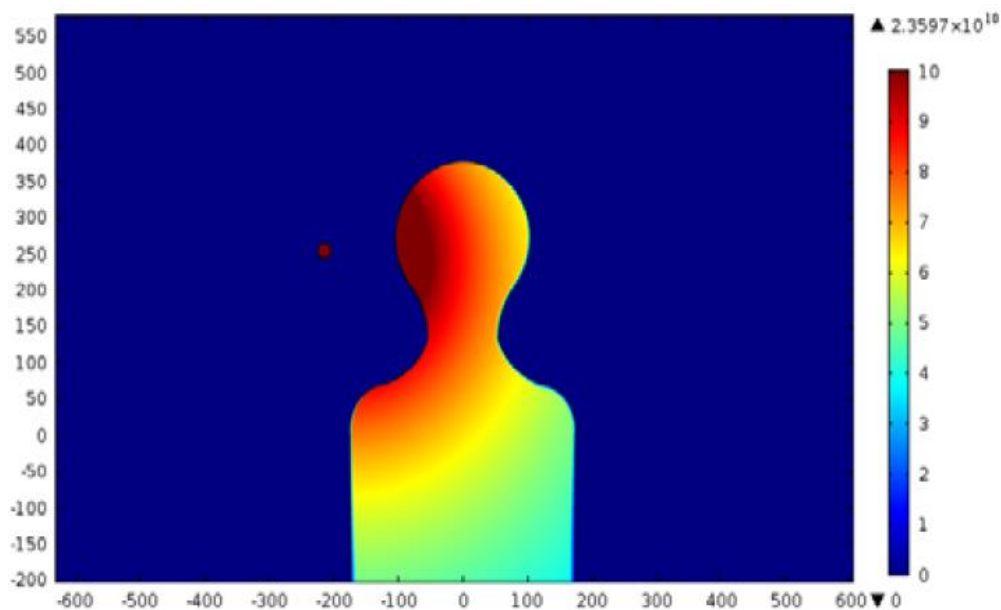
U drugom je slučaju udaljenost između modela ljudskog tijela i vodiča bila 10 cm, a vrijednost struje koja teče kroz vodič mijenjana je od 1 kA do 3 kA. Gustoća inducirane struje prikazana je na Slici 4.8.



Sl. 4.8. Gustoća inducirane struje u ovisnosti o struji koja teče kroz vodič [15].

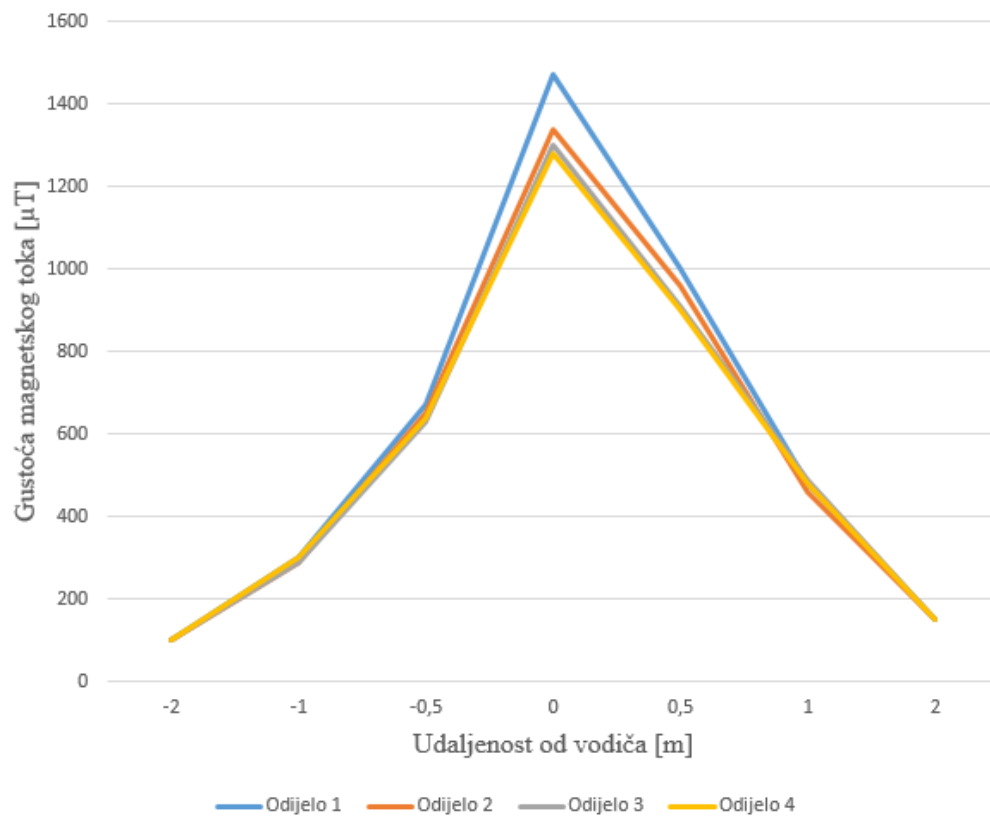
Može se vidjeti da gustoća inducirane struje u ljudskom tijelu pri prosječnoj struji koja teče kroz visokonaponski vod (2 kA) može ugroziti sigurnost radnika kada je udaljenost tijela od vodiča manja od 16 cm. Iz drugog slučaja može se zaključiti kako pri konstantnoj udaljenosti od 10 cm sigurnost radnika biva ugrožena ako struja kroz visokonaponski vod premaši 1600 A.

Primjer raspodjele gustoće inducirane struje u ljudskom tijelu prikazan je na Slici 4.9.



Sl. 4.9. Raspodjela gustoće inducirane struje u ljudskom tijelu [15].

U laboratoriju visokog napona ispitane su 4 vrste vodljivih odijela i prikupljeni podaci uspoređeni su s aspekta zaštite od magnetskog polja. Odijela su ispitana na različitim udaljenostima od vodiča. Mjerenja su izvedena na glavi te ispred i iza lutke. Struja vodiča bila je 2 kA. Na Slici 4.10. prikazan je rezultat laboratorijskog mjerenja ispred lutke.

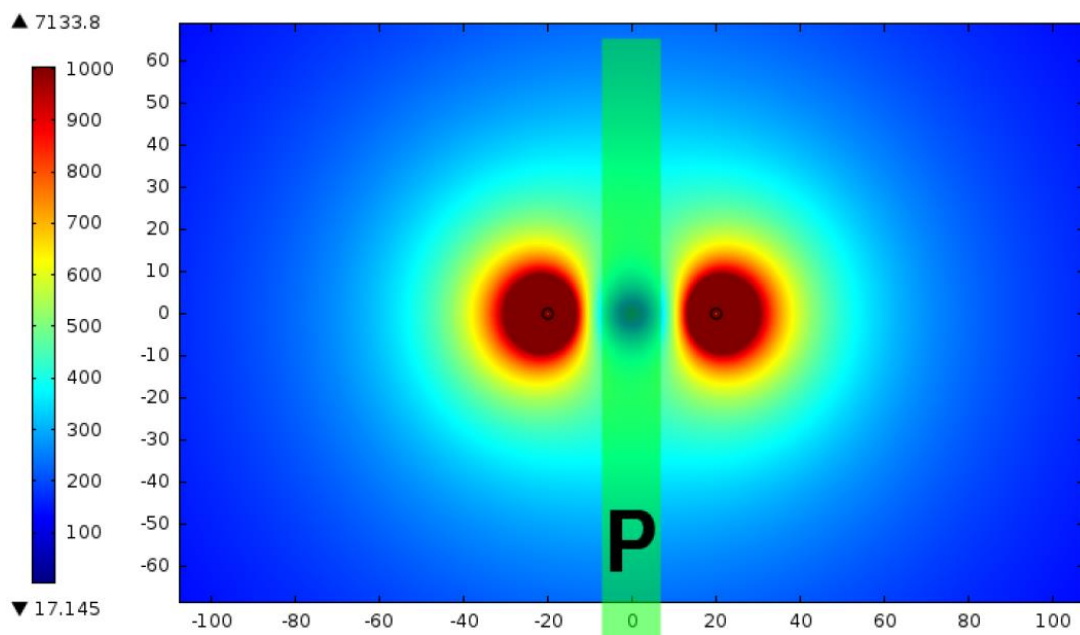


*Sl. 4.10. Rezultat laboratorijskog mjerenja ispred lutke [15].*

Može se zaključiti da pri normalnim radnim uvjetima gustoća magnetskog toka kojoj je izloženo ljudsko tijelo premašuje dopuštene granice te da ni jedno od konvencionalnih vodljivih odijela nije učinkovito za zaštitu od magnetskih polja, tako da u nekim slučajevima zdravlje radnika tijekom rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima može biti ugroženo djelovanjem magnetskog polja.

#### 4.2.2. Zaštita od magnetskog polja

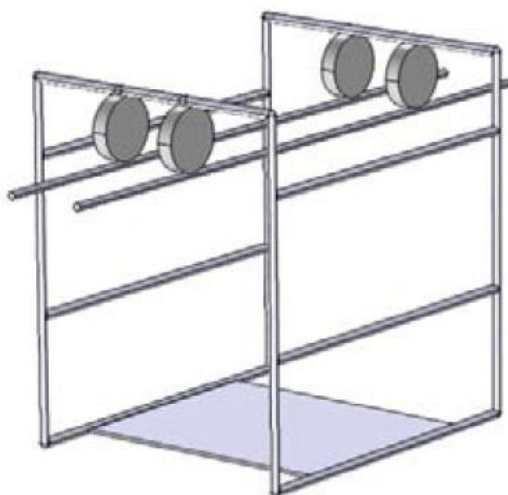
Premda se od magnetskih polja ne može štititi na sličan način kao od električnih polja, moguće je rješenje poništenje polja uzrokovanog strujom koja teče kroz vodič. Ako kroz dva ili više vodiča teče struja u istom smjeru, između njih je područje s gustoćom magnetskog toka nula. Ako se stvore uvjeti da se osigura područje u kojem je magnetski tok nula, zaštita je učinkovita. Taj slučaj s dva vodiča prikazan je na Slici 4.11. „P“ prikazuje zaštićeno područje s poništenim magnetskim poljem, te ako je struja kroz vodiče jednaka, oblik tog područja je simetričan.



*Sl. 4.11. Poništenje magnetskog toka između dva vodiča [15].*

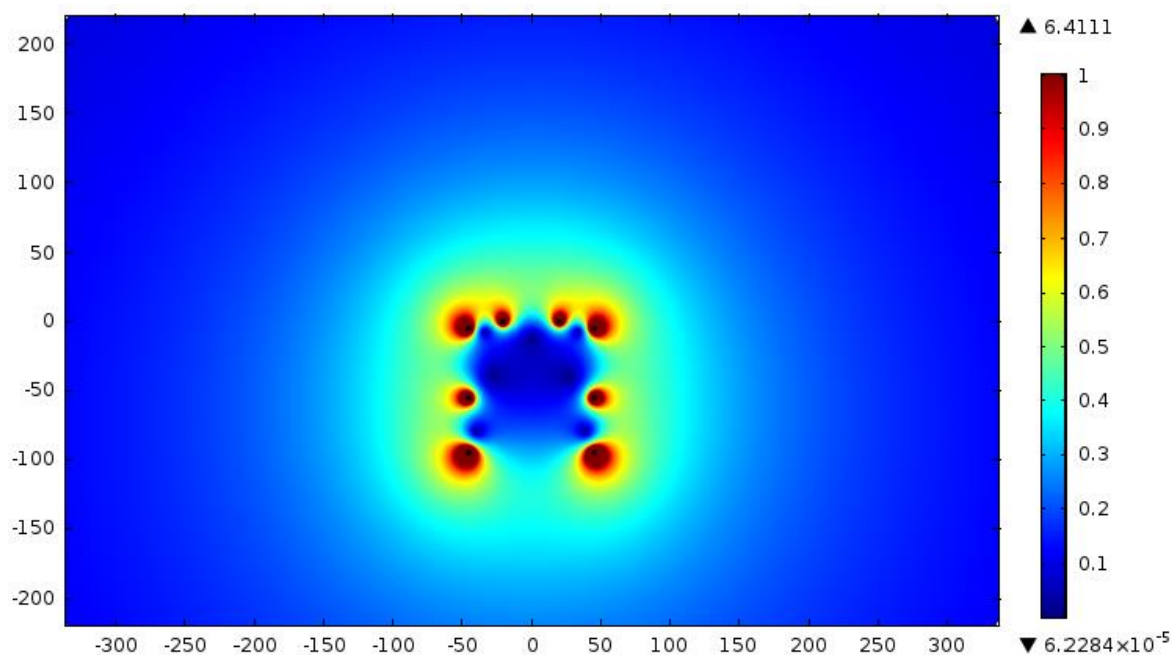
Načelno, smanjenje magnetskog polja temelji se na djelovanju dvaju osnovnih pravila. Prvo je da se struja ( $I$ ), koja stvara magnetsko polje oko vodiča, može smanjiti ( $I/n$ ) osiguravajući paralelne grane ( $n$ ), tako da se gustoća magnetskog toka smanjuje i oko vodiča. Drugo pravilo je da mora postojati geometrijski točno zaštićeno područje ( $P$ ) između razdijeljenih vodiča koji bi mogli jamčiti sigurnost montera.

Ta metoda može se praktično primijeniti pomoću mobilnih kolica prikazanih na Slici 4.12.



*Sl. 4.12. Vodljiva mobilna kolica [15].*

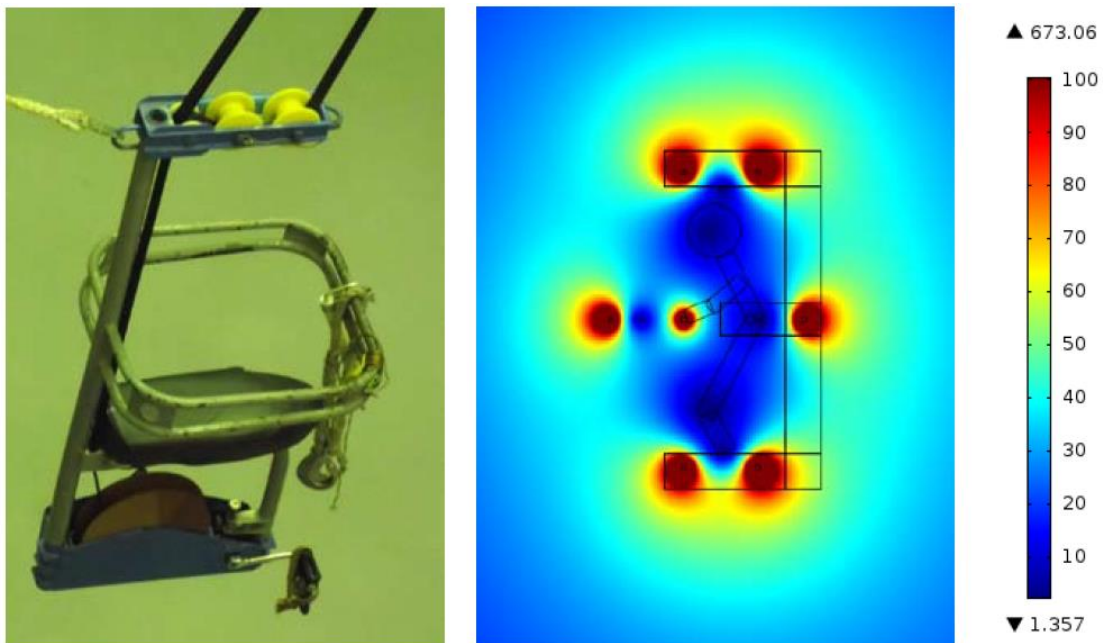
Učinkovitost tih mobilnih kolica testirana je simulacijom na vodu 400 kV, gdje je prosječno opterećenje iznosilo 1200 MW, pa je fazna struja vodiča u simulaciji 1732 A. Zbog vodiča u snopu tog nadzemnog voda (2 x ACSR), kroz svaki teče struja od 866 A. Vršna vrijednost gustoće magnetskog toka generirana tom strujom iznosi 7133,8  $\mu\text{T}$  i takva raspodjela već je prikazana na Slici 4.11. Upotrebom mobilnih kolica osigurava se 8 paralelnih strujnih grana, te time struja svake grane smanjuje se na 216,5 A. Nakon toga postiže se raspodjela gustoće magnetskog toka kao na Slici 4.13.



*Sl. 4.13. Preraspodjela gustoće magnetskog toka koristeći mobilna kolica [15].*

Tim postupkom maksimalna gustoća magnetskog toka smanjena je sa 7133,8  $\mu\text{T}$  na 6,4  $\mu\text{T}$ . Na Slici 4.13. vidljivo je kako je upravo područje na kojem se nalazi monter područje s najnižom gustoćom magnetskog polja te mu se tako osigurava maksimalna zaštita.

Drugi praktični primjer vezan uz zaštitu od magnetskog polja jest vodljiva montažna stolica i prikazana je na Slici 4.14.a), dok se na Slici 4.14.b) može vidjeti zaštićeno područje u kojem se nalazi monter. I za taj primjer izvedena je simulacija, gdje je izvorna struja vodiča (866 A) smanjena na 247,43 A po grani, te se kao rezultat dobiva smanjenje maksimalne gustoće magnetskog toka sa 7133,8  $\mu\text{T}$  na 673,06  $\mu\text{T}$  [15].



*Sl. 4.14. a) Vodljiva montažna stolica b) Raspodjela gustoće magnetskog toka [15].*

## **5. OSTALE OPASNOSTI PRI RADU POD NAPONOM NA VNP-u**

### **5.1. Opasnost od električnog luka**

Najčešći uzroci električnog luka u mrežama jesu kratki spojevi i prenaponi. Iz perspektive montera koji rade pod naponom kratki spoj značajniji je jer može biti uzrokovan postupcima samog montera tijekom održavanja. Elektroenergetski sustav kao sustav međusobno povezanih postrojenja koji generiraju, prenose, distribuiraju i pretvaraju električnu energiju u druge oblike energije moraju ispunjavati tehničke i ekonomske zahtjeve kako bi se osigurala visoka kvaliteta električne energije, pouzdanost opskrbe potrošača, niski troškovi održavanja, kao i sigurnost montera za održavanje te sigurnost krajnjeg korisnika. Značaj kvalitete, a osobito kontinuitet opskrbe električnom energijom povećava se s povećanjem složenosti proizvodnih procesa. Ona prisiljava operatore prijenosnih sustava da koriste tehnička i organizacijska rješenja za smanjenje stope ispada (iskapčanja, kvarova) elektroenergetskih sustava i njegovih komponenti. Među čimbenicima koji uzrokuju oštećenja komponenti elektroenergetskog sustava najznačajniji su nedostaci materijala korištenih pri izradi kao i sama nekvalitetna izrada, lokalna oštećenja izolacije, ekstremni vremenski uvjeti, kao i pogonski te atmosferski prenaponi. Svi čimbenici uzrokuju značajne opasnosti za montere koji rade pod naponom te uređaje i komponente elektroenergetskih sustava [18].

#### **5.1.1. Razlozi upotrebe opreme za zaštitu od električnog luka**

Jedna od najvećih opasnosti tijekom rada pod naponom jest električni luk, a razlog tome su ekstremni uvjeti koji nastaju pri njegovom djelovanju. Visoka temperatura, visoki tlak te čestice rastaljenog metala koje se kreću brzinom od nekoliko stotina kilometara na sat glavne su opasnosti električnog luka. Unesrećeni monteri podliježu opeklinama, ozljedama uzrokovanim rastaljenim metalnim česticama, oštećenju vida i sluha te čak i smrti.

Električni luk može biti uzrokovan ljudskom pogreškom, odnosno neiskusnim rukovanjem alatom i opremom u blizini električnih krugova, kao i korištenjem neispravnih alata. Projektiranje opreme za zaštitu od električnog luka mora voditi ka nižoj stopi nezgoda pri radu pod naponom. Osobna zaštitna oprema za montere može značajno smanjiti broj nesreća, bez obzira na tehnologiju rada pod naponom. Novi materijali s odgovarajućim toplinskim svojstvima poboljšali su sigurnost opreme za zaštitu od električnog luka [18].



### 5.1.2. Upotreba odijela za zaštitu od električnog luka

Najozbiljnije posljedice električnog luka su opekline, što može dovesti do trajnih ozljeda. Standardna radna odijela od pamuka, poliestera, poliamida, viskoze i drugih materijala mogu se zapaliti, stoga je važno koristiti zaštitna odijela od odgovarajućih tkanina s posebnim svojstvima.

Tkanina koja sadrži 87 % pamuka, 12 % poliamida, 1 % ugljika te zaštitni vatrootporan sloj koji se primjenjuje izravno na vlakna izvršno je rješenje za proizvodnju vatrootpornih odijela te odijela za zaštitu od termalnih opasnosti električnog luka. Vatrootporna obrada omogućuje dugotrajnu zaštitu od požara bez obzira na broj pranja odijela. Visoki sadržaj pamuka omogućuje udobnost, a posebna poliamidna vlakna pojačavaju tkaninu i poboljšavaju apsorpciju toplinske energije (Sl.5.1.) [18].



*Sl. 5.1. Odijelo za zaštitu od utjecaja električnog luka [19].*

Ispitivanja provedena na navedenoj tkanini pokazala su da nakon izlaganja plamenu unutar 5 sekundi nema topljenja na unutarnjoj strani tkanine niti pukotina i rupa većih od 5 mm u promjeru.

### 5.1.3. Upotreba rukavica za zaštitu od električnog luka

Ruke su, u većini slučajeva, dijelovi tijela koji imaju najmanju udaljenost od mogućeg izvora električnog luka, stoga je njihova zaštita izrazito bitna (Sl. 5.2.). Za testiranje termalnih oštećenja električnim lukom na rukavicama provode se identični testovi kao i na zaštitnim odijelima. Testovi na rukavicama koji se primjenjuju pokazali su da električni luk nije izazvao zapaljenje rukavica, površinsko taljenje, kao niti progorene rupe [18].





*Sl. 5.2. Rukavice za zaštitu od utjecaja električnog luka [19].*

#### **5.1.4. Upotreba kacige za zaštitu od električnog luka**

Na sigurnosnim kacigama također su provedeni slični testovi za zaštitu od električnog luka kao i na zaštitnim odijelima, te su rezultati ispitivanja potvrdili da dizajn kacige učinkovito štiti montera od električnog luka (Sl. 5.3.). Ispitivanja su provedena u testnoj komori, gdje je izazvan električni luk ( $135 \text{ kJ/m}^2$ ), a učinak na ljudsku glavu promatran je na lutki s 4 kalorimetra. Rezultati su bili pozitivni, odnosno pokazalo se da kaciga štiti glavu jednako učinkovito kao što odijelo štiti tijelo i rukavice ruke. Potrebno je spomenuti i dugački štitnik preko lica koji pruža učinkovitu zaštitu brade i vrata od čestica rastaljenog metala i vrućih krutih tvari [18].



*Sl. 5.3. Kaciga za zaštitu od utjecaja električnog luka [19].*

### 5.1.5. Softver za proračun energije električnog luka (*BSD Arc Calculator*)

Prije kupnje i upotrebe nove osobne zaštitne opreme potrebno je znati razinu zaštite od električnog luka. U tu svrhu od 2012. godine postoji tzv. *Box-Test*, na temelju čijeg algoritma je moguće izračunati energiju luka koji se može pojaviti na određenoj poziciji tijekom rada pod naponom. Energija luka prikazuje se kao funkcija struje kratkog spoja, naponske razine, vremena okidanja zaštitnih uređaja (osigurač ili prekidač), omjera R/X, minimalne udaljenosti u kojoj se može pojaviti luk (udaljenost između elektroda) te radne udaljenosti. Toj metodi izračuna, zbog njene visoke točnosti, potrebno je puno vremena za dobivanje rezultata te kao takvu nije ju učinkovito provoditi prije svakog rada pod naponom.

Zato je BSD (njemačka tvrtka za proizvodnju zaštitne opreme) razvila softverski alat *BSD Arc Calculator* (Sl. 5.4.), pomoću kojeg korisnik može, za kratko vrijeme izračunati energiju električnog luka za određeno radno mjesto, a samim time i odgovarajuću razinu zaštite od električnog luka [19].



Sl. 5.4. Softver *BSD Arc Calculator* [19].

## 5.2. Opasnost od pada

Za zaštitu od pada koriste se dvije vrste opreme, a to su oprema za pozicioniranje montera te oprema za sprječavanje pada montera na tlo. Svaki monter, ako radi na visini iznad 1,2 metra (stupovi i vodiči prijenosne mreže) mora koristiti navedenu zaštitu od pada.

### 5.2.1. Oprema za pozicioniranje montera

Oprema za pozicioniranje montera sastoji se od pojasa oko tijela montera i remena koji obuhvaća stup na koji se monter penje (Sl. 5.5.). To su također penjalice za drvene i betonske stupove koje se remenjem vežu na radnu obuću, metalne ljestve za stupove te sustavi za penjanje koji sadrže kanalice (vodilice) u koje se postavlja klizač sigurnosnog užeta. Ta oprema štiti montere od pada, dopuštajući ujedno da njihove ruke budu slobodne za obavljanje radova.



*Sl. 5.5. Oprema za pozicioniranje montera [20].*

### 5.2.2. Oprema za sprječavanje pada montera na tlo

Oprema za sprječavanje pada montera na tlo dolazi u raznim oblicima. Monteri obično koriste pojaseve oko tijela s užadi koja u slučaju pada prigušuje trzaj. Oprema mora biti takva da monter ne smije pasti više od 2 metra ili dosegnuti eventualnu nižu razinu.

Dok rade u mobilnoj korpi ili na platformi, monter moraju nositi opremu za sprječavanje pada s užetom spojenim na korpu ili platformu.

Svu opremu za zaštitu od pada potrebno je prije korištenja pregledati te se ista u slučaju nedostataka ne smije koristiti [20].

Oprema za sprječavanje pada montera na tlo sastoji se od sidrišta, pojaseva oko tijela montera te spojne užadi.

1. **Sidrište** je sigurna točka na koju je pričvršćen ostatak opreme za sprječavanje pada montera te mora biti sposobno podnijeti teret montera. Primjer sidrišta prikazan je na Slici 5.6.



*Sl. 5.6. Primjer sidrišta na korpi [20].*

2. **Pojasevi oko tijela** namijenjeni su za pričvršćivanje montera te kako bi se utjecaj trzaja zaustavljanja rasporedio na bedrima, zdjelici, prsima i ramenima (Sl. 5.7.). Tako se pomiče utjecaj trzaja s unutarnjih organa na glavne kosti i mišićne skupine oko zdjelice.



*Sl. 5.7. Pojasevi oko tijela na koje se povezuje zaštitna užad [22].*

3. **Spojna (fleksibilna) užad** za zaštitu od pada, s kopčama na svakom kraju, koristi se za povezivanje sidrišta i pojaseva oko tijela montera (Sl. 5.8.). Na slici crveni je dio pletena traka složena i lagano ušivena kao lepeza, a zove se ublaživač pada (engl. *shock absorber*). Ona se prilikom pada lagano para i usporava pad, odnosno smanjuje trzaj. Zeleno-žuti dio je kućište u kojem je spiralno na oprugu namotano uže ili traka koji se pri laganim pokretima odmotavaju i vraćaju u kućište, a pri jačim trzajima zakoče (poput sigurnosnog pojasa u automobilu) i taj dio zove se protupadno uže. Užad bi trebala biti usidrena iznad radnika kako bi se smanjila udaljenost pada. Uže mora biti dovoljno dugačko da osigura nesmetano obavljanje radova, a ujedno i što kraće kako bi se smanjila udaljenost pada.

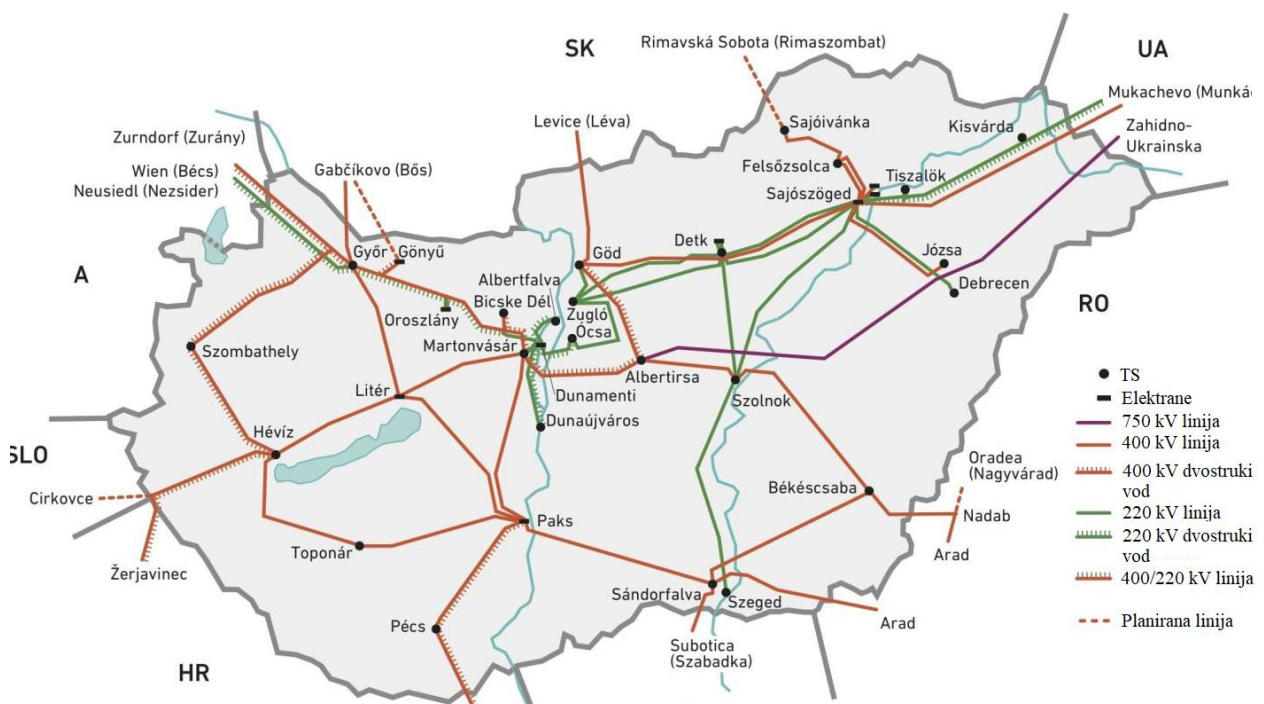


*Sl. 5.8. Spojno fleksibilno uže [22].*

Svi monter i koji obavljaju radove na području gdje je prisutan rizik od pada, moraju biti opremljeni opremom za zaštitu od pada te obučeni za njenu upotrebu. Obuka, osim dijela za upotrebu zaštitne opreme od pada, mora sadržavati i dio koji se odnosi na plan spašavanja. Točan i precizan izbor opreme za spašavanje iznimno je važan jer nepravilan izbor opreme može značajno povećati rizik od ozljede unesrećenog montera [21].

## 6. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA RADA POD NAPONOM NA PRIJENOSNOJ MREŽI

Ova analiza provedena je na primjeru Mađarske prijenosne mreže koja sadrži naponske razine od 120 kV, 220 kV, 400 kV i 750 kV (Sl. 6.1.). Bitno je naglasiti kako se na 40 % prijenosne mreže može raditi pod naponom bez ikakvih ograničenja, dok se na preostalih 60 % rad pod naponom može izvoditi uz određena ograničenja.



Sl. 6.1. Karta Mađarske prijenosne mreže [23].

### 6.1. Vrste troškova koji se javljaju pri održavanju

Najčešći radovi na Mađarskoj prijenosnoj mreži jesu zamjena odstojnika vodiča u snopovima te je primjer prikazan na Slici 6.2. U nastavku su uspoređeni troškovi takve vrste održavanja primjenom rada pod naponom i rada u beznaponskom stanju. Analiza troškova izrađena je za dva dalekovoda, Paks – Sandorfalva i Paks – Liter. Duljina dalekovoda Paks – Sandorfalva iznosi 112,3 km, a dalekovoda Paks – Liter 96,6 km.



*Sl. 6.2. Zamjena odstojnika na prijenosnoj mreži uz pomoć mobilne korpe [23].*

Najvažniji troškovi koji se javljaju pri zamjeni odstojnika sažeti su u nastavku.

- **Plaće:** Radovi su organizirani po timovima te je u svakom timu zaposleno 10 montera. Timovi se dijele na one koji rade u beznaponskom stanju te na timove za rad pod naponom. Monteri se plaćaju po satu, te je satnica slična za oba slučaja.
- **Zaštitna odjeća i oprema:** Potrebno je razlikovati troškove zaštitne odjeće i opreme u slučaju rada u beznaponskom stanju te u slučaju rada pod naponom. Razlog tome su različite norme koje je potrebno zadovoljiti. Vijek trajanja opreme ovisi o učestalosti njezine upotrebe.
- **Obuka:** Tehnologija rada pod naponom zahtijeva potrebne kvalifikacije te redovite obuke za razliku od montera koji rade u beznaponskom stanju. Ta vrsta troškova ovisi o vremenu trajanja obuke.
- **Smještaj:** Zamjena odstojnika na cijeloj liniji mreže traje nekoliko tjedana. Za to razdoblje potrebno je osigurati smještaj za određene timove, ali samo ako se primjenjuje rad pod naponom. Pri radu u beznaponskom stanju lokalni monter obavlja poslove te za njih nije potrebno osiguranje smještaja.



- Vozila: Koriste se različite vrste vozila za rad pod naponom te za rad u beznaponskom stanju. Ta vrsta troškova također ovisi o vremenu.
- Alati: Potrebni su specijalni alati za rad pod naponom, što također ima određene troškove. Njihov vijek trajanja, kao i onaj kod zaštitne opreme, ovisi o učestalosti upotrebe.
- Troškovi materijala: Odnose se na trošak materijala koji se koristi za zamjenu odstojnika. Ti su troškovi slični za oba slučaja jer ovise o duljini linije te su neovisni o tehnologiji održavanja.
- Dodatni troškovi gubitaka: Prekidi napajanja prijenosne mreže mogu povećati prosječni gubitak mreže. Ako je dalekovod Paks – Sandorfalva u beznaponskom stanju, prosječni dodatni gubitak mreže procjenjuje se na 4 MW, a isključenje dalekovoda Paks – Liter povećava prosječni gubitak mreže za 2 MW. Očito je da vrijednosti tih gubitaka ovise o vrsti topologije mreže i opterećenju.
- Oštećenje flore: Rad pod naponom može umanjiti štetnost na agrokulturu jer se održavanje može planirati uzimajući u obzir vegetacijsko razdoblje [23].

## 6.2. Proračun troškova

Proračun troškova izvršen je pri radu pod naponom te pri radu u beznaponskom stanju. U slučaju rada pod naponom najviše može raditi dva tima jer u mađarskom prijenosnom sustavu postoji oko 20 montera (10 po timu) obučениh za rad pod naponom. Rad u beznaponskom stanju mogu provoditi najviše 4 tima, uključujući i lokalne timove. Pri izračunu pretpostavka je da, ako 2, 3 ili 4 tima radi na zamjeni odstojnika, to traje pola, trećinu ili četvrtinu vremena u odnosu na to da na njemu radi samo jedan tim. Stoga su troškovi utemeljeni na vremenu neovisni o broju timova. Te vrste troškova su plaće, troškovi zaštitne odjeće, obuka, vozila i alati.

Rezultati proračuna dani su i uspoređeni u relativnim jedinicama, a referentni je slučaj onaj kada jedan tim radi pod naponom na zamjeni odstojnika.

### *1. Zamjena odstojnika na dalekovodu Paks – Sandorfalva*

Rezultat izračuna troškova pri radu pod naponom vidljivi su u Tablici 6.1.

*Tab. 6.1. Relativni troškovi pri radu pod naponom (Paks – Sandorfalva) [23].*

<b>Relativni troškovi pri radu pod naponom</b>		
<i>Vrsta troškova</i>	<i>1 tim</i>	<i>2 tima</i>
<b>Plaće</b>	37,3 %	37,3 %
<b>Zaštitna odjeća i oprema</b>	1,9 %	1,9 %
<b>Obuka</b>	1,1 %	1,1 %
<b>Smještaj</b>	1,1 %	2,2 %
<b>Vozila</b>	5,0 %	5,0 %
<b>Alati</b>	1,7 %	1,7 %
<b>Troškovi materijala</b>	51,1 %	51,1 %
<b>Dodatni troškovi gubitaka</b>	0,0 %	0,0 %
<b>Oštećenje flore</b>	0,7 %	0,7 %
<b>Ukupno</b>	100,0 %	101,1 %

Rezultati pokazuju da su najveći troškovi pri metodi rada pod naponom plaće te troškovi materijala. Rezultat izračuna troškova pri radu u beznaponskom stanju vidljivi su u Tablici 6.2.

*Tab. 6.2. Relativni troškovi pri radu u beznaponskom stanju (Paks – Sandorfalva) [23].*

<b>Relativni troškovi pri radu u beznaponskom stanju</b>				
<i>Vrsta troškova</i>	<i>1 tim</i>	<i>2 tima</i>	<i>3 tima</i>	<i>4 tima</i>
<b>Plaće</b>	28,0 %	28,0 %	28,0 %	28,0 %
<b>Zaštitna odjeća i oprema</b>	1,1 %	1,1 %	1,1 %	1,1 %
<b>Obuka</b>	0,4 %	0,4 %	0,4 %	0,4 %
<b>Smještaj</b>	0,0 %	2,2 %	3,3 %	4,1 %
<b>Vozila</b>	4,4 %	4,4 %	4,4 %	4,4 %
<b>Alati</b>	0,7 %	0,7 %	0,7 %	0,7 %
<b>Troškovi materijala</b>	51,1 %	51,1 %	51,1 %	51,1 %
<b>Dodatni troškovi gubitaka</b>	117,3 %	58,7 %	39,1 %	29,3 %
<b>Oštećenje flore</b>	3,0 %	3,0 %	3,7 %	3,7 %
<b>Ukupno</b>	206,1 %	149,6 %	131,9 %	122,9 %

Prva razlika je u tome što su troškovi plaće montera koji rade u beznaponskom stanju niže za 9,3% od montera koji rade pod naponom jer je ukupno vrijeme rada kraće. Troškovi zaštitne opreme, obuke, smještaja, vozila i alata veći su u slučaju rada pod naponom, a te razlike u troškovima iznose 4,1 % ili 3,0 %, ovisno o broju timova. Ako se koristi više od 2 tima pri radu u beznaponskom stanju, može se primijetiti prirast troškova oštećenja flore. Najznačajnija vrsta troškova pri radu u beznaponskom stanju jesu dodatni troškovi gubitka mreže koji nastaju ako je dalekovod Paks – Sandorfalva isključen. Gospodarski gubitak zbog isključenja tog dalekovoda premašuje ukupne troškove zamjene odstojnika tehnologijom rada pod naponom. Iako se dodatni troškovi gubitaka mreže znatno smanjuju ako se koristi više timova, troškovi rada u beznaponskom stanju u svim su slučajevima veći u odnosu na troškove pri radu pod naponom.

## 2. Zamjena odstojnika na dalekovodu Paks – Liter

Rezultat izračuna troškova pri radu pod naponom vidljivi su u Tablici 6.3.

*Tab. 6.3. Relativni troškovi pri radu pod naponom (Paks – Liter) [23].*

<b>Relativni troškovi pri radu pod naponom</b>		
<i>Vrsta troškova</i>	<i>1 tim</i>	<i>2 tima</i>
<b>Plaće</b>	37,2 %	37,2 %
<b>Zaštitna odjeća i oprema</b>	1,9 %	1,9 %
<b>Obuka</b>	1,1 %	1,1 %
<b>Smještaj</b>	1,2 %	2,5 %
<b>Vozila</b>	5,0 %	5,0 %
<b>Alati</b>	1,9 %	1,9 %
<b>Troškovi materijala</b>	50,9 %	50,9 %
<b>Dodatni troškovi gubitaka</b>	0,0 %	0,0 %
<b>Oštećenje flore</b>	0,8 %	0,8 %
<b>Ukupno</b>	100,0 %	101,2 %

Može se uočiti kako je raspodjela troškova vrlo slična kao u slučaju rada pod naponom na dalekovodu Paks – Sandorfalvi. Rezultat izračuna troškova pri radu u beznaponskom stanju su vidljivi u Tablici 6.4.

*Tab. 6.4. Relativni troškovi pri radu u beznaponskom stanju (Paks-Liter) [23].*

<b>Relativni troškovi pri radu u beznaponskom stanju</b>				
<i>Vrsta troškova</i>	<i>1 tim</i>	<i>2 tima</i>	<i>3 tima</i>	<i>4 tima</i>
<b>Plaće</b>	27,9 %	27,9 %	27,9 %	27,9 %
<b>Zaštitna odjeća i oprema</b>	1,1 %	1,1 %	1,1 %	1,1 %
<b>Obuka</b>	0,4 %	0,4 %	0,4 %	0,4 %
<b>Smještaj</b>	0,0 %	2,5 %	3,7 %	4,5 %
<b>Vozila</b>	4,3 %	4,3 %	4,3 %	4,3 %
<b>Alati</b>	0,8 %	0,8 %	0,8 %	0,8 %
<b>Troškovi materijala</b>	50,9 %	50,9 %	50,9 %	50,9 %
<b>Dodatni troškovi gubitaka</b>	60,8 %	30,4 %	20,3 %	15,2 %
<b>Oštećenje flore</b>	3,3 %	3,3 %	4,1 %	4,1 %
<b>Ukupno</b>	149,6 %	121,7 %	113,6 %	109,3 %

Kao na slučaju prethodnog dalekovoda, najznačajnija vrsta troškova kod rada u beznaponskom stanju dodatni su troškovi gubitaka.

## 7. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad prikazuje razvoj i trenutnu primjenu tehnologije rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima u svijetu, tj. u zemljama gdje je isti najviše zastupljen. Upoznaje se s organizacijom i obukom timova za rad pod naponom, kao i s najčešćim radovima koji se izvode pod naponom na visokonaponskim nadzemnim vodovima. U radu se također ukazuje na moguće opasnosti za montere, kao i način njihova sprječavanja. Prva takva opasnost jest utjecaj elektromagnetskog polja, koji se smanjuje ili poništava u potpunosti upotrebom Faradayevog kaveza te osiguravanjem pravilno geometrijski raspoređenih paralelnih grana kroz koje teče struja (npr. mobilna kolica) s ciljem smanjenja utjecaja magnetskog polja. Druga je opasnost pojava električnog luka, od koje se štiti upotrebom adekvatne opreme za zaštitu od istog. I naravno, kako rad pod naponom često podrazumijeva rad na visini, javlja se potreba za zaštitom od mogućeg pada. U tu svrhu koristi se zaštitna (fleksibilna) užad koja povezuju sidrište i pojaseve oko tijela montera.

Na kraju se može postaviti pitanje zašto raditi pod naponom, ulagati u obuku montera, alate i opremu, ako se jednostavno može prekinuti napajanje i sve odraditi u beznaponskom stanju voda. Jedan dio odgovora nalazi se već u uvodu rada, a to je ulaganje u kvalitetu isporuke električne energije, dok se drugi dio jasno prepoznaje u tehno-ekonomskoj analizi rada pod naponom na prijenosnoj mreži. Dolazi se do zaključka kako su troškovi ulaganja u obuku, alate i opremu za rad pod naponom znatno niži od troškova gubitaka koji se javljaju kao posljedica isključenja voda radi održavanja u beznaponskom stanju. Stoga se može reći kako je taj primjer ekonomske isplativosti rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima zapravo i „okidač“ za razmatranje i uvođenje istoga u svaku zemlju, pa tako i u Hrvatsku.

## LITERATURA

- [1] D. Raljević, Tehnologija rada pod naponom, dostupno na: [http://ss-tehnicka-kt.skole.hr/upload/ss-tehnicka-kt/images/static3/1502/attachment/TEHNOLOGIJA\\_RADA\\_POD\\_NAPONOM-DAMIR\\_RALJEVIC\\_die.pdf](http://ss-tehnicka-kt.skole.hr/upload/ss-tehnicka-kt/images/static3/1502/attachment/TEHNOLOGIJA_RADA_POD_NAPONOM-DAMIR_RALJEVIC_die.pdf) (pristupljeno: 20.06.2017)
- [2] M. Oltean, I. Sevastre, I. Rodean, 30 Years of Live Working in Romania - Economical Benefits of Live Working (case study), ICOLIM, Zagreb, Hrvatska, 2011.
- [3] A. Lourenco, A brief history of live work in the Portugese HV network, ICOLIM, Lisabon, Portugal, 1988.
- [4] L. Devatine, G. Heroin, Live working – A cutting-edge technique – 50 years of French history, RTE, Paris, Francuska, 2013.
- [5] M. N. Oltean, T. Fagarasan, D. L. Brabete, Complete Solutions For LW Maintenance of High Voltage OHL, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.
- [6] W. Lubicki, B. Dudek, Eighty years of Polish experiences in technology of live-line working and impressions from all 10 ICOLIM conferences, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.
- [7] A. Balawender, B. Dudek, 220-750 kV overhead transmission lines live work, ICOLIM, Torun, Poljska, 2008.
- [8] A. Krawulski, T. Niejadlik, Live wire work on 400 kV and 220 kV OHL executed by Energa SA Concern, Branch in Torun, ICOLIM, Prag, Češka, 2006.
- [9] E. Piechoczek, J. Macelko, B. Dudek, Using air techniques for live working in Poland, ICOLIM, Torun, Poljska, 2008.
- [10] L. Grzeszkiewicz, M. Schwann, Technical equipment of training field for practical teaching live voltage technology, ICOLIM, Torun, Poljska, 2008.
- [11] A. Cardoso, Live Line Works Training Center, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.
- [12] F. Simoes, J. Craveiro, Live Line Dry Cleaning in Electrical Installations, ICOLIM, Zagreb, Hrvatska, 2011.

- [13] R. Bonzano, M. Ricca, F. Scornajenchi, Live Maintenance on Enel Electrical Lines: 380 kV Dead-end Tower Insulator Strings, ICOLIM, Venecija, Italia, 1996.
- [14] G. De Dona, C. Valagussa, Pollution and Live Line Working, ICOLIM, Zagreb, Hrvatska, 2011.
- [15] G. Gocsei, B. Nemeth, I. Kiss, I. Berta, Health Effects of Magnetic Fields During Live-Line Maintenance, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.
- [16] G. Gocsei, B. Nemeth, Z. A. Tamus, I. Kiss, J. Meixner, Shielding efficiency of conductive clothing during live-line maintenance, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.
- [17] R. Malgesini, C. Valagussa, A. Villa, R. Carraro, R. Carraro, G. De Dona, C. D. Milanello, A. Parizia, Conductive clothing for live line working, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.
- [18] B. Dudek, J. Nowikow, W. Skomudek, Complete arc flash personal protective equipment for electricians, ICOLIM, Zagreb, Hrvatska, 2011.
- [19] T. Jordan, R. Dolata, Electric Arc Protection – PPE, Selection of PPE, High Performance PPE beyond Class 2, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.
- [20] Personal Protective Equipment - Fall Protection Equipment, dostupno na:  
[https://www.osha.gov/SLTC/etools/electric\\_power/ppe\\_fallprotectionequipment.html](https://www.osha.gov/SLTC/etools/electric_power/ppe_fallprotectionequipment.html)  
(pristupljeno: 15.01.2018.)
- [21] Fall Arrest Harnesses and Personal Protection Equipment (PPE), dostupno na:  
<https://www.cablejoints.co.uk/sub-product-details/fall-arrest-personal-protection-equipment>  
(pristupljeno: 25.2.2018)
- [22] J. P. Martin, H. Machado, Fall protection and rescue – Transmission, ICOLIM, Bukurešt, Rumunjska, 2004.
- [23] Z. Bertalan, J. Kiss, Z. A. Tamus, Technical Economic Feasibility Study on Live Line Maintenance on Hungarian Transmission Network, ICOLIM, Budimpešta, Mađarska, 2014.



## SAŽETAK

Tehnologija rada pod naponom na visokonaponskim postrojenjima u dosta zemalja diljem svijeta već je uvelike zastupljena. U ovom radu je upravo na primjerima tih zemalja obrađena takva vrsta tehnologije. Točnije, prikazan je razvoj tehnologije, kao i njezina trenutna primjena u svijetu. Upoznaje se s najčešćim vrstama radova koji se izvode, i to najčešće primjenom metode rada na potencijalu. Utjecaj elektromagnetskog polja na čovjeka te opasnost od pada i utjecaja električnog luka neizbježni su pri radu pod naponom te se od njih štiti vrlo učinkovito, što je detaljno prikazano u radu. Uz poznatu isplativost rada pod naponom zbog povećanja kvalitete opskrbe električnom energijom, prikazana je i ekonomska isplativost tehnologije rada pod naponom na primjeru prijenosne mreže.

**Ključne riječi:** rad pod naponom, visokonaponska postrojenja, metoda rada na potencijalu, elektromagnetsko polje, električni luk, prijenosna mreža.

## ABSTRACT

Live line technology on transmission power network is widely represented in the countries around the world. In this paper, such type of technology is analyzed, using those countries as examples. Specifically, the development of technology as well as its current application in the world is presented. The paper deals with the most common types of work carried out, most often using the bare hand method. The impact of the electromagnetic field on human being and the danger of falling and the influence of the electric arc are inevitable at live line works, but workers can very efficiently be protected, as presented in this paper. In addition to the well-known profitability of live line work, due to the increase in the quality of electrical energy, the economic profitability of live line work is presented, for example, for transmission lines.

**Keywords:** live line work, transmission power network, bare hand method, electromagnetic field, electric arc, transmission lines.

## ŽIVOTOPIS

Matej Arić rođen je 26. studenog 1993. godine u Novoj Gradiški. Prva tri razreda osnovne škole završava u PŠ Donji Crnogovci, nakon čega preostalih pet razreda osnovne škole završava u OŠ Staro Petrovo Selo. U osmom razredu sudjeluje na državnom natjecanju mladih tehničara u Puli te osvaja 3. mjesto na području elektrotehnike. Završivši osnovnu školu, upisuje Elektrotehničku školu Nova Gradiška te sve razrede završava s izvrsnim uspjehom. 2012. godine upisuje Sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku koji završava 2015. godine te stječe zvanje sveučilišnog prvostupnika inženjera elektrotehnike (univ. bacc. ing. el.). 2015. godine upisuje Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike, smjer energetika, modul DEB - Održiva elektroenergetika. 2017. godine obavlja stručnu praksu u tvrtki HEP ODS Elektroslavonija Osijek. Tijekom svih godina svoga studiranja zaposlen je preko studentskog servisa, ispunjavajući gotovo puni fond radnih sati predviđen za stalne zaposlenike. U slobodno vrijeme igra nogomet te se bavi fitnessom.