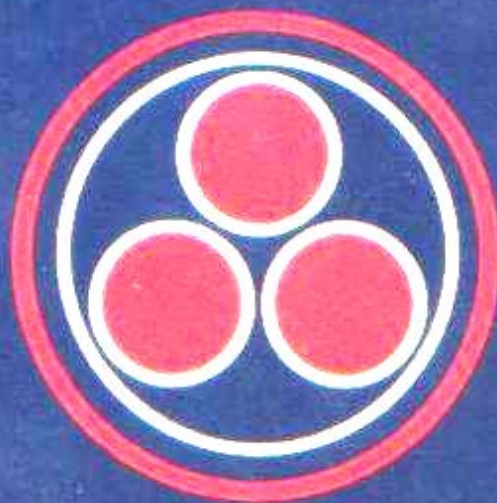


B.M.LALEVIĆ

PRIRUČNIK
KABLOVI
ELEKTROENERGETSKI



BORISLAV M. LALEVIĆ
PRIRUČNIK KABLOVI ELEKTROENERGETSKI
BEOGRAD, 1997. g.

Recenzent:

mr MILADIN TANASKOVIĆ, dipl. inž.

Priprema za štampu:

VLADIMIR MILISAVLJEVIĆ, dipl. inž.

Crteži:

ACA DRENKOVIĆ, tehn.

Urednik:

VLADIMIR MILISAVLJEVIĆ, dipl. inž.

Štampa:

"CEKOS - ING", BEOGRAD, Ul. Lole Ribara 28

Izdavač:

AUTOR

ISBN 86-901811-1-3

CIP - Каталогизacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije

621.315.2(035)

ЛАЛЕВИЋ, Борислав М.

Kablovi - elektroenergetski: priručnik /

B. [Borislav] M. Lalević; [crteži Aca Drenković] - Beograd:

B. Lalević, 1997. (Beograd: Cekos - Ing).

525 str.: ilustr.; 18 cm

Tiraž 550. - Bibliografija: str. 521-522. Registar

ISBN 86 - 901811 - 1 - 3

а) Каблови - Приручници

ID 52460044

PRIRUČNIK KABLOVI ELEKTROENERGETSKI

BORISLAV M. LALEVIĆ, dipl. ing.

Izdavanje ovog priručnika
pomoglo je
J.P. "Elektrodistribucija - Beograd"

1997. BEOGRAD

Ovaj priručnik ima namenu da u oblasti kablovske tehnike popuni prazninu nastalu između opšte literature iz ove oblasti i praktične primene.

Želja autora je bila da se na jednom mestu daju tehnička uputstva i osnovni podaci o kablovima koji će omogućiti korisniku da na jednostavan i brz način dođe do informacija i rešenja tehničkih problema. U tom cilju je za važnije oblasti, kao što je strujno opterećenje kablova i dr. dato oko 20 primera proračuna koji predstavljaju smernice za druge proračune.

Priručnik je namenjen stručnjacima elektroprivrede, a posebno stručnjacima elektrodistributivnih preduzeća, planerima i projektantima kablovskih mreža.

Izdavanje ovog priručnika pomoglo je J.P. "Elektrodistribucija Beograd", zauzimanjem direktora g. Branislava Uskokovića, dipl. ecc. i zamenika direktora g. Milutina Radulovića, dipl. inž.

Posebno ističem trud mr Miladina Tanaskovića, dipl. inž. recenzenta priručnika, čiji su predlozi, primedbe i zapažanja bili od izuzetne koristi.

Za izradu brojnih crteža i nomograma prvenstvenu zaslugu ima g. Aca Drenković, teh.

Uređenje priručnika i obradu teksta uspešno je obavio g. Vladimir Milisavljević, dipl. inž.

*Beograd,
1997.*

Autor

SADRŽAJ

1. Osnovne vrednosti i oznake	1
1.1. Formati papira	1
1.2. Rimski brojevi	1
1.3. Grčka azbuka	2
1.4. Delovi i umnošci jedinica	2
1.5. Osnovne konstante	2
1.6. Elektrohemijski niz	3
1.7. Standardni napon	4
1.8. Koordinacija izolacije	8
1.9. Osobine materijala	12
1.10. Simboli vodova	18
2. Jedinice	20
2.1. Internacionalni sistem jedinica (SI)	20
2.2. Osnovne SI jedinice	20
2.3. Dopunske jedinice	20
2.4. Izvedene jedinice SI sa posebnim oznakama	21
2.5. Preračunavanje temperatura	26
3. Definicije konstruktivnih elemenata kabla	27
4. Označavanje i obeležavanje kablova	28
4.1. Označavanje kablova prema JUS-u	28
4.2. Označavanje kablova prema DIN VDE	28
4.3. Obeležavanje kablova	33
5. Vrste kablova	38
5.1. Niskonaponski kablovi (NN kablovi)	38
5.2. Srednjenaponski kablovi	39
5.3. Visokonaponski kablovi	44
5.3.1 <i>Termostabilni kablovi</i>	44
5.3.2 <i>Kablovi sa sintetičkom izolacijom</i>	54
5.3.3 <i>Cevni kablovi SF₆</i>	56
5.3.4 <i>Kriogeni kablovi</i>	59
5.3.5 <i>Kablovi za jednosmernu struju</i>	63
5.4. Ekonomičnost kablova	68
5.5. Kablovi posebne namene	69
5.5.1 <i>Podvodni kablovi</i>	69
5.5.2 <i>Rudarski kablovi</i>	71
5.5.3 <i>Brodski kablovi</i>	73
5.5.4 <i>Kablovi otporni prema gorenju</i>	74

6. Provodnik	75
6.1. Opšte	75
6.2. Električni otpor provodnika	75
6.3. Građa i geometrija kablova	79
6.4. Upoređenje bakra i aluminijuma	84
6.5. Mehaničke osobine bakra i aluminijuma	85
7. Izolacije kablova	89
7.1. Papir	89
7.1.1. Starenje papira	94
7.2. Izolaciona ulja i uljni kompaundi	96
7.3. Izolacije iz grupe polimera	98
7.3.1. Polivinilhlorid (PVC)	99
7.3.2. Polietilen (PE)	101
7.3.3. Umreženi polietilen (XPE)	103
7.3.4. Etilen propilen (EPR)	104
7.3.5. Duroplasti	104
7.3.6. Parcijalna pražnjenja	105
7.3.7. Starenje polimera	106
7.4. Papir laminiran polirpropilenom (PPLP - Polypropylen Laminated Paper)	107
7.5. Gasovi	109
8. Slaboprovodljivi slojevi	110
9. Plaštev i električne zaštite i armature	112
9.1. Metalni plaštev i	112
9.2. Zaštitni spoljašnji plaštev i	116
9.3. Električne zaštite	118
9.4. Armature	118
10. Građa i geometrija kablova	119
10.1. Papirni kablovi	119
10.2. PVC kablovi	144
10.3. XPE kablovi	146
11. Ispitivanje kablova	156
12. Parametri kablova	163
12.1. Električni otpor provodnika	163
12.2. Induktivnost	170
12.3. Kapacitet	177
12.3.1. Struja zemljospoja	180
12.3.2. Struja punjenja	182
12.4. Nulta impedansa	184
12.5. Redukcioni faktor	190
12.6. Otpor izolacije	192
12.7. Talasna impedansa i prirodna snaga	199

13. Električno polje	201
13.1. Opšte	201
13.2. Trožilni kabl sa okruglim žilama	206
13.3. Trožilni kabl sa sektorskim žilama	207
13.4. Kablovi jednosmernog napona	208
14. Napon kabla	209
15. Pad napona	211
16. Izbor kablova visokog napona	215
17. Strujna opteretljivost	218
17.1. Stalno strujno opterećenje ($m=1$)	219
17.1.1. <i>Kabl u zemljištu</i>	219
17.1.1.1. Jedan kabl	219
A. Naznačene struje kablova izolovanih impregnisanim papirom položenih u zemljište 3,6/6 kV; 6/10 kV; 12/20 kV; 20/35 kV	232
B. Naznačene struje kablova izolovanih polivinilhloridom (PVC) položenih u zemljište 0,6/1 kV	246
C. Naznačene struje kablova izolovanih umreženim polietilenom (XPE) položenih u zemljište 0,6/1 kV; 3,6/6 kV; 6/10 kV; 12/20 kV; 20/35 kV	249
D. Naznačene struje visokonaponskih kablova izolovanih umreženim polietilenom (XPE) položenih u zemljište 64/110 kV	260
17.1.1.2. Grupa kablova istog tipa i jednakog strujnog opterećenja	269
17.1.1.3. Uticaj isušivanja zemljišta	272
17.2. Promenljivo opterećenje	281
17.2.1. <i>Uticaj isušivanja zemljišta</i>	286
17.2.2. <i>Grupa kablova istog tipa i promenljivog strujnog opterećenja, sa isušivanjem zemljišta</i>	296
17.3. Kabl u vazduhu	300
A. Naznačene struje kablova izolovanih impregnisanim papirom položenih u vazduhu 3,6/6 kV; 6/10 kV; 12/20 kV; 20/35 kV	308
B. Naznačene struje kablova izolovanih polivinilhloridom (PVC) položenih u vazduhu 0,6/1 kV	321
C. Naznačene struje kablova izolovanih umreženim polietilenom (XPE) položenih u vazduhu 0,6/1 kV 3,6/6 kV; 6/10 kV; 12/20 kV; 20/35 kV	323
D. Naznačene struje visokonaponskih kablova izolovanih umreženim polietilenom (XPE) položenih u vazduhu 64/110 kV	338
17.4. Kabl u cevi	347
17.4.1. <i>Stalno strujno opterećenje ($m=1$) jednog kabla u cevi</i>	347

17.4.2. Grupa kablova istog tipa i strujnog opterećenja u cevima ($m=1$)	351
17.4.3. Grupa kablova istog tipa u cevima, promenljivog opterećenja, sa isušivanjem zemljišta	356
17.5. Kablovi u kanalima	356
17.5.1. Neprohodni kanali	356
17.5.2. Prohodni kanali	360
17.6. Uticaj kablovske posteljice	365
18. Nužni pogon	371
19. Toplotna vremenska konstanta	375
20. Zemljište	377
20.1. Toplotni otpor zemljišta	377
20.2. Specifični toplotni otpor zemljišta	378
20.3. Temperatura zemljišta	382
20.4. Kablovska posteljica	384
20.5. Merenje specifičnog toplotnog otpora	385
21. Toplotno i mehaničko naprezanje pri kratkom spoju	387
21.1. Zagrevanje provodnika	387
A. Dozvoljene struje kratkog spoja kablova izolovanih impregnisanim papirom 3,6/6 kV; 6/10 kV; 12/20 kV; 20/35 kV	392
B. Dozvoljene struje kratkog spoja kablova izolovanih umreženim polietilenom (XPE) 0,6/1 kV; 3,6/6 kV; 6/10 kV; 12/20 kV; 20/35 kV; 64/110 kV	399
C. Dozvoljene struje kratkog spoja kablova izolovanih polivinilhloridom (PVC) 0,6/1 kV	402
21.2. Zagrevanje električne zaštite, olovnog i aluminijumskog plašta i čelične mehaničke zaštite	405
21.3. Elektromagnetene sile	409
21.4. Toplotnomehaničke sile	412
22. Gubici	415
22.1. Gubici u provodnicima	415
22.2. Gubici u metalnom plaštu	416
22.3. Gubici u metalnoj mehaničkoj zaštiti kabla	419
22.4. Dielektrični gubici	420
23. Polaganje kablova	424
23.1. Dozvoljeni poluprečnik savijanja kablova	424
23.2. Dozvoljene visinske razlike na trasi kablovskog voda	424
23.3. Dozvoljene temperature polaganja kabla	425
23.4. Polaganje kablova u rov	427
23.5. Polaganje kablova u objekte	429

23.6. Polaganje kablova u korita reka	432
23.7. Polaganje kablova preko mostova	433
23.8. Sile pri polaganju kablova	434
23.8.1. <i>Dozvoljene vučne sile</i>	434
23.8.2. <i>Sile otpora pri polaganju kablova</i>	437
24. Međusobni uticaji i odnosi energetskih kablova	
i drugih podzemnih instalacija i objekata	440
24.1. Uticaj elektroenergetskih (EE) kablova na telekomunikacione (TK) kablove	440
24.2. Uticaj jednosmerne vuče na energetske kablove	452
24.3. Uticaj toplovoda na kablove	456
24.4. Vodovod	458
24.5. Cevovodi	460
24.6. Železnička pruga	461
24.7. Putevi	461
24.8. Drvoredi	462
24.9. Podzemne instalacije na javnim površinama	463
25. Spajanje provodnika	468
25.1. Metode spajanja provodnika	468
25.2. Stezaljke	471
25.3. Ispitivanje spojeva	474
A. Spojne čaure i papuče za Al i Cu provodnike	475
26. Kablovske glave i spojnice	481
26.1. Opšte	481
26.2. Izolacioni materijali	485
26.3. Tipovi kablovskih glava i spojnica	487
26.4. Ispitivanje kablovskih glava i spojnica	495
27. Ispitivanje kablova posle polaganja	501
27.1. Ispitivanje izolacije kabla	501
27.2. Ispitivanje spoljašnjeg plašta kabla	507
28. Određivanje grešaka na kablovima	501
28.1. Opšte	501
28.2. Predodređivanje mesta greške na kablovima	510
28.3. Tačno određivanje mesta greške	511
28.4. Određivanje mesta pacijalnih pražnjenja	511
28.5. Određivanje mesta greške na spoljašnjem plaštu kabla	511
29. Spisak važnije literature iz oblasti kablovske tehnike	521
30. Spisak pojmova	521

3. DEFINICIJE KONSTRUKTIVNIH ELEMENTATA KABLA

Našim nacionalnim standardima za više vrsta kablova (*JUS N. C5. 020, JUS N. C5. 220, JUS N. C5. 230, JUS N. C5. 240*) definisani su pojedini njihovi konstruktivni elementi.

Definicije:

- Žila: izolovan provodnik sa ili bez zaštite.¹⁾
- Jednožični kabl: kabl sa jednom žilom, koji može imati električnu zaštitu ili koncentrični provodnik.²⁾
- Višežični kabl: kabl koji ima dve ili više žila za prenos električne energije.²⁾
- Jezgro kabla: element kabla koji se sastoji od jedne žile ili više použenih žila, sa odgovarajućom ispunom.
- Ispuna: pogodan materijal koji se koristi za popunu međuprostora između žila višežilnog kabla.
- Pojasni kabl (kabl sa neradijalnim električnim poljem): višežični kabl sa zajedničkom papirnom izolacijom preko použenih žila (oznake: IPO, NPO).
- Kabl sa električnom zaštitom (kabl sa radijalnim električnim poljem): jednožični ili višežični kabl sa posebnom električnom zaštitom za svaku žilu (oznake: IPHO, NPHO).³⁾
- Separacioni plašt: plašt izrađen ekstruzijom, koji razdvaja električnu zaštitu i armaturu ako su od različitog materijala.
- Metalni plašt kabla: bešavna cev od olova ili aluminijuma koji se postavlja preko jezgra kabla i štiti ga od vlage i hemijskih ili mehaničkih oštećenja.
- Kabl sa zasebno oplaštenim žilama: višežični kabl sa zasebnim olovnim ili aluminijumskim plaštom na svakoj žili (oznake: IPZO, IPZA, NPZO, NPZA).
- Koncentrični provodnik: provodnik koji se postavlja preko žila ili preko jezgra kabla i služi kao neutralni ili zaštitni provodnik, a istovremeno kao električna zaštita.

¹⁾ Kod kablova PE, PE, EPR i sl. pojam žile obuhvata i slaboprovodljive slojeve.

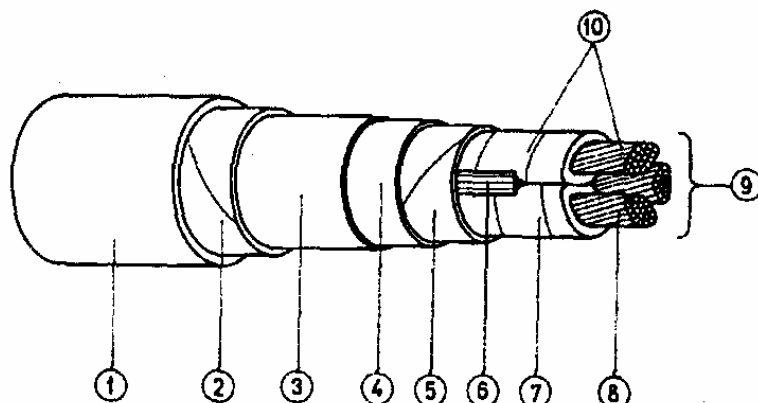
²⁾ Dopuna kao u napomeni ¹⁾

³⁾ Za kablove PE, PE, EPR i sl. daje se nešto šira definicija:

Električna zaštita - sloj načinjen od jedne ili više metalnih traka ili žica, ili kombinacije žica i traka, postavljenih preko jezgra kabla ili preko žila kabla (u nekim slučajevima preko slaboprovodljive ispune), a služi za ograničenje električnog polja, kao zaštitno uzemljenje, za odvođenje struja odvoda ili zemljospoja ili za zaštitu od smetnji visokih frekvencija.

- **Armatura:** sloj načinjen od metalnih traka ili žica, koji štiti kabl od mehaničkih oštećenja ili prekomernih naprezanja elemenata kabla.
- **Plast:** zaštitni sloj (od polivinilhlorida, polietilena ili polihloroprena) koji štiti elemente kabla od vlage, hemijskih uticaja i, u manjoj meri, od mehaničkih oštećenja; plast se postavlja preko jezgra kabla i armature (u nekim slučajevima i ispod armature kabla).

Na sl. 3.1. prikazani su osnovni konstruktivni elementi "pojasnog" kabla.



Slika 3.1. Kabl IPO 13 ("pojasni" kabl)

- 1 - zaštita od korozija (bitumenizirana juta); 2 - armatura kabla (dve čelične trake);
- 3 - unutrašnja zaštita (vlaknasta impregnisana materija); 4 - metalni plašt (Pb);
- 5 - pojasna izolacija (papir impregnisani normalnim kompaundom);
- 6 - ispuna (papir); 7 - izolacija provodnika (papir impregnisani normalnim kompaundom);
- 8 - provodnik; 9 - jezgro (žile sa ispunom); 10 - žila (izolovani provodnik)

4. OZNAČAVANJE I OBELEŽAVANJE KABLOVA

4.1. OZNAČAVANJE KABLOVA PREMA JUS-U

Označavanje kablova određuje *JUS N. CO. 006 - Označavanje izolovanih provodnika i kablova.*

Oznaka kablova sastoji se od grupe slovnih i brojevnih simbola kojima se prema navedenom redosledu označavaju:

- vrsta materijala upotrebljenog za izolaciju i plast,
- osobine konstrukcije,
- oznaka za zaštitni provodnik (ukoliko postoji),
- vrsta materijala, oblik predeka i sastav provodnika,
- broj žila i nazivni presek provodnika i
- naznačeni napon kabla.

Vrsta materijala upotrebljenog za izolaciju i nemetalni plašt izolovanih kablova, za slabo provodljive spojeve i za oplet izolovanih provodnika označava se sledećim slovnim simbolima:

- P - polovinil-hlorid,
- E - termoplastični polietilen,
- X - umrežni polietilen,
- G - guma na bazi prirodnog i stiren-butadijenskog kaučuka,
- Ev - etilen-vinilacetat
- B - butil-guma,
- Ep - etilen-propilen guma,
- Ab - butadijen-akrilonitril,
- Si - silikonska guma,
- F - politetrafluoretilen (PTFE),
- Fe - fluononirani etilen-propilen (FEP),
- Pa - poliamid,
- Ec - hlorirani polietilen,
- Ni - nitril-guma,
- Pt - poliester,
- N - polihloropren,
- Es - hlorsulfonirani polietilen,
- Pu - poliuretan,
- IP - impregnirani papir,
- NP - naročito impregnirani papir,
- H - slaboprovodljivi sloj ispod i iznad izolacije,
- h - slaboprovodljivi plašt i
- T - tekstilni oplet.

Vrste materijala i način izvođenja metalnog plašta označavaju se sledećim slovnim simbolima:

- A - aluminijumski plašt,
- Az - aluminijumski plašt od trake - zavaren,
- Av - aluminijumski plašt - valovit,
- O - olovni plašt i
- ZO - olovni plašt na svakoj žili posebno.

Osobine konstrukcije kablova označavaju se brojčanim simbolima, od 01 do 99, podeljenim u dekade. Svaka dekada sadrži grupu kablova sa izvesnim zajedničkim obeležjem konstrukcije:

- dekada od 01 do 09 - zaštita od korozije preko metalnog plašta, prema tabeli 4.1.,
- dekada od 10 do 19 - mehanička zaštita od čeličnih traka preko metalnog plašta, sa zaštitom od korozije ili bez nje, prema tabeli 4.2.,
- dekada od 20 do 29 - mehanička zaštita od okrugle pocinkovane čelične žice preko metalnog plašta, sa zaštitom od korozije ili bez nje, prema tabeli 4.3.,

- dekada od 30 do 39 - mehanička zaštita od pljosnate pocinkovane čelične žice ili specijalne okrugle aluminijumske žice preko metalnog plašta, sa zaštitom od korozije ili bez nje, prema tabeli 4.4.,
- dekada od 40 do 49 - elementi konstrukcije ispod plašta od termoplastične mase prema tabeli 4.5.,
- dekada od 50 do 59 - elementi konstrukcije ispod plašta od prirodne ili sintetičke gume, prema tabeli 4.6.,
- dekada od 60 do 69 - elementi konstrukcije ispod plašta od prirodne ili sintetičke gume, sa zaštitnim komandnim i kontrolnim provodnicima, prema tabeli 4.7.,
- dekada od 70 do 79 - elementi konstrukcije ispod ojačanog plašta od prirodne ili sintetičke gume, prema tabeli 4.8.,
- dekada od 80 do 89 - elementi konstrukcije ispod spoljašnjeg plašta od termoplastične mase ili elastomera, prema tabeli 4.9.,
- dekada od 90 do 99 - elementi konstrukcije iznad spoljašnjeg plašta od termoplastične mase ili elastomera, prema tabeli 4.10.,

Simbol 00 upotrebljava se za konstrukciju bez navedenih elemenata.

Napomena: Neiskorišćeni brojevi u pojedinim dekadama predviđeni su za nove konstrukcije kablova.

Izolovani provodnici i kablovi koji sadrže zaštitni provodnik obeležen zeleno/žutom bojom, označavaju se slovnim simbolom "Y".

Vrsta materijala, oblik preseka i sastav provodnika označavaju se tako što se prvo označi materijal, zatim oblik i sastav provodnika, na sledeći način:

- za provodnike od bakra simbol se izostavlja,
- za provodnike od aluminijuma stavlja se simbol "A",
- za višežične provodnike okruglog preseka simbol se izostavlja,
- za višežične provodnike sektorskog preseka stavlja se simbol "S" i
- za jednožične provodnike sektorskog preseka stavlja se simbol "SJ".

Presek koncentričnog provodnika ili električne zaštite izražava se u mm^2 , a razdvaja se kosom crtom od oznake preseka faznih provodnika. Pomenutim nacionalnim standardom u tabelama od 4.1. do 4.10. određeni su po dekadama elementi konstrukcije kabla.

Nekoliko primera označavanja vrste materijala i konstrukcije kablova:

IPO 13 - kabl sa izolacijom od impregnisanog papira, olovnim plaštom, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od dve čelične trake i spoljašnjim zaštitnim slojem;

NPO 13 - kabl sa izolacijom od naročito impregnisanog papira, olovnim plaštom, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od dve čelične trake i spoljašnjim zaštitnim slojem;

IPZO 13 - kabl sa izolacijom od impregnisanog papira, zaštitnim olovnim plaštom za svaku žili, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od dve čelične trake i spoljašnjim zaštitnim slojem;

NPZO 13 - kabl sa izolacijom od naročito impregnisanog papira, zaštitnim olovnim plaštom za svaku žilu, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od dve čelične trake i spoljašnjim zaštitnim slojem;

NPO 14 - kabl sa izolacijom od naročito impregnisanog papira, olovnim plaštom, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od dve čelične trake i spoljašnjim plaštom od PVC-mase;

IPAP 14 - kabl sa izolacijom od impregnisanog papira, aluminijumskim plaštom, unutrašnjim plaštom od PVC-mase, armaturom od dve čelične trake i spoljašnjim plaštom od PVC-mase;

NPO 23 - kabl sa izolacijom od naročito impregnisanog papira, olovnim plaštom, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od pocinkovanih okruglih žica i spoljašnjim zaštitnim slojem;

NPHO 24 - kabl sa izolacijom od naročito impregnisanog papira, sa električnom zaštitom, olovnim plaštom, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od pocinkovanih okruglih žica i spoljašnjim plaštom od PVC-mase;

IPO 26 - kabl sa izolacijom od impregnisanog papira, olovnim plaštom, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od dva sloja pocinkovanih okruglih čeličnih žica i spoljašnjim zaštitnim slojem;

EHP 48 - kabl sa izolacijom od PE, plaštom od PVC, sa slaboprovodljivim slojevima i električnom zaštitom u obliku omota ili opleta od metalnih žica, odnosno omota od metalnih traka, postavljenog oko svake žile posebno;

EHE 48 - kabl iste konstrukcije kao EHP 48, ali sa plaštom od PE;

EHPH 48 - kabl iste konstrukcije kao EHP 48, ali sa plaštom od slaboprovodljivog PVC;

EHEH 48 - kabl iste konstrukcije kao EHE 48, ali sa plaštom od slaboprovodljivog PE;

XP 00 - kabl sa izolacijom od umreženog polietilena (XPE), sa plaštom od PVC, jednostavne konstrukcije, bez drugih zaštitnih slojeva;

XP 41 - kabl sa izolacijom od XPE, sa plaštom od PVC i armaturom od dve čelične trake postavljene preko jezgra kabla;

XHP 48 - kabl sa izolacijom od XPE, sa plaštom od PVC, sa slaboprovodljivim slojevima i električnom zaštitom u obliku omota ili

opleta od metalnih žica odnosno omota od metalnih traka, postavljenom oko svake žile posebno;

XHE 49 - kabl sa izolacijom od XPE, sa plaštom od PE, sa slaboprovodljivim slojevima sa bubrećom trakom, električnom zaštitom u obliku omota ili opleta od metalnih žica odnosno omota od metalnih traka postavljenih oko svake žile posebno;

PP 00 - kabl sa izolacijom i plaštom od PVC-mase;

PP 40 - kabl sa izolacijom i plaštom od PVC-mase i koncentričnim provodnikom postavljenim preko jezgra kabla;

PP 41 - kabl sa izolacijom i plaštom od PVC-mase i armaturom od dve čelične trake preko jezgra kabla;

EpHP 48 - kabl sa izolacijom od EPR, plaštom od PVC, sa slabo provodljivim slojevima oko svake žile posebno i sa električnom zaštitom u obliku omota ili opleta od metalnih žica, odnosno omota od metalnih traka, postavljenom oko svake žile posebno;

EpHN 48 - kabl iste konstrukcije kao EpHP 48, ali sa plaštom od polihloroprena.

Primeri kompletnog označavanja kablova:

PP 00 - ASJ 3×150 + 70 mm² ¹⁾ 0,6/1 kV; četvorožični kabl sa izolacijom i plaštom od PVC-mase, sa tri fazna jednožična sektorska Al- provodnika i Al-nultim - neutralnim provodnikom, za nazivni napon 0,6/1 kV - fazni/linijski napon;

PP 00 - YS 4×150 mm² 0,6/1 kV; četvorožični kabl sa izolacijom i plaštom od PVC-mase sa tri sektorska fazna provodnika od bakra i zaštitnim provodnikom zeleno-žute boje, za nazivni napon 0,6/1 kV;

XP 00 - ASJ 3×150 + 70 mm² 0,6/1 kV; četvorožični kabl sa izolacijom od XPE i plaštom od PVC, sa tri fazna jednožična sektorska Al- provodnika, sa nultim jednožičnim sektorskim Al- provodnikom, za nazivni napon 0,6/1 kV;

NPO 13 - S 3×95 mm² 6/10 kV; trožični kabl sa izolacijom od naročito impregnisanog papira, sa sektorskim provodnicima od bakra, olovnim plaštom, unutrašnjim zaštitnim slojem, armaturom od dve čelične trake i spoljašnjim zaštitnim slojem, za nazivni napon 6/10 kV;

XHE 48 - A 1×150/25 mm² 6/10 kV; jednožični kabl sa izolacijom od XPE, sa slaboprovodljivim slojem ispod i iznad izolacije, sa faznim Al- provodnikom 150 mm² i bakarnom električnom zaštitom od 25 mm², sa plaštom od PE, za nazivni napon 6/10 kV.

¹⁾ U osnovnom propisu za označavanje kablova JUS N. CO. 006 ne označava se površina poprečnog preseka sa mm². Međutim u većini drugih JUS koristi se oznaka mm².

4.2. OZNAČAVANJE KABLOVA PREMA DIN VDE

Nemačkim propisima DIN VDE u sklopu odgovarajućih tipova kablova se određuje način njihovog označavanja.

Slovo N označava da je u pitanju normiran kabl prema VDE.

Ne označava se:

- bakarni provodnik,
- izolacija od impregniranog papira,
- spoljašnji i unutrašnji slaboprovodljivi slojevi (kod tzv. sintetičnih kablova),
- zajednički plašt žila,
- ispuna između žila i unutrašnji zaštitni plaš od vlaknaste materije (juta).

Provodnici se označavaju sledećim slovima:

RE - okrugli, jednožični provodnik,

RM - okrugli, višežični provodnik,

SE - sektorski, jednožični provodnik,

SM - sektorski, višežični provodnik,

RM|V - zbijeni (presovani) višežični okrugli provodnik,

H - okrugli, šuplji provodnik (primer: provodnik sa kanalom $\phi 12$ mm za ulje: RM|V 12H) i

OM - višežični provodnik ovalnog preseka.

Najvažnije slovne oznake kablova sa papirnom izolacijom i metalnim plaštom:

N - normiran tip kabla prema VDE,

H - višežični kabl sa metaliziranim papirom (Höchstädter - folija) na izolaciji provodnika (H - kablovi; primer: NHKBA),

E - svaka žila sa metalnim plaštom (primer: NEKBA),

K - Pb plašt,

KL - glatki Al-plašt,

D - zaštita od pritiska,

B - mehanička zaštita od čeličnih traka,

F - čelične pljosnate žice,

FO - otvorene čelične trake ¹⁾

R - čelične okrugle žice,

RO - otvorene čelične okrugle žice,

G - suprotno motane čelične trake,

E - dodatna zaštita od korozije za hemijske i elektrolitičke uticaje,

A - jednostruki spoljašnji plašt od jute,

¹⁾ Pod "otvorene" razume se da pri motanju čelične trake ostaju nezaštićeni-otvoreni delovi kabla između trake; sa dve trake koje se preklapaju tog nezaštićenog dela nema, pa se zato zovu "zatvorene".

Yv - pojačani spoljašnji plašt od PVC-mase,
2Yv - pojačani spoljašnji plašt od PE,
R - zaštitni premaz mehaničke zaštite protiv rđe,
w - koroziona zaštita otporna na toplotu,
fi - koroziona zaštita otporna na plamen,
I - kabl sa jednim zeleno-žutim zaštitnim provodnikom i
O - kabl bez zeleno-žutog zaštitnog provodnika.

Najvažnija slovna označavanja kablova sa sintetičkom izolacijom (PVC, PE, XPE):

Y - izolacija od PVC-mase,
2Y - izolacija od PE,
2X - izolacija od XPE,
C - koncentrični provodnik od bakra,
CW - koncentrični provodnik od bakra, motan talasasto,
S - jedna zajednička električna zaštita od bakra,
SE - električna zaštita od bakra za svaku žilu,
K - zajednički plašt od olova,
Y - PVC plašt,
2Y - PE plašt,
F - čelične pljosnate žice,
R - čelične okrugle žice,
G - suprotno motane čelične trake,
Y - spoljašnji zaštitni sloj od PVC-mase,
2Y - spoljašnji zaštitni sloj od PE,
I - kabl sa jednim zeleno-žutim zaštitnim provodnikom i
O - kabl bez zeleno-žutog zaštitnog provodnika.

Najvažnija slovna označavanja kablova visokog i najvišeg napona:

Ö - izolacija od papira i ulja,
Öl - izolacija od papira i ulja kod kablova u čeličnim cevima pod visokim pritiskom,
P - izolacija od impregniranog papira kod gasnih kablova sa spoljašnjim pritiskom gasa,
I - izolacija od impregnisanog papira kod gasnih kablova sa unutrašnjim pritiskom gasa,
K - zajednički olovni plašt,
UD - nemagnetne trake za zaštitu od pritiska, preko olovnog plašta,
KL - gladak Al-plašt
KLD - valoviti Al-plašt,
n - neupredene žile kod cevnih kablova,
v - upredene žile kod cevnih kablova,
Y - PVC plašt,
2Y - PE plašt,
E - motan zaštitni sloj od sintetičkih materijala,

F - čelične pljosnate žice,
R - čelične okrugle žice,
G - suprotno motane okrugle žice,
GL - nemagnetne žice,
St - čelična cev,
A - spoljašnji zaštitni sloj od jute impregnisane u kompaundu,
Y - spoljašnji zaštitni sloj od PVC i
2Y - spoljašnji zaštitni sloj od PE.

Neka posebna označavanja:

HX - izolacija od umreženog bezhalogenog polimera,
HY - plašt od umreženog bezhalogenog polimera,
H - plašt od neumreženog bezhalogenog polimera i
sv - tzv. naročito impregniran papir za kablovske trase sa velikim visinskim razlikama (uobičajeni naziv na engleskom: non draining compound, sv=nd).

Primeri označavanja nekih kablova visokog napona:

NÖKUDEY 1×300 RM|V 12H 64/110 kV; jednožični uljni kabl niskog pritiska,

ÖIGLnSt 2Y 3×120 RM 127/220 kV; trožični uljni kabl visokog pritiska u čeličnoj cevi,

NlvFSt2Y 3×120 RM|V 64/110 kV; trožični kabl sa unutrašnjim pritiskom gasa u čeličnoj cevi,

NPKDvFSt2Y 3×240 OM|V 64/110 kV; trožični kabl sa spoljašnjim pritiskom gasa u čeličnoj cevi (ovde znači: D - nemagnetne trake za zaštitu od pritiska, OM|V - višežični zbijeni provodnik ovalnog poprečnog preseka) i

2XS(FL)2Y 1×240 RM|35 64/110 kV; jednožični kabl izolovan sa XPE (kako ova konstrukcija nije još normirana propisima VDE nedostaje joj slovo N).

Tab. 4.1. Uporedno označavanje kablova

Standard	
DIN VDE	JUS
<p>NY Y</p> <ul style="list-style-type: none"> — spoljašnji PVC plašt — PVC izolacija — normirani tip 	<p>PP 00</p> <ul style="list-style-type: none"> — bez metalnog plašta i sl. — spoljašnji PVC plašt — PVC izolacija
<p>NA2 X Y</p> <ul style="list-style-type: none"> — spoljašnji PVC plašt — XPE izolacija — Al provodnik — normiran tip 	<p>XP 00-A</p> <ul style="list-style-type: none"> — Al provodnik — bez metalnog plašta i sl. — spoljašnji PVC plašt — XPE izolacija
<p>NA2XS2 Y</p> <ul style="list-style-type: none"> — spoljašnji PE plašt — električna Cu zaštita — XPE izolacija — Al provodnik — normiran tip 	<p>XE 48-A</p> <ul style="list-style-type: none"> — Al provodnik — električna Cu zaštita — spoljašnji PE plašt — XPE izolacija
<p>NA2XS(F)2 Y</p> <ul style="list-style-type: none"> — spoljašnji PE plašt — vodozaptivan — električna Cu zaštita — XPE izolacija — Al provodnik — normiran tip 	<p>XE 49-A</p> <ul style="list-style-type: none"> — Al provodnik — električna Cu zaštita i vodozaptivna bubreča traka — spoljašnji PE plašt — XPE izolacija
<p>NAKBA</p> <ul style="list-style-type: none"> — asfaltna juta — čelične trake — zajednički Pb plašt — Al provodnik — normiran tip 	<p>IPO 13-A</p> <ul style="list-style-type: none"> — Al provodnik — dve čelične trake i sloj impregnisanog jutanolg prediva — plašt od Pb ili Pb legure — impregnisan papir u normalnom kompaundu
<p>NEKEBA</p> <ul style="list-style-type: none"> — asfaltna juta — čelične trake — unutrašnja zaštita od PVC folija — trolovnj sa korozivnom zaštitom — normiran tip 	<p>IPZO 13</p> <ul style="list-style-type: none"> — dve čelične trake i sloj impregnisanog jutanolg prediva — zasebni plašt od Pb ili Pb legure za svaku žilu — impregnisan papir u normalnom kompaundu

- 1) N - tip kabla koji odgovara VDE,
 2) kabl sa impregnisanim papirom (bez oznake izolacije).

4.3. OBELEŽAVANJE KABLOVA

Obeležavanje kablova određuje *JUS N.C5.0.10. - Boje za označavanje i sistem obeležavanja žila kablova i izolovanih provodnika za nazivne napone do 1 kV.*

Obeležavanje žila kablova 1 kV obuhvata kablove sa izolacijom PVC, PE i XPE. Ovaj standard se ne odnosi na papirne kablove. Za obeležavanje se koristi 6 boja (tabela 4.2.)

Tab. 4.2. Boje za obeležavanje žila kablova 1 kV

Boja	Skraćenica
svetloplava	spl
smeđa	sm
žuta	žu
zelena	ze
crna	cn
bela	be

Način obeležavanja žila ovim bojama dat je u tabeli 4.3.

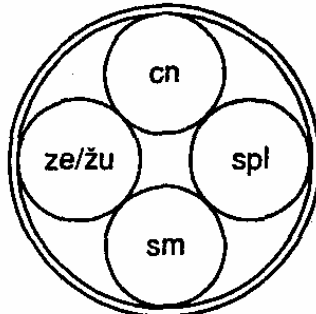
Tab. 4.3. Obeležavanje žila višežičnih kablova

Broj žila	Kabl sa zaštitnom (zeleno/žutom) žilom	Kabl bez zaštitne (zeleno/žute) žile	Kabl sa koncentričnim provodnikom
2	-	cn-spl	cn-spl
3	ze/žu-cn-spl	cn-spl-sm	cn-spl-sm
4	ze/žu-cn-spl-sm	cn-spl-sm-cn	cn-spl-sm-cn
5	ze/žu-cn-spl-sm-sn	cn-spl-sm-cn-cn	-
6 i više	a) u spoljašnjem sloju: jedna žila ze/žu, ostale cn, sa utisnutim brojevima, počevši sa 1 iz središta ili b) u spoljašnjem sloju: po jedna žila ze/žu i be, ostale cn, u ostalim slojevima: jedna žila be, ostale cn	a) sve žile cn, sa utisnutim brojevima, počevši sa 1 iz središta ili b) u spoljašnjem sloju: po jedna žila sm i be, a ostale cn, u ostalim slojevima: jedna žila be, ostale cn.	a) sve žile cn, sa utisnutim brojevima, počevši sa 1 iz središta, ili b) u spoljašnjem sloju: po jedna žila sm i be, ostale cn, u ostalim slojevima: jedna žila be, ostale cn.

Boje žila imaju za cilj da odrede i njihovu primenu (tabela 4.4.)

Tab. 4.4. Primena boja žila

Boje žila	Primena
svetlo plava	Za obeležavanje neutralnog provodnika. Može se upotrebiti i za obeležavanje faznih žila kod višežičnih kablova koji nemaju neutralni provodnik.
smeđa i crna	Za obeležavanje faznih žila.
zeleno-žuta	Isključivo za obeležavanje žila sa zaštitnom funkcijom, tj. zaštitnog (PE) i zaštitno-neutralnog provodnika (PEN).



Sl. 4.1. Primer obeležavanja žila kablova 1kV (PP 00 - Y 4x35 mm², 0,6/1 kV)

Žile kablova napona iznad 0,6/1 kV se ne boje. Imaju prirodnu boju izolacionog materijala od koga se prave.

Standardne boje plaštova od PVC, PE i polihloropena su:

- crna, za sve vrste kablova (sem rudarskih),
- žuta, za rudarske kablove 0,6/1 kV i
- crvena, za rudarske kablove iznad 0,6/1 kV.

Na spoljašnji plašt nanose se reljefne oznake i to:

- proizvođača,
- naznačenog napona kablova i
- tipa i preseka provodnika kablova.

5. VRSTE KABLOVA

Sa gledišta napona kablovi se dele na:

- niskonaponske kablove do 1kV,
- srednjenaponske kablove od 1kV do 60 kV,
- visokonaponske kablove od 60 kV do 500 kV i
- kablove vrlo visokog napona preko 500 kV.

Granica od 60 kV je ustanovljena, jer za taj i više napone nije bilo moguće koristiti konstrukciju kablova sa impregniranim papirom, zbog procesa nastajanja šupljina. Tek sa pronalaskom kabla sa uljem pod pritiskom (italijanski naučnik Emanneli, 1918. godine) mogli su se primenjivati naponi viši od 60 kV. Problem prelaska na vrlo visoke napone sastoji se pored ostalog i u smanjenju dielektričnih gubitaka, pošto su oni srazmerni U^2 . Sa konvencionalnim izolacijama strujno opterećenje kablova od 500 do 600 kV naglo opada, te su takve konstrukcije sasvim nerentabilne.

5.1. NISKONAPONSKI KABLOVI (NN KABLOVI)

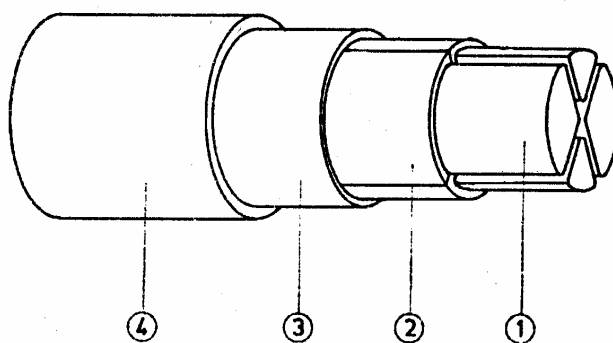
Osnovne izolacije nn kablova su:

- polivinilhlorid (PVC) i
- umreženi polietilen (XPE).

PVC pripada grupi plastomera, koji na višim temperaturama postaje plastičan i topljiv. Kablovi izolovani sa PVC praktično su nepreopteretljivi. Osnovna konstrukcija je PP 00. Zbog lakoće u proizvodnji i uspešne i jednostavne izrade spojeva, koristi se konstrukcija sa jednožičnim provodnikom (PP 00 ASJ). Provodnici su po pravilu aluminijumski, jer su ekonomičniji od bakra, a spajanje Al-provodnika se rešava sasvim uspešno.

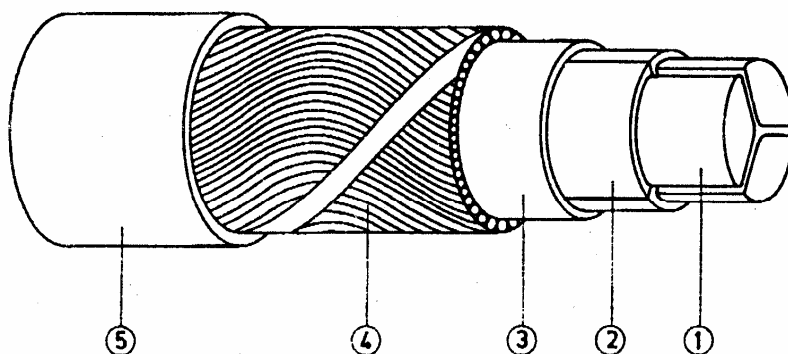
U manjem obimu se koristi kabl sa "O"-provodnikom od Cu-žica motanih koncentrično u obliku meandera (u Francuskoj od Al-žica).

PVC ne potpomaže gorenje, tj. gori samo uz prisustvo plamena, ali pri tome stvara veliki dim i gasove na bazi hlora.



Sl. 5.1. Kabl PP 00 ASJ (tzv. "solidal")

1 - jednožični Al-provodnik; 2 - PVC izolacija žile; 3 - unutrašnji sloj od gume ili PVC;
4 - spoljašnji omotač od PVC



Sl. 5.2. Kabl PP 40 ASJ

1 - jednožičani Al-provodnik; 2 - PVC izolacija žile; 3 - unutrašnji sloj od gume;
4 - "O"-provodnik od Cu-žica u formi meandera; 5 - spoljašnji omotač od PVC

Primena XPE sve više prevlađuje zbog njegove više radne temperature. Ovi kablovi su preopteretljivi. XPE ima jednu manu: gorljiv je. Zbog visoke radne temperature od 90 °C neizbežno dolazi do isušivanja zemljišta oko kabla. Ovaj problem odvođenja toplote uspešno se rešava posebnim kablovskim posteljicama. Najrasprostranjenija konstrukcija je XP 00.

5.2. SREDNENAPONSKI KABLOVI

Sa gledišta oblika električnog polja razlikuju se dva tipa srednjenaponskih kablova:

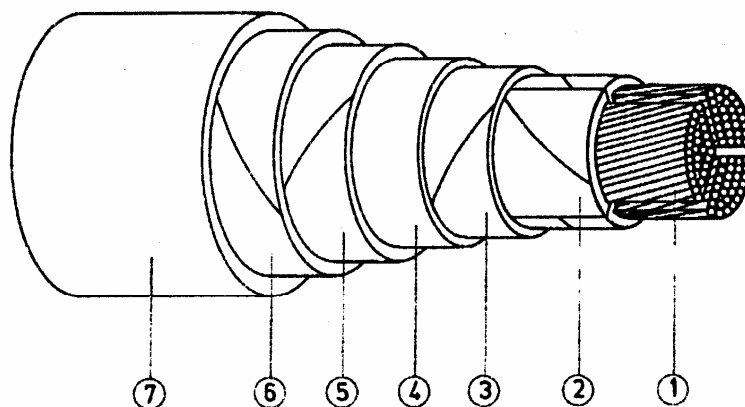
- sa neradijalnim električnim poljem i
- sa radijalnim električnim poljem.

Do 15 kV električno polje ne mora biti radijalno, bar što se tiče papirnih kablova. Kablovi izolovani sa XPE već se od 6 kV ekraniziraju, kako bi se ostvarilo radijalno električno polje.

Za izolovanje srednjenaponskih kablova koriste se pretežno dva materijala:

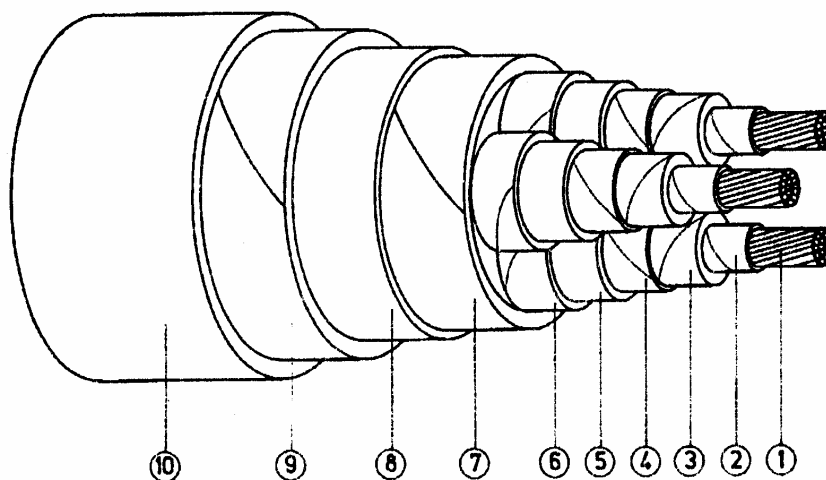
- impregnisani papir i
- XPE (umreženi polietilen).

Od PVC kao izolacije gotovo se odustalo. Najrasprostranjeniji kabl izolovan papirom u uljnom kompaundu (impregnisani papir) naziva se pojasni kabl¹⁾ (sl. 5.3.). Na sl. 5.4. prikazan je ekranizirani kabl 35 kV.



Sl. 5.3. Pojasni kabl IPO 13 AS, 6/10 kV

1 - Al-provodnik; 2 - izolacija žile; 3 - pojasna izolacija; 4 - olovni omotač; 5 - unutrašnja zaštita (papir ili juta); 6 - dve čelične trake; 7 - impregnisana juta



Sl. 5.4. Ekranizirani kabl NPZO 13 A, 20/35 kV

1 - Al-provodnik; 2 - ekran žile; 3 - izolacija žile; 4 - ekran izolacije; 5 - olovni plašt; 6 - impregnisani papir ili PVC trake; 7 - impregnisani papir; 8 - impregnisana juta; 9 - dve čelične trake; 10 - impregnisana juta

¹⁾ Uobičajeni naziv za "pojasni kabl" (prema JUS je IPO 13, a prema VDE NKBA) kod nas je "papirni kabl" - za razliku od uljnog (ulje pod pritiskom) visokonaponskog kablova. U nemačkoj literaturi se koristi naziv Masekabel koji je opšti naziv za kablove srednjeg napona izolovanih impregnisanim papirom.

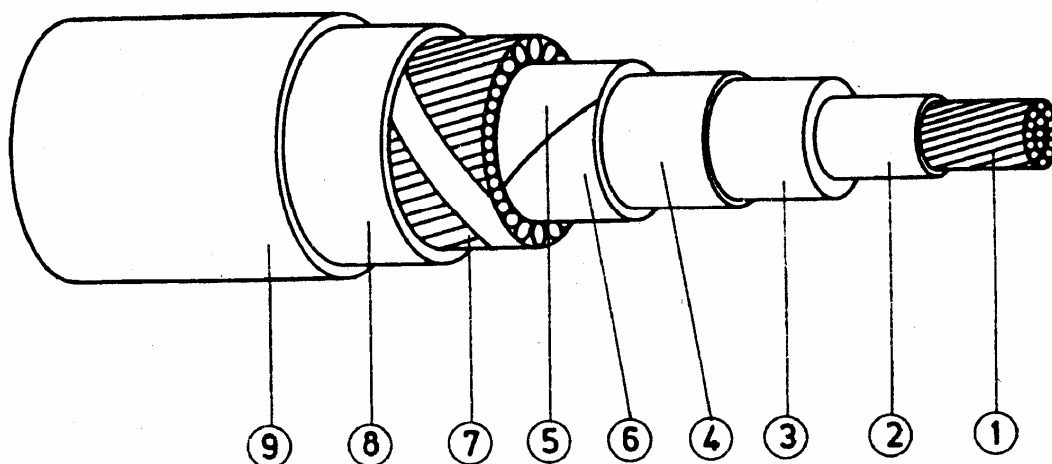
U svetu sve više prevlađuje upotreba kablova XPE izolacijom. Prednost ovih kablova u poređenju sa papirnim su:

- manji dielektrični gubici,
- viša radna temperatura,
- mogućnost primene za velike visinske razlike,
- jednostavna izrada kablovskih glava i spojnica i
- nepotrebno je održavati ih (otpada dolivanje ulja u kablovske glave).

Međutim, oni imaju i sledeće nedostatke:

- nedovoljno su otporni na mehanička opterećenja i udare (kod jednožilnih konstrukcija),
- veći redukcionni faktor,
- nedovoljna zaštita od prodora vode i
- uobičajene konstrukcije nemaju funkciju uzemljivača električne mreže.

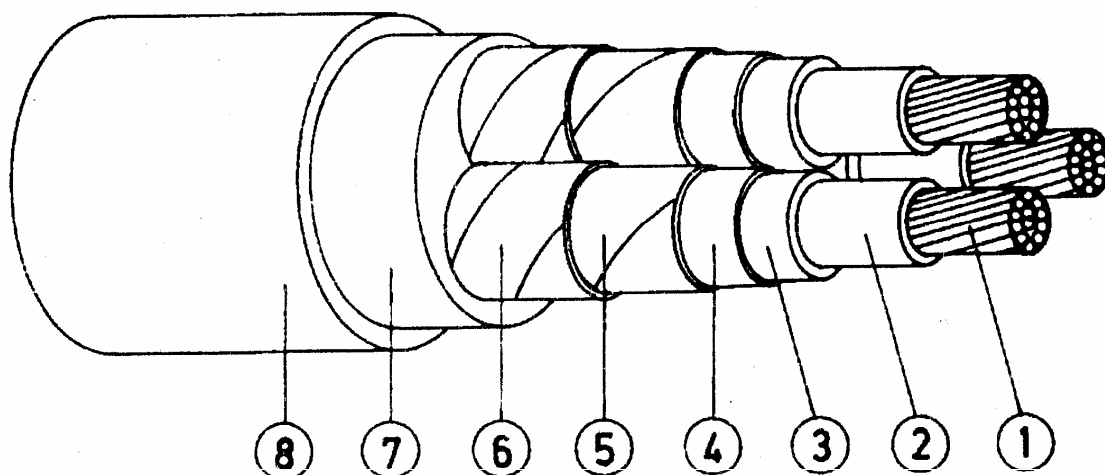
Primenom vodozaptivnih traka i praškova prodor vode se može ograničiti (sl. 5.5.). Za zaptivanje kablova se koriste i Al-kopolimer folije. Al-folija se postavlja podužno sa preklopom na spoju koji se topi i zavaruje.



Sl. 5.5. Kabl izolovan XPE, 10 kV (vodozaptivni)

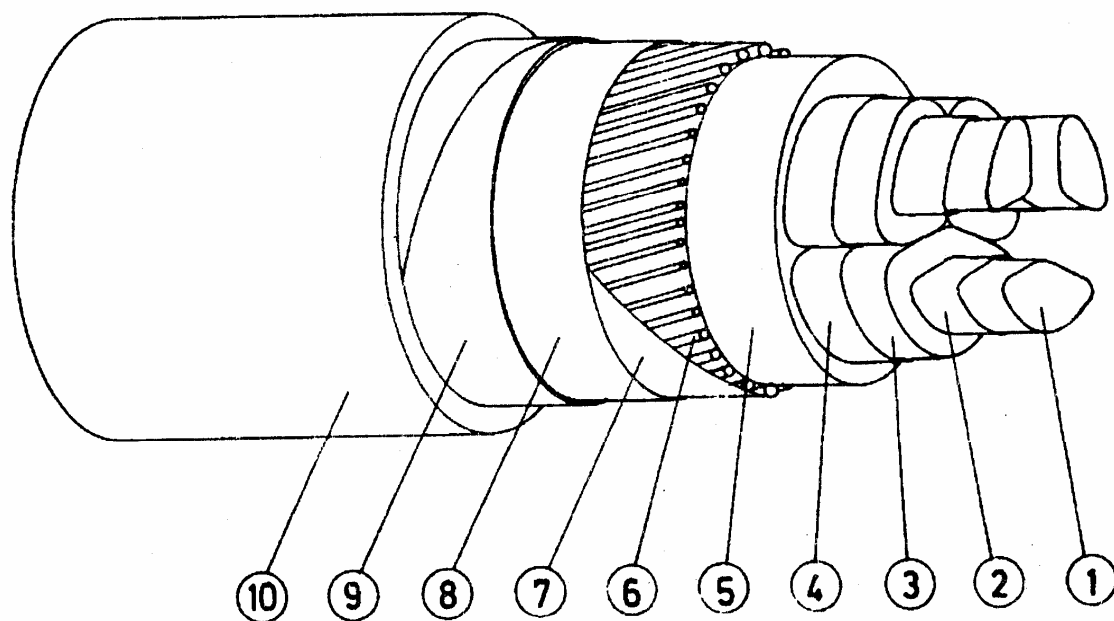
1 - provodnik; 2 - unutrašnji slaboprovodljiv sloj; 3 - XPE izolacija; 4 - spoljašnji slaboprovodljiv sloj; 5 - Kreppapir; 6 - bubreća slaboprovodljiva traka; 7 - električna zaštita; 8 - unutrašnji gumeni omotač, tzv. jastuk; 9 - spoljašnji PE omotač;

Ređe se koriste za električne mreže trožilni kablovi izolovani sa XPE, zbog povećanja broja kablovskih spojnica i više cene u poređenju sa jednožilnim konstrukcijama. Na sl. 5.6. i sl. 5.7. prikazane su neke konstrukcije trožilnih kablova sa izolacijom XHP.



Sl. 5.6. Trožilni kabl, 10 kV, izolovan XPE
sa pojedinačnom električnom zaštitom žila



















1 - Cu-provodnik; 2 - slaboprovodljivi sloj; 3 - XPE izolacija; 4 - poluprovodni sloj;
5 - slaboprovodljiva traka; 6 - električna zaščita od Cu-trake; 7 - ispuna; 8 - PVC omotač.



Sl. 5.7. Trožilni kabl, 10 kV, izolovan XPE
sa jedinstvenom električnom zaštitom

1 - Al-jednožični provodnik; 2 - slaboprovodljivi sloj; 3 - XPE izolacija; 4 - slaboprovodljivi sloj;
5 - slaboprovodljiva ispuna; 6 - električna zaščita od Cu-žica; 7 - Cu-traka;
8 - plastična folija; 9 - traka; 10 - PVC omotač

Tab. 5.1. Maksimalno dozvoljene trajne temperature izolacije (provodnika) nn i sredjenaponskih kablova

Napon $U_0 / U = 0,6 / 1$ kV				
Izolacija	Impregnisan papir	PVC	PE	XPE
Metalni omotač	Pb, Al	- ¹⁾	-	-
Tip kabla	 ("pojasni") i jednožilni	 i jednožilni	 i jednožilni	 i jednožilni
Dozvoljena temperatura	80 °C	70 °C	70 °C	90 °C
Napon $U_0 / U = 3,6 / 6$ kV				
Izolacija	Impregnisan papir	PVC	PE	XPE
Metalni omotač	Pb, Al	-	-	-
Tip kabla	 ("pojasni") i jednožilni	 i jednožilni	 i jednožilni	 i jednožilni
Dozvoljena temperatura	80 °C	70 °C	70 °C	90 °C
Napon $U_0 / U = 6 / 10$ kV				
Izolacija	Impregnisan papir	PVC	PE	XPE
Metalni omotač	Pb, Al	-	-	-
Tip kabla	 ("pojasni") i jednožilni	 i jednožilni	 i jednožilni	 i jednožilni
Dozvoljena temperatura	"pojasni" - 65 °C jednožilni - 70 °C	70 °C	70 °C	90 °C
Napon $U_0 / U = 12 / 20$ kV				
Izolacija	Impregnisan papir	PVC	PE	XPE
Metalni omotač	Pb, Al	-	-	-
Tip kabla	 (sa Pb plaštom za svaku žilu ili ekranom) i jednožilni	-	 i jednožilni	 i jednožilni
Dozvoljena temperatura	65 °C	-	70 °C	90 °C
Napon $U_0 / U = 20 / 35$ kV				
Izolacija	Impregnisan papir	PVC	PE	XPE
Metalni omotač	Pb, Al	-	-	-
Tip kabla	 (sa Pb plaštom za svaku žilu ili ekranom) i jednožilni	-	 i jednožilni	 i jednožilni
Dozvoljena temperatura	60 °C	-	70 °C	90 °C

¹⁾ Koristi se retko Pb omotač kod četvorožilnih kablova - zastarela konstrukcija.

Tab. 5.2. *Dozvoljene temperature izolacije (provodnika) u zavisnosti od vrste pogona*

Pogon	Izolacija				
	Impregnisani papir ³⁾	PVC	PE	XPE	EPR
Trajni	0,6 / 1 kV; 3,6 / 6 kV - 80 °C	70 °C	70 °C	90 °C	90 °C
	6 / 10 kV - 65 (70) °C ¹⁾	70 °C	70 °C	90 °C	90 °C
	12 / 20 kV - 65 °C	70 °C	70 °C	90 °C	90 °C
	20 / 35 kV - 60 °C	70 °C	70 °C	90 °C	90 °C
Kratkospojni	"pojasni"; 0,6 / 1 kV; 3,6 / 6 kV - 180 °C	160 °C	150 °C	250 °C	250 °C
	"pojasni"; 6 / 10 kV - 165 °C ²⁾	160 °C	150 °C	250 °C	250 °C
	jednožilni 6 / 10 kV - 170 °C ²⁾	160 °C	150 °C	250 °C	250 °C
	sa električnom zaštitom za svaku žilu 12 / 20 kV - 155 °C	160 °C	150 °C	250 °C	250 °C
	sa električnom zaštitom za svaku žilu 20 / 35 kV - 140 °C	160 °C	150 °C	250 °C	250 °C
Nužni	105 °C	⁴⁾	90 °C ⁵⁾	130 °C ⁶⁾	130 °C

Napomene:

¹⁾ Zavisno da li je kabl trožilni ("pojasni") ili jednožilni,

²⁾ Zavisno od načina spajanja provodnika kabla: za "meko" lemljenje 160 °C, za "tvrdo" lemljenje i spajanje zavrtnjima 180 °C, za varenje (tzv. švajsovanje) i presovanje sa dubokim utiskivanjem 250 °C,

³⁾ Temperatura može biti i viša (vidi 7.1.1. Starenje papira),

⁴⁾ PVC je temperaturno nepreopteretljiv. Specijalni PVC dozvoljava preopterećenje (90 - 100 °C),

⁵⁾ Neki proizvođači daju maksimalno trajanje u časovima na dan, godinu i ukupno 4 / 50 / 250 h,

⁶⁾ HK "Kablovi" - Jagodina daje maksimalno trajanje u časovima za dan, godinu i ukupno 8 / 100 / 500 h.

5.3. VISOKONAPONSKI KABLOVI

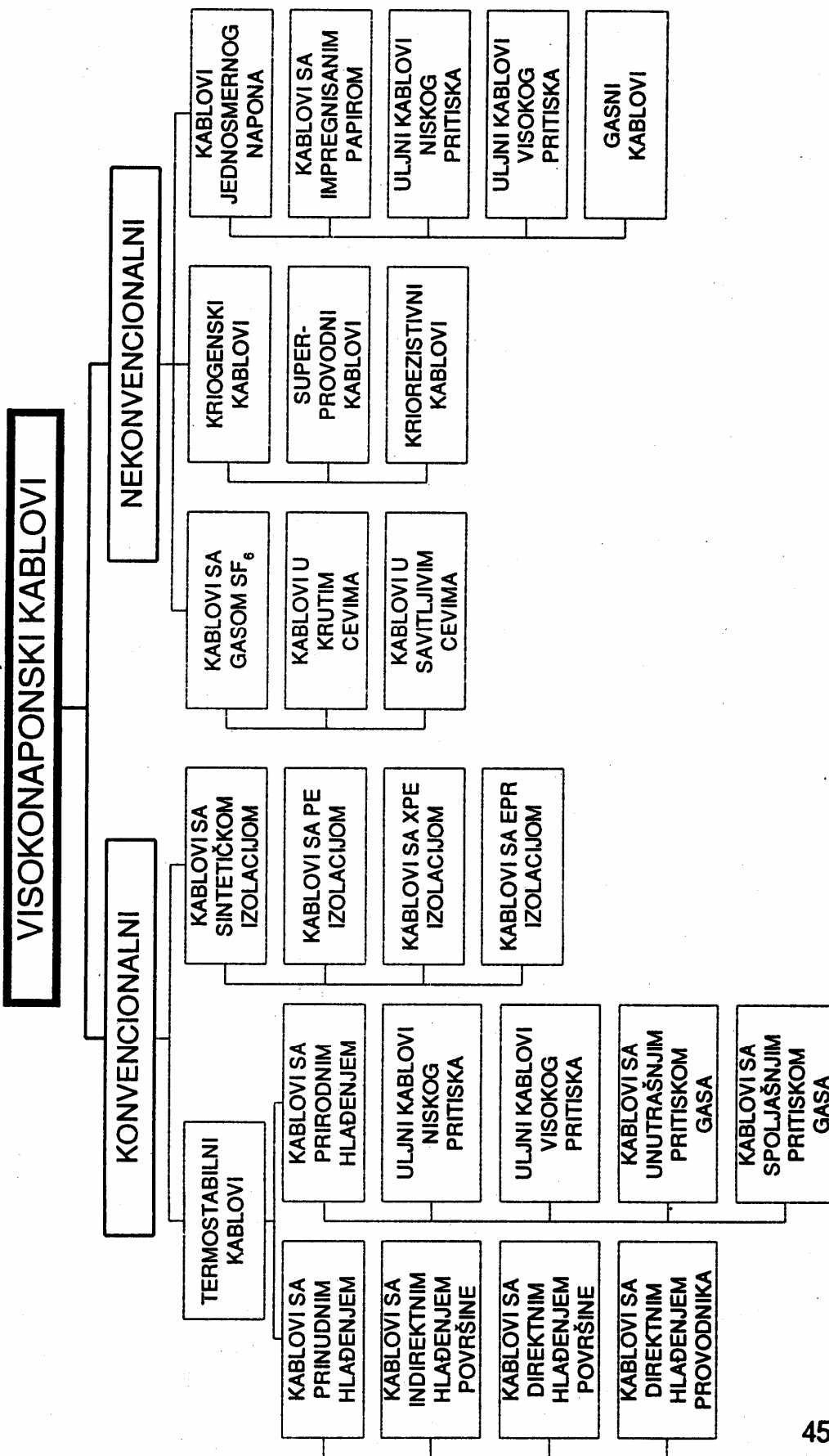
Visokonaponski kablovi se dele na konvencionalne i nekonvencionalne (vidi tabelu 5.3.)

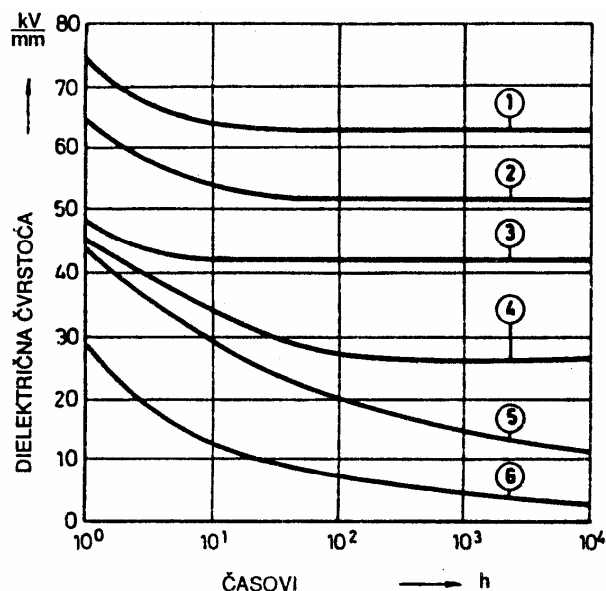
5.3.1. TERMOSTABILNI KABLOVI

Osobina termostabilnih kablova je ta što se tokom pogona nastale šupljine ispunjavaju tečnim izolacionim medijomom - uljem. Na taj način se njihova električna čvrstoća relativno brzo ustaljuje na jednu stalnu vrednost (vidi "krive života" kablova na sl. 5.8.). Termostabilni kablovi sa gledišta hlađenja se dele u dve grupe:

- kablovi sa prirodnim hlađenjem i
- kablovi sa prinudnim hlađenjem.

Tab. 5.3. Podela visokonaponskih kablova



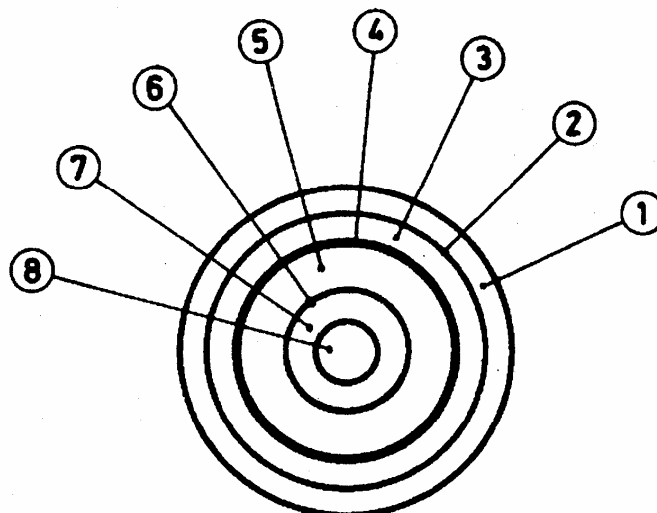


Sl. 5.8. "Krive života" visokonaponskih kablova izolovanih impregniranim papirom

- 1 - uljni kabl visokog pritiska; 2 - kabl sa spoljašnjim pritiskom gasa (15 bar);
 3 - kabl sa uljem niskog pritiska (8 bar); 4 - kabl sa unutrašnjim pritiskom gasa (15 bar);
 5 - papirni kabl sa radialnim električnim poljem; 6 - papirni - "pojasni" kabl.

Kablovi sa prirodnim hlađenjem

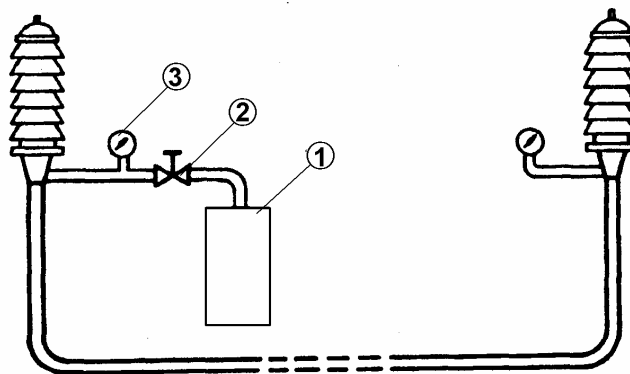
Kod ovih kablova hlađenje se obavlja preko zemlje, tj. vazduha.



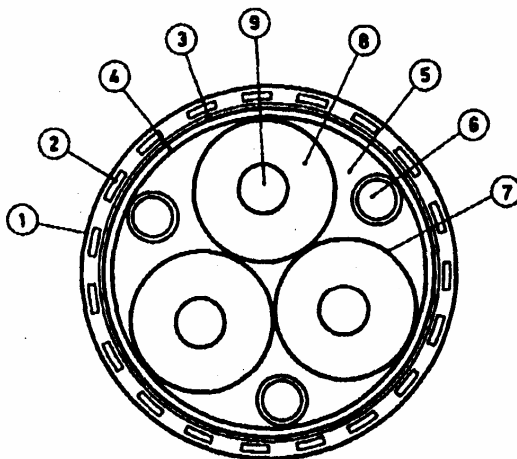
Sl. 5.9. Jednožilni uljni kabl sa kanalom u provodniku

- 1 - PVC spoljašnji plašt; 2- Cu-traka protiv pritiska; 3 - olovni omotač; 4- ekran žile; 5 - izolacija;
 6 - ekran provodnika; 7 - provodnik; 8 - kanal za ulje.

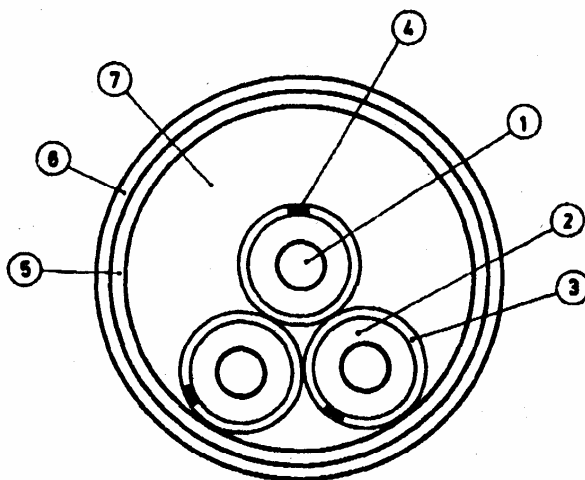
Uljni kablovi niskog pritiska (5 - 8 bar) najčešće se proizvode kao jednožilni (sl. 5.9.), zbog jednostavne konstrukcije, velike dužine na kablovskom bubnju, malnjeg broja kablovskih spojnica itd.



Sl. 5. 10. Šematski izgled jedne hidraulične deonice
1 - rezervoar za ulje; 2 - ventil; 3 - manometar.



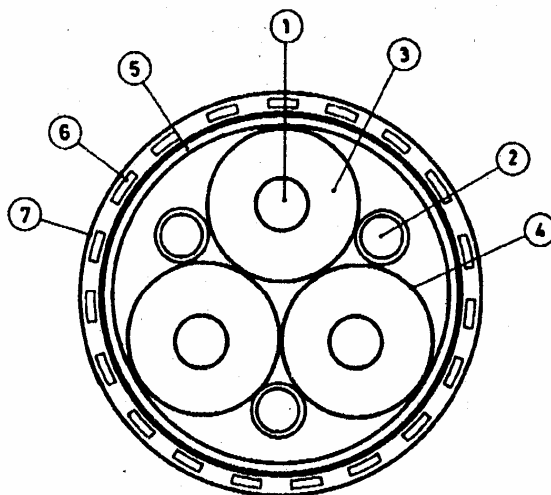
Sl. 5. 11. Šematski izgled trofaznog uljnog kabla
1 - PVC plašt; 2 - mehanička zaštita od čeličnih žica; 3 - trake za zaštitu od pritiska;
4 - Pb omotač; 5 - ispuna međuprostora; 6 - spiralna cev za ulje; 7 - ekran;
8 - izolacija (papir natopljen uljem); 9 - provodnik.



Sl. 5. 12. Šematski izgled uljnog kabla visokog pritiska
1 - provodnik; 2 - papirna izolacija impregnirana u viskoznom kompaundu;
3 - ekran žile; 4 - nemagnetna čelična ili Cu-žica; 5 - čelična cev;
6 - polietilenska antikorozijska zaštita; 7 - ulje pod pritiskom.

Uljni kablovi visokog pritiska (do oko 20 bar) se u SAD nazivaju "Oilstatik" kablovi. Kod ovog tipa kablova hidraulične deonice su znatno duže (oko 10 km) nego kod kablova sa niskim pritiskom ulja. Pouzdanost ovih kablova je vrlo visoka, jer su zaštićeni čeličnom cevi i na taj način su gotovo izbegnuta mehanička oštećenja (sl. 5. 12.).

Kod kablova sa unutrašnjim pritiskom gasa koristi se azot (oko 15 bar). Konstrukcija ovog kabla može biti i jednožilna, gde gas prolazi kroz šupljinu u provodniku ili kroz međuprostor metalnog omotača i izolacije.



Sl. 5. 13. Šematski izgled gasnog kabla unutrašnjim pritiskom gasa
 1 - provodnik; 2 - kanal za gas; 3 - izolacija; 4 - ekran propustan za gas;
 5 - Pb omotač; 6 - čelične žice; 7 - antikoroziorna zaštita,

Kabl sa spoljašnjim pritiskom gasa (oko 15 bar) predstavlja kombinaciju trolovnog kabla i čelične cevi u koju je kabl uvučen. Gas nije izolacioni medijum. Pritisak gasa se prenosi na izolaciju kabla preko olovnog omotača koji se ponaša kao membrana.

Tab. 5.4. Pregled vrsta kablova i oblast primene

Kablovi sa metalnim omotačem			Kablovi u cevima		
Konstrukcija kabla	Uobičajen napon (kV)	Propisi	Konstrukcija kabla	Uobičajen napon (kV)	Propisi
Uljni kablovi					
Uljni kabl niskog pritiska	30 - 400	VDE 0256	Uljni kabl visokog pritiska	110 - 400	-
Gasni kablovi					
Kabl sa unutrašnjim pritiskom gasa (Al-omotač)	30 - 110	IEC 141-2 VDE 0258	Kabl sa unutrašnjim i kabl sa spoljašnjim pritiskom gasa	30 - 110	IEC 141-2 VDE 0258 IEC 141-3 VDE 0257

Kablovi sa prinudnim hlađenjem







Najčešći rashladni medijumi kod ovih kablova su voda i ulje. Voda poseduje, kao rashlađivač, odlične osobine (vidi tabelu 5.6.), ali postoje teškoće kod njene primene za direktno hlađenje provodnika. Kako je voda pod visokim pritiskom (nekoliko desetina bara) cevi su izložene eroziji.

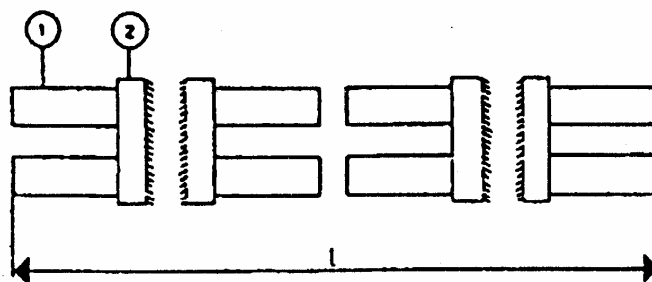
Tab. 5.5. Specifični toplotni kapacitet rashladnih medijuma (za 20°)

Rashladni medijum	Specifični toplotni kapacitet (Ws/lK)
Voda	4180
Ulje	1750
Vazduh (1bar)	1,3
Gas SF ₆ (6 bar)	28
Azot (15 bar)	12,5

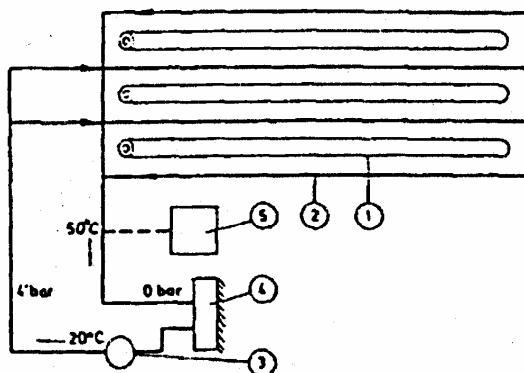
Kod dugačkih kablovskih vodova rashlađivanje se obavlja kaskadno, po deonicama.

Tab. 5.6. Načini prinudnog hlađenja kablova

Vrsta hlađenja	Skica načina hlađenja	Opis hlađenja
Indirektno hlađenje površine kabla		Rashladno sredstvo: voda, kablovi u jednom nivou.
		Rashladno sredstvo: voda, kablovi u poretku "deteline".
Direktno hlađenje površine kabla		Rashladno sredstvo: voda, otvoreno korito za vodu.
		Tri kablova u zajedničkoj cevi sa vodom
		Svaki kabl u svojoj cevi sa vodom
Direktno hlađenje provodnika kabla		Rashladno sredstvo: voda ili ulje



Sl. 5. 14. Kaskadno rashlađivanje kablovskog voda sa 4 sistema
1 - cevovod; 2 - rashladna stanica.



Sl. 5. 15. Šematski prikaz indirektnog hlađenja površine kablova

1 - kabl; 2 - rashladni cevovod od PE; 3 - pumpa;

4 - izmenjivač toplote; 5 - upravljački sistem.

Sistem hlađenja	Šematski prikaz sistema za hlađenje	Tipičan raspored kablova i cevovoda
Sa 4 cevovoda i 2 rashladne stanice	a) b)	
Sa 4 cevovoda i 1 rashladnom stanicom	c) d) e)	
Sa 3 cevovoda i 2 ili 1 rashladnom stanicom	f) g) h)	

Sl. 5. 16. Šematski prikaz sistema za indirektno hlađenje

1 - rashladna stanica; 2 - cevovod; 3 - kabl; 4 - napojno mesto.

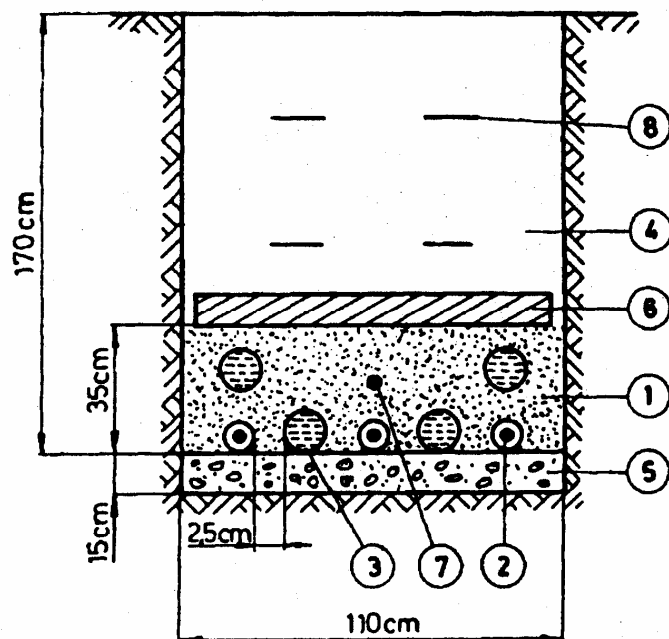
Kod indirektnog hlađenja kablova potrebno je između kabla i cevovoda ostvariti dobru toplotnu vezu kako bi se što veća količina toplote odvela sa kabla (sl. 5. 17.). Poseban problem predstavlja hlađenje kablovskih glava i spojnica. Hlađenje spojnica se može izvesti na dva načina:

- direktnim hlađenjem i
- indirektnim hlađenjem.

Hlađenje kablovskih glava se izvodi na tri načina:

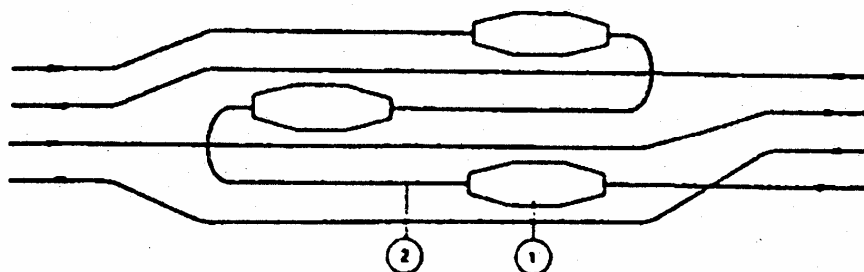
- cirkulacijom ulja,
- sa gasom SF₆ i
- spoljšnjim hlađenjem.

Pri prelasku mostova mora se preći na direktni sistem hlađenja ili na veći presek provodnika.



Sl. 5. 17. Rov kablova 380 kV sa rashladnim cevovodima (primer)

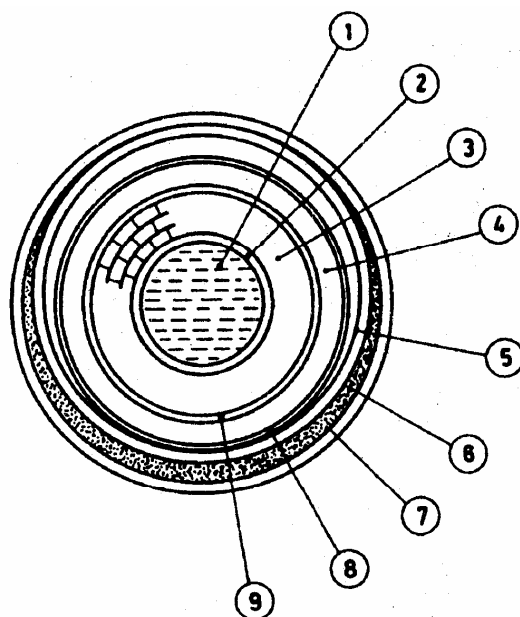
1 - "mršavi malter"; 2 - kabl; 3 - cevovod; 4 - obična ispuna rova; 5 - betonska ploča; 6 - zaštitna betonska ploča; 7 - optički kabl; 8 - upozoravajuća PVC traka.



Sl. 5. 18. Šema hlađenja kablovske spojnice

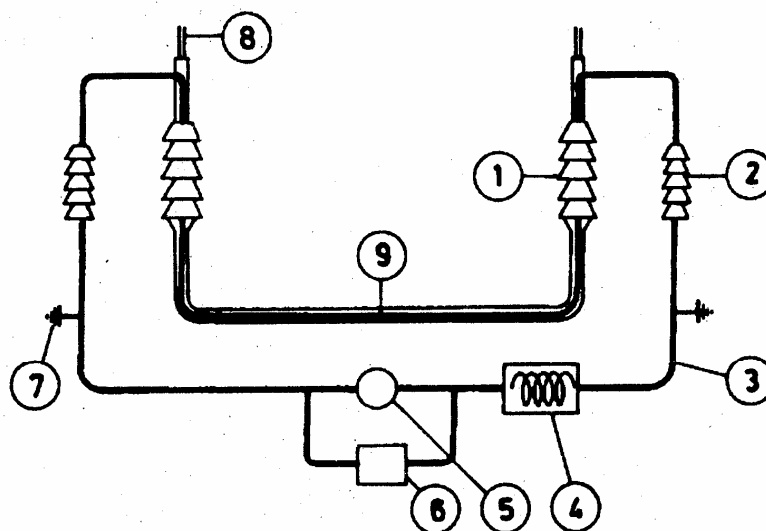
1 - kablovska spojnica; 2 - cevovod.

Prenosna snaga kabla sa direktnim hlađenjem provodnika može biti nekoliko puta veća no kod kablova sa prirodnim hlađenjem. Prenosna snaga se uvećava u odnosu na uljni kabl niskog pritiska kao odnos brojeva 1 : 2 : 3 : (5 do 8), gde se broj dva odnosi na indirektno, 3 na direktno, a 5 do 8 na kablove sa direktnim hlađenjem provodnika. U stvari to mnogo zavisi od dužine rashladne deonice, tj. od temperature rashladne vode.



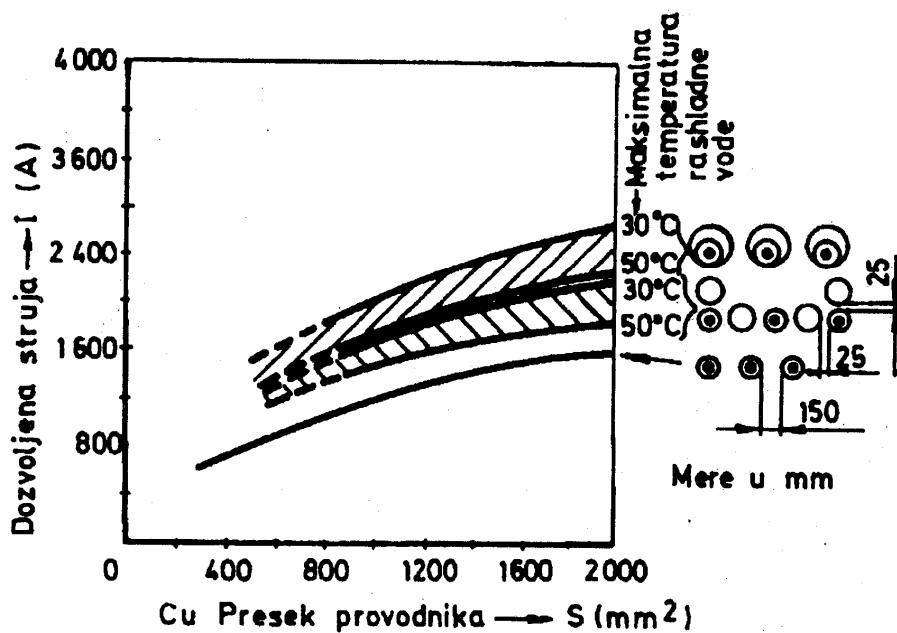
Sl. 5. 19. Šematski prikaz kabla sa unutrašnjim hlađenjem provodnika

- 1 - voda; 2 - cev od plemenitih čelika; 3 - provodnik; 4 - izolacija papir i ulje;
 5 - valoviti Al-plašt; 6 - antikorozijska zaštita; 7 - PVC omotač;
 8 - ekran izolacije; 9 - ekran (poluprovodne papirne trake).

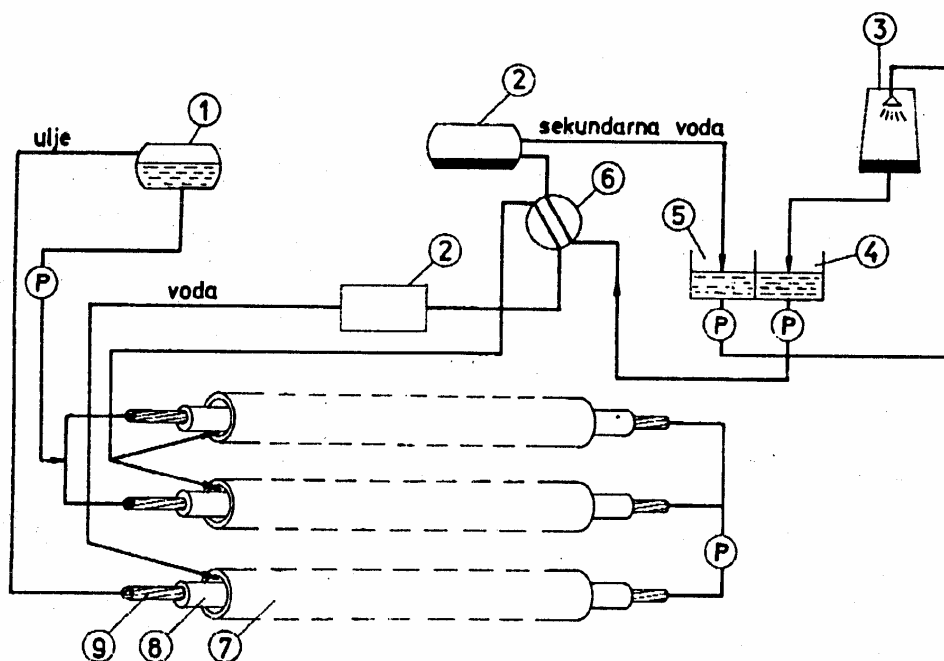


Sl. 5. 20. Šematski prikaz direktnog hlađenja provodnika kabla

- 1 - kablovska glava; 2 - električno odvajanje hidrauličnog od električnog sistema;
 3 - vodovodna cev; 4 - izmenjivač toplote; 5 - pumpa; 6 - dejonizator;
 7 - uzemljenje hidrauličke instalacije; 8 - električni priključak; 9 - kabl.



Sl. 5. 21. Strujno opterećenje kablova 110 kV (orijentaciono), hlađenil direktno i indirektno (vodom) u poređenju sa prirodno hlađenim kablom (sa transpozicijom omotača - "Crossbonding")



Sl. 5. 22. Primer hlađenja kabla uljem - vodom (podaci: 220/380 kV provodnik, 1200 mm², Cu, gubici ≈200 kW/m, prenosna snaga-1120 MVA)

- 1 - rezervoar za ulje; 2 - rezervoar za vodu; 3 - rashladni toranj; 4 - bazen rashladne vode; 5 - bazen tople vode; 6 - razmenjivač toplote; 7 - cev; 8 - kabl; 9 - šuplji provodnik; P - pumpa.

5.3.2. KABLOVI SA SINTETIČKOM IZOLACIJOM

Često se u stručnoj literaturi koristi i naziv kablovi sa čvrstom izolacijom i pod njim se podrazumevaju izolacije od veštačkih-sintetičkih materijala: PVC (polivinil-hlorid), PE (polietilen), XPE (umreženi polietilen), EPR (etilen-propilen) i sl.

U nemačkoj literaturi XPE se označava sa VPE (vernetze Polyethilen), a u engleskoj sa XLPE (cross linked Polyethylene).

Ovi kablovi u poređenju sa uljnim kablovima imaju sledeće prednosti:

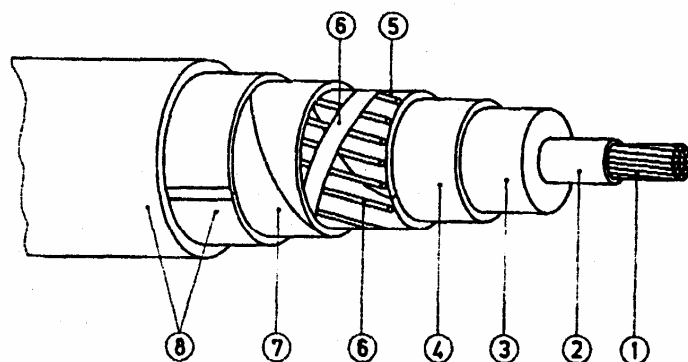
- manje dielektrične gubitke,
- nema potrebe za održavanjem,
- mogućnost primene prefabrikovanih kablovskih glava i spojnice,
- lako premošćenje velikih visinskih razlika na trasi,
- manji prečnik savijanja,
- manju struju punjenja (vidi 12.3.2. STRUJA PUNJENJA) i
- mogućnost prenosa energije na veća rastojanja.

Mane su im:

- nemaju mogućnost najave budućeg električnog kvara¹⁾ (kod uljnih kablova to postoji; padom pritiska ulja signalise se oštećeno mesto),
- nedovoljno potvrđen u praksi "životni vek" za više napone od 220 kV i
- lutanje u izboru optimalnog postupka montaže kabla, spojnice i glave.

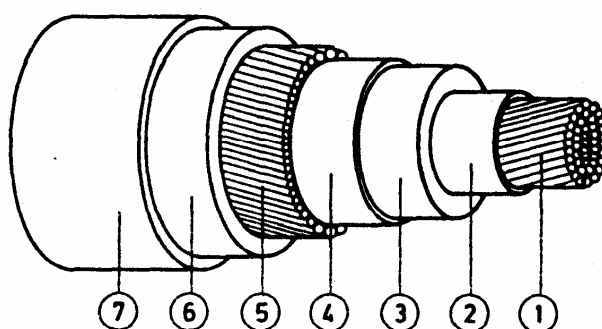
Jedan od osnovnih nedostataka PE i XPE izolacija je što su osetljivi na parcijalna pražnjenja (vidi 7.3.6. PARCIJALNA PRAŽNJENJA). EPR je manje podložan parcijalnim pražnjenjima, ali mu je tog znatno veći, te time i dielektrični gubici. Fabrika "Silec" - Francuska, koristi za napon 400 kV izolaciju LDPE (Low Density Polyethylene). Kako LDPE nije umrežen to je prisustvo vlage u njemu manji nego kod XPE izolacije. Na taj način su smanjene pojave "Water Trees" i parcijalnih pražnjenja.

¹⁾ Poslednjih godina se eksperimentiše sa tzv. sensorima za vlagu koji najavljuju prodor vlage pod spoljašnji plašt kabla. Eksperimentiše se takođe, koristeći optičke linije, sa merenjem temperature, mehaničkog naprezanja i sl.



Sl. 5.23. Savremena konstrukcija XPE kablova 110 kV

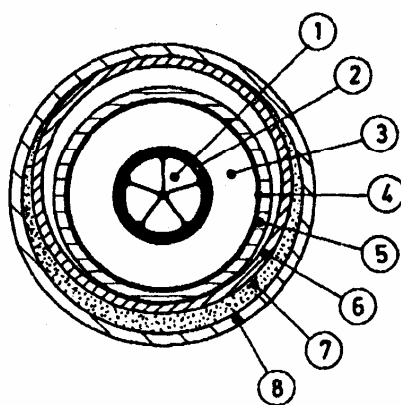
- 1 - provodnik; 2 - unutrašnji slaboprovodljivi sloj; 3 - izolacija XPE;
 4 - spoljašnji slaboprovodljivi sloj; 5 - bubreća traka; 6 - Cu električna zaštita;
 7 - bubreća traka; 8 - Al traka (sa kopolimerom) i PE - plašt



Sl. 5.24. Kabl 400 kV izolovan LDPE (za velike struje kratkog spoja)

- 1 - provodnik; 2 - unutrašnji slaboprovodljivi sloj; 3 - izolacija LDPE;
 4 - spoljašnji slaboprovodljivi sloj; 5 - oplet Al-žice; 6 - Pb plašt; 7 - spoljašnji plašt PE.

Razvoj i usavršavanje izolacije LDPE kablova 63 kV (1962. godine) do 500 kV (1985. godine) omogućili su povećanje jačine električnog polja od 4,5 kV/mm (za 63 kV), 10 kV/mm (za 220 kV), 13,5 kV/mm (za 400 kV) do 15,5 kV/mm (za 500 kV).



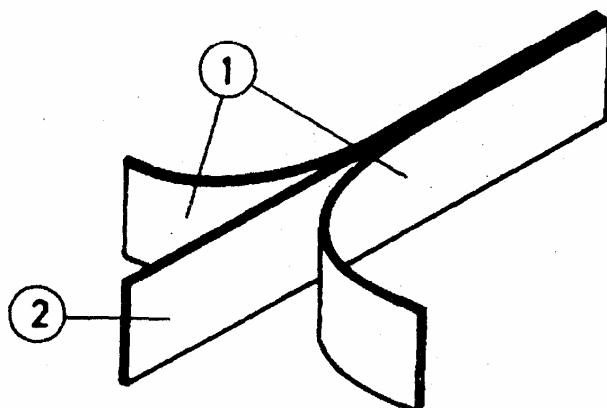
Sl. 5.25. Kabl 400 kV izolovan umreženim polietilenom

- 1 - bakarni provodnik; 2 - unutrašnji slaboprovodljivi sloj; 3 - izolacija (umreženi polietilen);
 4 - spoljašnji slaboprovodljivi sloj; 5 - provodni amortizujući (jastuk) sloj; 6 - valoviti Al-omotač;
 7 - koroziona zaštita; 8 - spoljašnji omotač.

Tab. 5.7. Tabela uporednih osobina kablova 110 kV

Osobina	Jedinica	Uljni	Gasni	PE	XPE
Max. radna temperatura	°C	85	85	70	90
Max. temperatura u nužnom pogonu	°C	110	110	90	130
Max. temperatura u kratkom spoju	°C	145	145	150	250
Dielektrična konstanta ϵ_r (20 °C)	-	3,3	3,5	2,3	2,3 - 2,4
Faktor dielektričnih gubitaka $\tan\delta$ (20 °C)	-	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Max. jačina električnog polja (20 °C)	kV/mm	8,7 - 7,7	8,8 - 8,1	6,9 - 5,3	6,9 - 5,3
Specifični toplotni otpor izolacije	Km/W	4,5	4,5	3,5	3,5
Zapreminski specifični otpor izolacije (20 °C)	Ωm	10^{13}	10^{13}	10^{16}	10^{16}

Poslednjih godina se eksperimentiše sa kombinovanim izolacijama i to u cilju da se smanje dielektrični gubici kako bi se prešlo na više napone od 500-600 kV. To se može postići kombinacijom traka od polipropilena i papira (PPLP). Dielektrična konstanta i gubici su znatno niži nego kod papira. Zahvaljujući tome i visokoj dielektričnoj čvrstoći o primeni ove slojevite izolacije može se razmišljati i kod napona viših od 1000 kV.



Sl. 5.26. PPLP izolacione trake (Polipropilen Laminated Paper)

1 - KRAFT - papir (traka); 2 - polipropilen traka.

5.3.3. CEVNI KABLOVI - SF₆

Izolacija ovog tipa cevni kablova je gas SF₆, koji je bez mirisa, negorljiv, neotrovan i inertan. Hemijski je vrlo stabilan, čak do 500 °C. U prisustvu vlage naglo gubi svoju visoku električnu čvrstoću. Deluje razorno na klasične izolacije (staklo, porculan, papir). Stoga se za držače, potporne izolatore, koriste izolatori od epoksidnih smola i sličnih materijala.

Sa konstruktivne tačke gledišta postoje dve vrste cevnih kablova SF₆:

- kruti (nesaviljivi) i
- savitljivi.

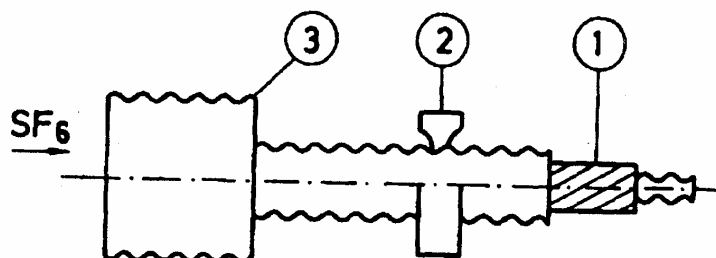
Nesaviljivi cevni kablovi proizvode se u jednofaznom i trofaznom izvođenju. Jednofazna konstrukcija dozvoljava primenu najviših napona. Poznate su konstrukcije koje prenose vrlo velike snage, čak oko 10 GVA. Nedostatak jednofaznih konstrukcija je: visoka cena, potreba za širokim koridorom, potreba za suzbijanjem gubitaka u cevima i td. Trofazne konstrukcije ne dozvoljavaju tako visoke napone kao jednofazne konstrukcije, ali su znatno jeftinije.

Savitljivi cevni kablovi su izrađeni da bi se mogli u većim dužinama polagati u zemlju. Provodnik ovih kablova je izrađen od pouzrenog aluminijumskog užeta u segmentnom obliku i postavljen u valovitu bakarnu cev. Moguće je da provodnik bude samo valovita aluminijumska cev ili više ovakvih cevi koncentrično postavljenih. Spoljašnja cev je takođe urađena u valovitoj formi obično od aluminijumske legure (Al-Mn) i zaštićena antikorozijskom zaštitom. Držači provodnika su u obliku konusa i postavljaju se obično na rastojanju od oko 0,5 m dok je kod nesaviljivih cevi to rastojanje višestruko veće.

Dužina savitljivih kablova zavisi od potrebnog poluprečnika krivine i moguće veličine bubnja.

Poznate su dužine ovih kablova i do oko 200 m. Prednosti ovih kablova su u sledećem: lako se polažu veće dužine, nepotrebni su dilatacioni elementi, lako zaobilaženje prepreka u zemljištu, laka montaža i dr.

Strujna opteretljivost ovih kablova je ograničena ne samo zbog odvođenja toplote, već i zbog dozvoljene temperature držača - izolatora. Ekonomičnost cevnih kablova je visoka, naročito za vrlo visoke napone (1150 kV).



Sl. 5.27. Saviljivi gasni kabl

1 - provodnik; 2 - držač - izolator; 3 - spoljašnja cev

SF₆ kablovi se mogu proizvoditi i za preseke provodnika čak do 10.000 mm². U stvari, povećanje preseka provodnika ima smisla, jer prateći gubici u dielektriku ni izbliza ne rastu tom brzinom. Kod klasičnih kablova granice u preseku provodnika su oko 2000 mm². Posle tog preseka dozvoljeno strujno opterećenje, na primer kod napona 380 kV, više ne raste. Kod napona 110 kV ono će rasti ali znatno sporije no za niže preseke, tako da isplativost tih konstrukcija postaje mala. Ako bi se uzelo loše dejstvo isušenog sloja zemljišta oko kabla može se desiti da čak opterećenje za veće preseke počinje da opada. Kod SF₆ kablova, zahvaljujući relativno velikim površinama unutrašnje (provodnika) i spoljašnje cevi, odvođenje toplote je mnogo efikasnije. Prenos toplote sa provodnika na cev se obavlja dobro, iako praktično ne postoji prenos toplote kroz gas kondukcijom (postoji konvekcija i radijacija). Toplotni otpor zemljišta i mogućnost pojave isušivanja zemljišta svedena su na mnogo manju meru. Zbog smanjenja gubitaka u cevima i ovde se primenjuje tzv. "Crossbonding".

Dok se pogonska jačina električnog polja kod uljnih kablova kreće od 8 do 18 kV/mm, za gasove je znatno manja, a za SF₆ iznosi svega 3 do 5 kV/mm. Stoga je prečnik SF₆ kablova nekoliko puta veći no kod uljnih kablova. Optimalni odnos unutrašnjeg poluprečnika cevi i spoljašnjeg poluprečnika provodnika je 2,7.

SF₆ kablovi imaju veći iduktivitet od konvencionalnih kablova, dok im je kapacitet manji. Shodno tome i talasna impedansa im je veća:

$$Z_T = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Prirodna snaga SF₆ kablova je manja, jer je ona obrnuto srazmerna talasnom otporu:

$$P_{PR} = \frac{U^2}{Z_T} = U^2 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Kod konvencionalnih kablova granična snaga (temperaturno ograničena) je niža od prirodne snage, te se oni ponašaju kapacitativno. SF₆ kablovi se u stvari sa gledišta potrebe za prividnom snagom nalaze se između konvencionalnih kablova i nadzemnih vodova.

Tab. 5.8. Karakteristike cevnih kablova 123 - 420 kV

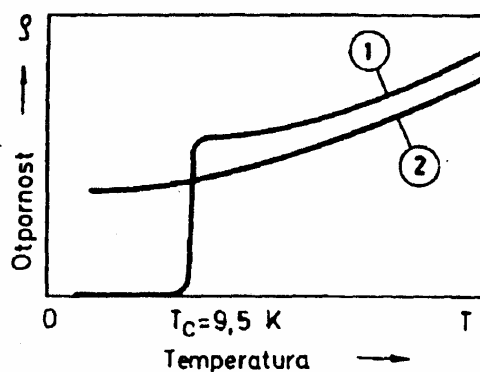
PROVODNIK		Nominalni napon (kV)		
		123	245	420
Spoljašnji prečnik	mm	80	120	150
Debljina zida provodnika	mm	7	8	8
CEV (AlMg ₃)				
Unutrašnji prečnik	mm	220	330	450
Debljina zida cevi	mm	5	8	8
GAS SF ₆				
Pritisak	bar	2,5	3,5	3,5
NOMINALNA STRUJA				
Nadzemno položen	A	2000	3000	4600
Podzemno položen	A	1000	1200	1200

5.3.4. KRIOGENSKI KABLOVI

U kriogenske kablove se ubrajaju kablovi:

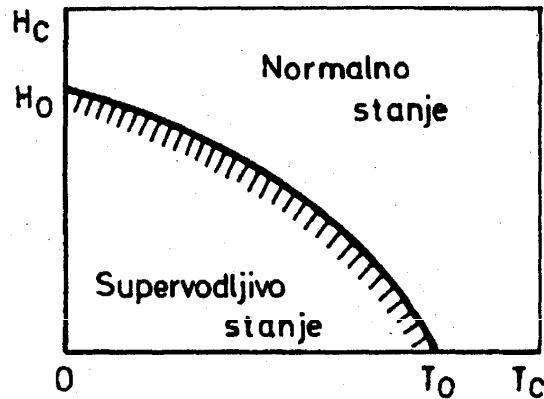
- superprovodni i
- krio-rezistivni.

W. Meisner i R. Ochsenfeld utvrdili su eksperimentalno 1933. godine da superprovodnik kada se izloži magnetnom polju a zatim ohladi na određenu temperaturu (tzv. kritična temperatura) istiskuje iz sebe magnetno polje. Od tada je nađeno preko 40 superprovodnih elemenata čija je kritična temperatura ispod 10 K. Međutim, kada su u pitanju legure i spojevi do sada je nađeno preko 1000 materijala koji imaju osobine superprovodljivosti. Naročito je karakterističan spoj niobijum - kalaj (Nb₃Sn) čija je kritična temperatura relativno visoka: 18,3 K. Legura germanijuma ima kritičnu temperaturu 20,7 K. Među superprovodnicima ne nalaze se metali koji su na običnim temperaturama dobri provodnici. Pri snižavanju temperature otpor superprovodnika opada postepeno da bi pri jednoj određenoj temperaturi naglo opao, skoro na nulu. Ta temperatura se naziva kritičnom.



Sl. 5.28 Specifični otpor u zavisnosti od temperature
1 - niobijum; 2 - bakar; T_c - kritična temperatura za niobijum

Superprovodnici se zavisno od ponašanja u magnetnom polju svrstavaju u dve vrste: I i II. Superprovodnici I vrste obuhvataju neke metale i više legura i ponašaju se kao diamagnetici do kritične jačine magnetnog polja, H_0 , kada im se vraća normalna otpornost. Ovo stanje superprovodljivosti opstaje u provodniku u vrlo tankom sloju na njegovoj površini. Tada ne postoji magnetno polje unutar kola provodnika (Meisner-ov efekat). Sa porastom jačine magnetnog polja snižava se kritična temperatura.



Sl. 5.29. Zavisnost superprovodljivosti od kritične temperature T_c i jačine magnetnog polja H_c

Superprovodnici II vrste imaju sasvim drugačije osobine. Oni se u jednom opsegu magnetnog polja ponašaju kao superprovodnici I vrste. Iznad tog magnetnog polja magnetni fluks počinje da ulazi u provodnik ali ne nestaje superprovodnost. Ona će nestati pri nekom, još većem, magnetnom fluksu. U ovoj međufazi u provodniku jednovremeno postoje superprovodnost i normalna provodnost. Superprovodnici II vrste imaju višu kritičnu temperaturu i mnogo više kritično magnetno polje, a time i veći kapacitet prenosa - veću struju.

U I vrstu superprovodnika spadaju: Pb, Ta, Hg, Sn... U II vrstu niobijum i njegove legure.

Međutim, superprovodnici I vrste nisu pogodni za praktičnu primenu, jer im je magnetna indukcija niska, do najviše 100 mT - dok kod superprovodnika II vrste može biti veća i 1000 puta.

Superprovodni kablovi

Prvi superprovodni kabl napona 33 kV i dužine svega 3 m izgrađen je 1967. godine u Engleskoj. U Nemačkoj je 1977. godine prvi put izgrađen superprovodni jednofazni kabl 110 kV, 10 kA dužine 35 m.

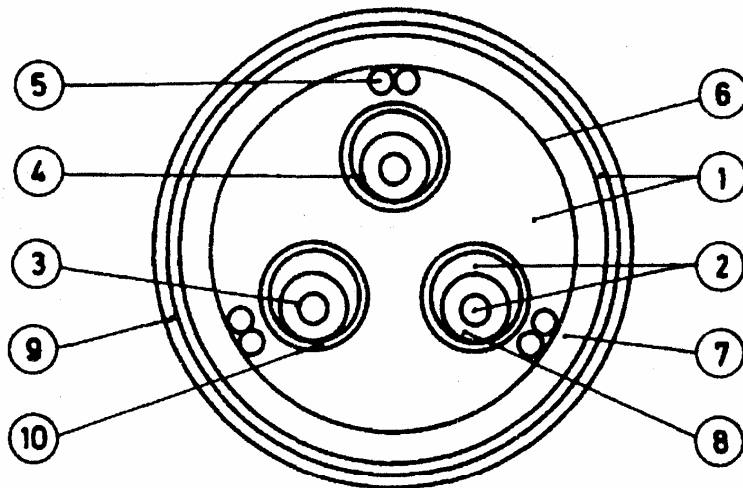
U SAD je izgrađen prototip superprovodnog kabla za naizmeničnu struju i položen u dužini 69 km od nuklearnog kompleksa do jedne podstanice. Kabl je namenjen za prenos snage 4,8 GW, za napon 345 kV i trajnu struju 8 kA. Cenu ovog kabla naročito podiže sistem za hlađenje. Takođe se i u Francuskoj radi na razvoju ovih kablova (125 kV, 3GW). U Japanu je načinjen znatan napredak u rešavanju tehnoloških problema konstrukcije ovih tipova kablova. Tako se predlaže konstrukcija kabla za jednosmernu struju napona 100 kV i struju 50 kA. Provodnik od NbTi se sastoji od 17 slojeva debljine $7\mu\text{m}$ i bakarne tube debljine 7 mm. Izolacija je od poliamidnih traka. Spoljašnji provodnik čini 12 slojeva NbTi traka postavljenih na cilindar od bakra. Temperatura helijuma je 5 K pri 8 atm.

Međutim, za komercijalnu proizvodnju postoji više problema koje treba optimalno rešiti, na primer: rashladni sistem, provodnik, električnu i termičku izolaciju i sl. Jedan od osnovnih problema je kako rashladiti provodnik a u isto vreme ga toplotno izolovati od uticaja okoline. Ovo toplotno izolovanje kabla jedino je uspešno izvodljivo primenom vakuuma.

Osnovni problem tehničke i ekonomske prirode kod superprovodnih kablova je toplotno izolovanje kabla i sistem za hlađenje. U stvari, treba sprečiti prenošenje toplote sa sredine - zemljišta (oko 300 K) na kabl da bi se kabl održavao na dovoljno niskoj temperaturi od 4 do 80 K. U tu svrhu u spoljašnjem koncentričnom sloju kabla uspostavljen je vakuum, jer je on bolja toplotna izolacija nego izolaciona ispuna. Ali ni on ne predstavlja idealnu izolaciju jer se toplota prenosi i dalje zračenjem. Naročito je važno odovođenje toplote tj. gubitaka kod kablova naizmenične struje. Dok kod kablova za jednosmernu struju nema magnetnih gubitaka, kod naizmeničnih kablova postoje gubici usled histerezisa koji su naročito visoki kod superprovodnika II vrste i to u oblasti kad se provodnik ne ponaša kao čist superprovodnik. Magnetno polje može se držati na relativno niskom nivou ako se oko svakog provodnika postavi superprovodni ekran koji ima svrhu da suzbija ovo polje. Ovaj superprovodnik utiče i da se pri velikim nazivnim strujama smanje gubici usled vrtložnih struja. Zbog svoje krtosti superprovodni materijali se ne koriste samostalno već se nanose na bakar ili aluminijum.

Razlikuje se nekoliko tipova superprovodnih kablova:

- kablovi u nesavitljivim cevima,
- kablovi u polusavijenim cevima i
- savitljivi kablovi.



Sl. 5.30. Šematski presek superprovodnog kabla

1 - visoki vakuum; 2 - helijum; 3 - superprovodnik; 4 - superprovodnik - ekran; 5 - tečni azot;
6 - ekran za toplotno zračenje; 7 - superizolacija; 8 - dielektrik; 9 - spoljašnja cev;
10 - cevi za helijum.

Superprovodni kablovi za jednosmernu struju u poređenju sa naizmeničnim imaju sledeće prednosti:

- nema dielektričnih gubitaka,
- manji ukupni gubici (manja snaga hlađenja),
- nema potrebe za superprovodnim ekranom provodnika i
- jednostavnija konstrukcija.

U pogonu superprovodnih kablova ističu se sledeći problemi:

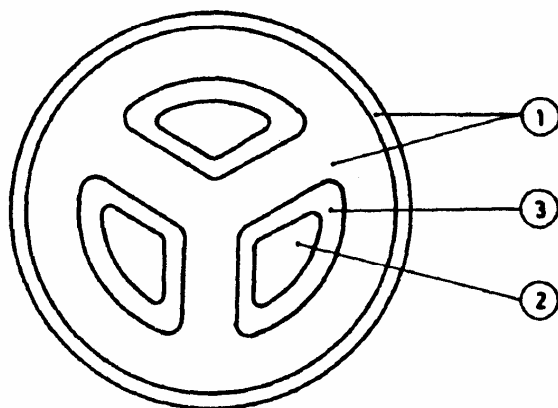
- nagli porast temperature izazvan povećanjem opterećenja ili pak kratkom vezom u samom kablju, može dovesti do sagorevanja celog kabla,
- rashladni sistem mora da je stalno u pogonu, bez obzira da li je kabl opterećen ili je u praznom hodu i
- vreme ispada, tj. tzv. vreme neraspoloživosti pogona kabla može iznositi nekoliko meseci zbog novog rashlađivanja kabla, te se nameće pitanje pouzdanosti napajanja, tj. rezerviranje napajanja.

Krio-rezistivni kablovi

Tehnički problemi kod krio-rezistivnih kablova su vrlo slični superprovodnim. Za provodnik se kod ovih kablova koristi uglavnom aluminijum velike čistoće. Na niskim temperaturama, na primer na 20 K, što odgovara mogućnostima tečnog vodonika, električna otpornost aluminijum je manja oko 500 puta. Ako se za rashlađivanje koristi azot (77 K) može se postići svega 6-7 puta niža električna otpornost.

Međutim, tada je utrošak energije za rashlađivanje znatno manji, čak 50 do 100 puta. Niža cena, sigurnost i odlična izolaciona svojstva čine da se za ovaj tip kablova kao rashlađivač koristi azot. Zbog niskog otpora dolazi do jakog izražaja "skin" efekat i efekat blizine te i do slabog prodiranja struje u dubinu provodnika. Da bi se smanjili ovi gubici u provodniku pojedine žice provodnika se prostorno transponuju i međusobno izoluju. Provodnik može biti u obliku cevi.

Ispitivanja su pokazala da je moguć najveći presek provodnika 2500 mm². Moguća snaga prenosa sa azotnim hlađenjem je oko 5 GVA.



Sl. 5.31. Šematski prikaz krio-rezistivnog kabla
1 - vakuum; 2 - tečni azot; 3 - Al provodnik

5.3.5. KABLOVI ZA JEDNOSMERNU STRUJU

Prvi komercijalni kabl za jednosmernu struju napona 200 kV, u dužini 115 km pušten je u pogon u Nemačkoj, u Berlinu, za vreme II svetstog rata. Sada je u svetu poznato više visokonaponskih kablovskih vodova za jednosmernu struju velike dužine.

U poređenju za naizmjeničnim kablovima, kablovi za jednosmernu struju imaju sledeće prednosti:

1. Dielektrični gubici koji su inače vrlo značajni za visokonaponske kablove naizmjenične struje ovde se mogu zanemariti. U stvari, postoje vrlo mali gubici usled struje odvoda.
2. Nema potrebe za specijalnim konstrukcijama provodnika pošto nema tzv. "skin" efekta i efekta blizine.
3. Gubici u metalnom omotaču su vrlo mali, a prouzrokovani su strujama odvoda i promenama jednosmerne struje. Stoga nije potrebna transpozicija metalnih omotača kablova.
4. Prenosna snaga za isti presek provodnika i debljinu izolacije može biti čak tri puta veća od prenosne snage kabla naizmjenične struje.

5. U električnom pogledu izloženi su manjem naprezanju, jer je ono prouzrokovano električnom provodnošću dielektrika za razliku od naizmjeničnih kablova kod kojih je ono uslovljeno kapacitivnošću.
6. Znatno je smanjena opasnost od jonizacije uključka, tj. tzv. parcijalnih pražnjenja, posebno opasnih kod kablova sa sintetičkom čvrstom izolacijom.
7. praktično je isključen uticaj na telekomunikacione vodove.
8. Kablovi za jednosmernu struju su mnogo lakši zbog smanjenja debljine izolacije, a time i jeftiniji.
9. Kada je u pitanju više kablova, a za istu prenosnu snagu, potrebni su znatno uži rovovi za kablove jednosmerne struje.

Međutim, veliki nedostatak ovih kablova je što na oba kraja moraju biti priključeni na pretvaračka postrojenja.

Zbog prirode jednosmerne struje, tj. njene nepromenjene vrednosti tokom vremena, kod jednosmernih kablova se ne javlja kapacitivnost. Kod jednosmernih kablova u stacionarnom stanju raspodela napona u izolaciji zavisi od provodnosti izolacije.

Razlikuju se u ovom slučaju dva stanja:

- kabl neopterećen i
- kabl opterećen.

Kada je kabl strujno neopterećen onda je otpornost u izolaciji kabla stalna. Kod strujno opterećenog kabla toplota se sa provodnika kabla prostire preko izolacije kabla na okolno zemljište. Pri tom procesu najzagrejaniji su delovi izolacije uz provodnik, odnosno temperatura opada od provodnika ka metalnom omotaču kabla. Električna provodnost konvencionalnih izolacija zavisi od temperature i to tako da raste sa porastom temperature. Zbog ovog naprezanja izolacije, tj. električno polje je manje uz provodnik nego uz metalni omotač kabla, odnosno ekran.

Za impregnisani papir provodnost izolacije zavisi eksponencijalno samo od temperature. Međutim, provodnost polietilena ne raste samo sa porastom temperature već i sa porastom jačine električnog polja.

Proračuni bazirani na ovoj zavisnosti pokazuju da jačina električnog polja kod metalnog omotača može biti 2 i više puta veća nego kod provodnika.

Kablovi za jednosmernu struju se sasvim različito ponašaju od naizmjeničnih sa gledišta električnog proboja. Kod izolacije od impregnisanog papira je utvrđeno da se električna čvrstoća kreće od 100 kV/mm do 120 kV/mm i to bez obzira na trajanje naprezanja.

Kod uljnih kablova jednosmerni probojni napon je trostruko veći nego kod naizmjeničnih kablova iste konstrukcije. Shodno tome dva uljna kabla jednosmerne struje mogu preneti tri puta veću snagu nego tri naizmjenična kabla.

Toplotna provodnost ulja je veća od impregnisanog papira, pa je i naprezanje ulja manje. Električno naprezanje izolacije papir-ulje se tako raspodeljuje da veći deo naprezanja otpada na impregnisani papir koji ima veću električnu čvrstoću. Kod naizmjeničnog napona situacija je upravo obrnuta pa se tako objašnjava zašto je probojni napon kod jednosmernih kablova viši.

Uticaj parcijanih pražnjenja nije tako ozbiljan kao kod naizmjeničnih kablova. Kod uljnih kablova jednosmerne struje radna jačina električnog polja je do 40 kV/mm, dok je kod gasnih kablova zbog uticaja jonizacije gasa znatno niža.

Za prenos jednosmerne struje koriste se uglavnom četiri vrste kablova:

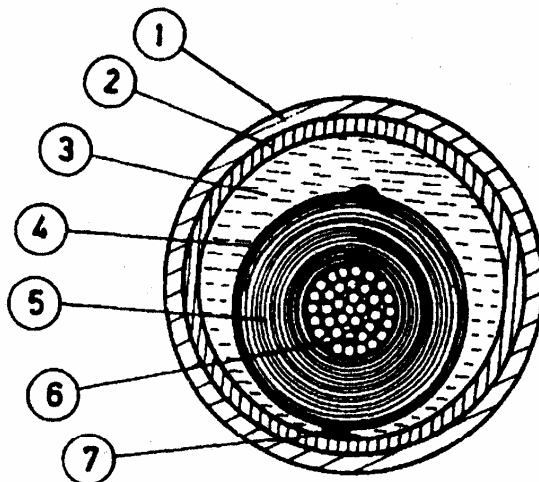
- kabl izolovan impregnisanim papirom,
- cevni kabl,
- uljni kabl i
- gasni kabl.

U Japanu je primenjen kabl za jednosmerni prenos, izolovan umreženim polietilenom napona 250 kV. Međutim, u pogonu je sa njim bilo znatnih teškoća i problema. Umreženi polietilen ima vrlo visoki otpor izolacije, te eventualno postojanje uključaka u izolaciji izaziva naglo povećanje naprezanja izolacije. Inače se ne može isključiti perspektivno korišćenje ovog tipa kabla zbog jednostavne montaže i mogućih velikih dužina što je bitno za podvodno polaganje.

Ispitivanja su pokazala da se struja odvoda kroz izolaciju menja sa temperaturom i jačinom električnog polja i da se ustaljuje naročito pri ambijentnim temperaturama za više dana, čak i nedelja.

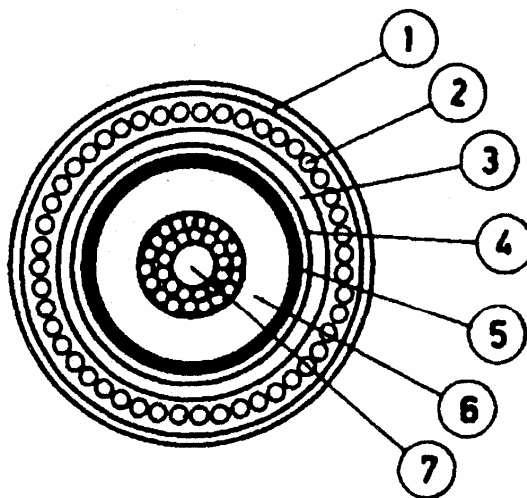
Kablovi izolovani impregnisanim papirom koriste se za znatno više napone, do oko 300 kV, zbog ograničenja u debljini izolacije. Za napon 250 kV u bipolarnom sistemu, preseka provodnika 1000 mm², što predstavlja najveći presek, prenosna snaga je 600 MW. Naprezanje izolacije je ograničeno na jačinu električnog polja od 25 - 27 kV/mm.

Uljni kablovi su takođe upotrebljivi za podvodna polaganja. Najveći napon im je 759 kV a prenosna snaga 3 GW. Nominalno naprezanje ovih kablova kreće se do 40 kV/mm. Problem kod ovih kablova je podvodno premoščavanje većih dužina zbog potrebe primene uljnih stanica. Uvođenjem sintetičkog impregnanta niskog viskoziteta i primenom pumpnih stanica visokog kapaciteta uspešno se može prevazići ograničenje u dužini (80 km) podvodnog polaganja kabla.



Sl. 5.32. Cevni kabl jednosmerne struje

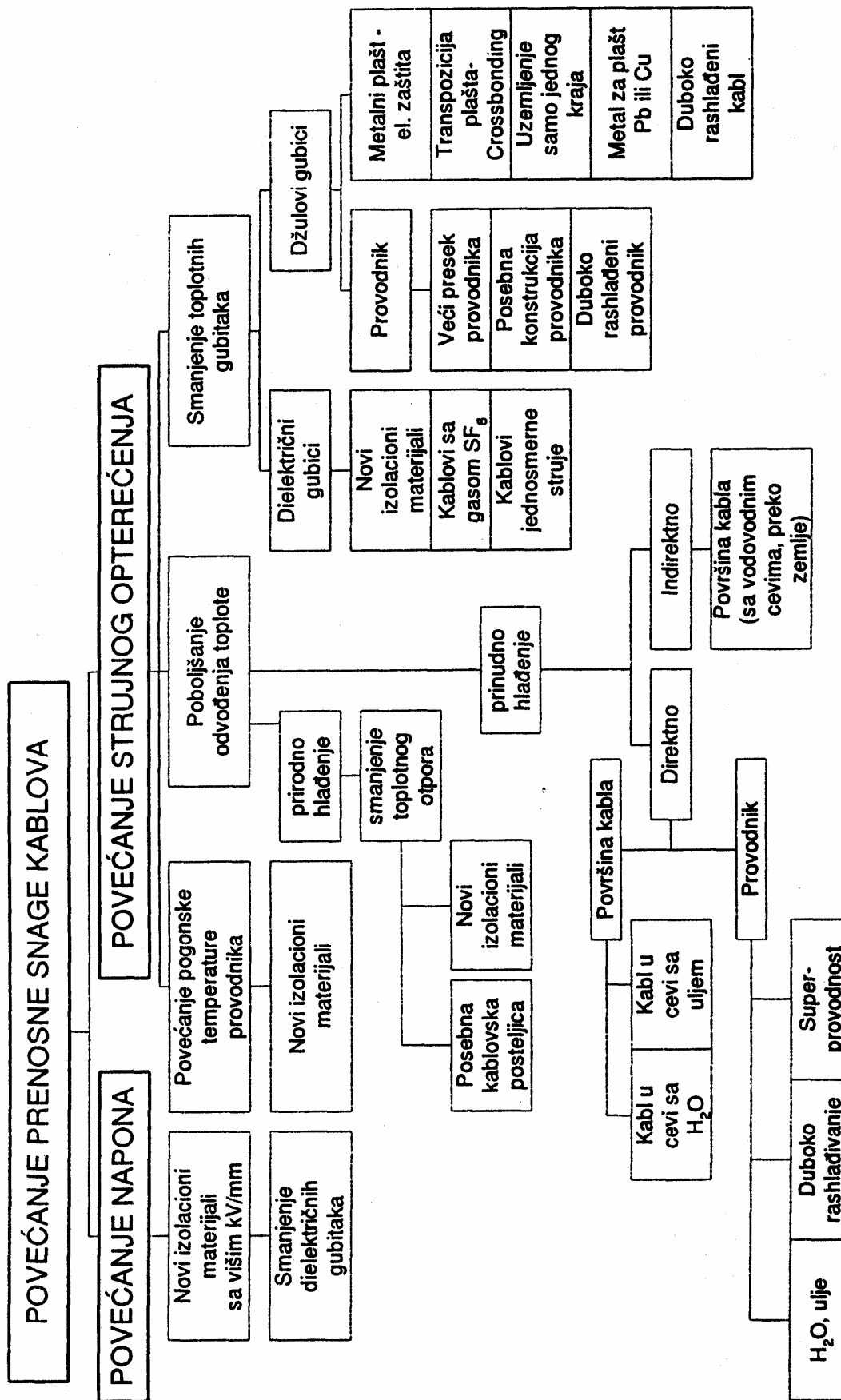
1 - antikorozijska zaštita; 2 - čelična cev; 3 - ulje pod pritiskom;
4 - ekran i perforirana bakarna traka; 5 - papir; 6 - provodnik; 7 - klizač za zaštitu kabla;



Sl. 5.33. Gasni kabl jednosmerne struje

1 - anti korozijska zaštita; 2 - mehanička zaštita od čeličnih žica; 3 - međusloj; 4 - ojačanje;
5 - legura olova; 6 - impregnirani papir; 7 - gas;

U tab. 5.9. Prikazani su načini povećanja prenosne snage kablova.



Tab. 5.9. Povećanje prenosne snage kablova

5.4. EKONOMIČNOST KABLOVA

Ekonomičnost kablova se izražava cenom jednog kilometra dužine kablovskog voda, za jednu godinu, po jediničnoj snazi prenosa (1 MVA). Na taj način u proračun specifične cene kablovskog voda ulazi: kabl, građevinski radovi, polaganje kablova, montaža spojnika, glava i pomoćnih uređaja, gubici u kablovskom vodi i pomoćnim uređajima, broj pogonskih časova kablova u jednoj godini, anuiteti itd.

Za naponski nivo 110 kV do oko 200 MVA najekonomičniji su uljni kablovi niskog pritiska. Za snage od 200 MVA pa do 2 GVA najekonomičniji su kablovi sa direktnim hlađenjem provodnika vodom. Kablovi izolovani gasom SF₆ pokazuju visoku ekonomičnost, a posebno za napon 380 kV. Kablovi sa direktnim hlađenjem površine vodom pogodni su za snage 400 - 500 MVA. Super provodni kablovi su najekonomičniji za snage od 2 do 5 GVA.

Tab. 5.10. Vrednovanje visokonaponskih kablova

Tip kablova	Mogućnost prenosa velikih snaga	Mogućnost komercijalne proizvodnje	Tehnologija izrade kablova, glava i spojnika	Širina trase kablova	Vreme stavljanja u pogon	Cena prenosa snage
Uljni kabl, prirodno hlađen	-	+	+	-	+	-
Kabl sa indirektnim spoljašnjim hlađenjem	-	+	+	-	+	-
Kabl sa direktnim spoljašnjim hlađenjem	+	+	-	+	+	+
Kabl sa direktnim hlađenjem provodnika	+	+	+	+	+	+
Gasni kablovi sa SF ₆	+	+	+	-	+	+
Kriorezistivni kablovi	+	-	-	+	-	-
Super-provodni kablovi	+	-	-	+	-	+

(+) - pozitivno vrednovanje,
 (-) - negativno vrednovanje.

5.5. KABLOVI POSEBNE NAMENE

5.5.1. PODVODNI KABLOVI

Pod pojmom "podvodni kablovi" podrazumevaju se kablovi koji su predviđeni za polaganje u reke, jezera, kanale i mora. Ovi kablovi su izloženi, u poređenju sa kablovima za polaganje u zemlju, sledećim uticajima:

- velikim mehaničkim naprezanjima i
- uticaju vode (boljem hlađenju).

Pri polaganju na veće dubine moraju izdržati velike aksijalne sile. Kada su položeni mogu biti ugroženi jakim strujanjima vode, kamenitim dnom po kome se kabl tare, plovećim brodovima, alatima i mrežama za lov ribe, lengerima i sl.

Da bi se bar donekle ovi uticaji predupredili kablovi se zaštićuju sa jednim ili dva sloja čeličnih žica ili traka. Ako kablovi nisu posebnu ugroženi polažu se na dno reka, mora i sl. Za teže okolnosti kablovi se ukopavaju direktno u dno ili se pak polažu u cevi.

Od prodora vode kablovi se obično štite olovnim plaštom.

Veća rastojanja se sa kablovima naizmeničnog napona ne premošćuju, jer im je prenosna snaga znatno umanjena zbog velike reaktivne snage kabla, tj. tzv. struje punjenja:

$$I_p = U \cdot c_{jp} \cdot \omega \cdot 10^{-3} \quad (\text{A/km})$$

gde je:

c_{jp} - jedinični pogonski kapacitet ($\mu\text{F/km}$),

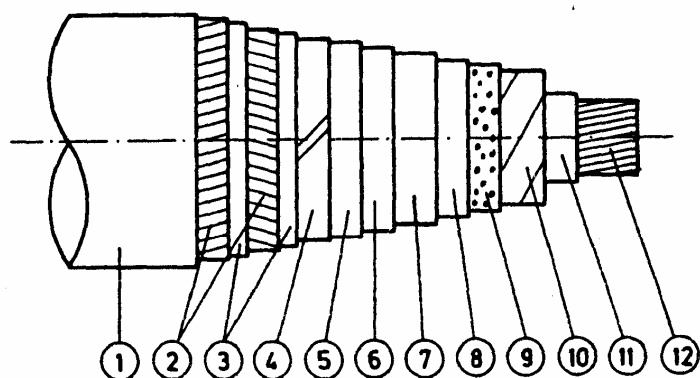
U_0 - fazni napon (kV),

$\omega = 2\pi f$, f - učestanost.

Nekorisna, reaktivna snaga kabla je za kabl dužine l :

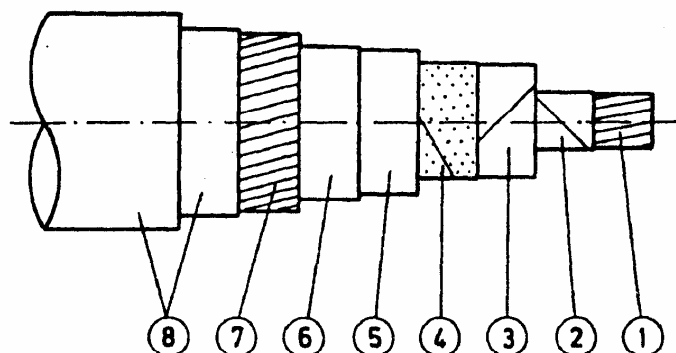
$$Q = U^2 \cdot c_{jp} \cdot l \cdot \omega \cdot 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$

Da bi se izbegao uticaj kapaciteta kabla koriste se kablovi jednosmerne struje.



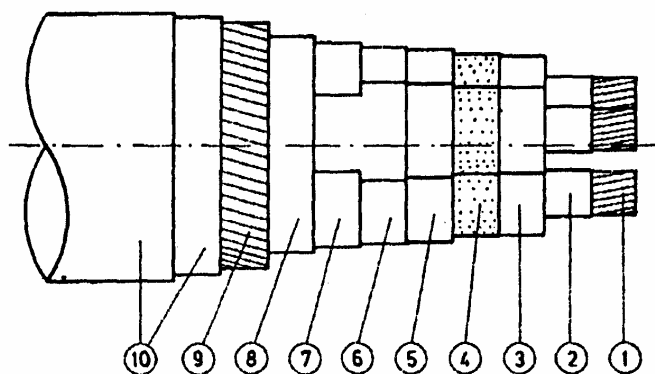
Sl. 5.34. Podmorski kabl jednosmernog napona ± 250 kV, 800 mm^2 , Cu
(premošćenje Skagerrak-a)

- 1 - antikoroziona zaštita; 2 - čelične žice; 3 - pamučna traka; 4 - pocinkovana čelična traka;
5 - pamučna traka; 6 - PVC plašt; 7 - olovni plašt; 8 - traka; 9 - metalizirana traka-ekran;
10 - impregnisani papir u kompaundu; 11 - ekran; 12 - provodnik.



Sl. 5.35. Jednožilni papirni kabl za podvodno (mora i reke)
i vertikalno polaganje NPHO 36, 20/35 kV

- 1 Cu provodnik; 2 - ekran; 3 - izolacija, impregnisani papir u polučvrstom kompaundu;
4 - perforirani metalizirani ekran; 5 - Pb plašt; 6 - termoplastične trake i juta impregnisana
bitumenskom masom; 7 - žice od Al legure; 8 - dva sloja impregnisane jute sa premazima od
bitumenske mase.



Sl. 5.36. Trožilni papirni kabl za podvodno (reke i mora) i vertikalno
polaganje NPZD 23, 20/35 kV

- 1 - provodnik; 2 - ekran; 3 - izolacija: impregnisani papir u polučvrstom kompaundu;
4 - perforirani metalizirani ekran; 5 - Pb plašt; 6 - termoplastične trake; 7 - međuprostor
ispunjen impregnisanom jutom; 8 - impregnisana juta bitumenskom masom; 9 - okrugle
pocinkovane žice; 10 - dva sloja impregnisane jute sa premazom od bitumenske mase.

5.5.2. RUDARSKI KABLOVI

U rudnicima sa podzemnom eksploatacijom vladaju posebni uslovi, jer u njima postoji zemni gas i ugljena prašina, koji mogu dovesti do eksplozije i požara. Zbog toga su rudarski kablovi koji se nalaze u pomenutim uslovima tako konstruisani da se eventualni kratki spoj, tj. električna varnica ograniči na unutrašnjost kabla. U tom cilju žile kabla imaju koncentričnu električnu zaštitu.

Moguće su sledeće zaštite:

- jedan zaštitni provodnik postavljen koncentrično preko svih žila,
- zaštitni provodnik postavljen koncentrično preko svake žile,
- zaštitni provodnik postavljen jednačito između faznih provodnika i
- zaštitni provodnik postavljen u sredini faznih provodnika.

Rudarski kablovi za napajanje pokretnih uređaja moraju biti savitljivi i pri niskim temperaturama što iziskuje posebne materijale za izolaciju i plaštove. Za rudnike sa podzemnom eksploatacijom ugroženim od požara i eksplozije janskog gasa i ugljene prašine za napajanje višenaponskih prenosnih transformatora koriste se kablovi sa izolacijom od gume na osnovu etilen-propilena. Takav je tip kabla na primer:

$E_p N64$ 3×25/10/6 mm² 3,6/6 kV

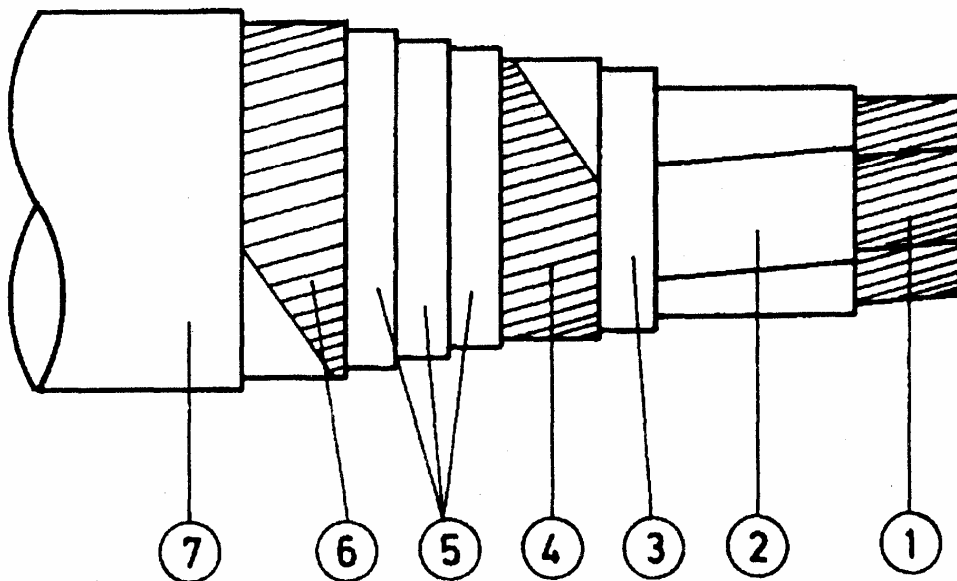
sa provodnicima preseka 25 mm², Cu, sa slaboprovodljivim slojem preko provodnika, izolacijom od gume na osnovu etilen-propilena, unutrašnjim plaštom od gume sa koncentričnom zaštitom (10 mm², Cu), i komandnim provodnikom (6 mm², Cu), koji je razdvojen separacionim plaštom i spoljašnjim plaštom od gume na osnovu polihlorprena.

Ovi višenaponski kablovi se *prema JUS N. C5. 364 (1994. godina) - Rudarski kablovi za priključivanje prenosnih transformatora, sa izolacijom i plaštom od gume tip $E_p N64$ i $E_p N65$, za nazivni napon 3,6/6 kV* ispituju na proveru: električnih osobina (otprnost provodnika i naponska ispitivanja), konstrukcije i mera, mehaničkih osobina izolacije, mehaničke osobine plašta, otpornost prema gorenju i habanju.

Iz ove oblasti su pored već pomenutih nacionalnih standarda i:

- *JUS N. C5. 353 (1994. godina) - Rudarski kablovi sa izolacijom i plaštom od gume, tip GN53, E_pN53, GN55, i E_pN55 za nazivni napon 0,6/1 kV,*
- *JUS N. C5. 358 (1994. godina) - Rudarski kablovi sa izolacijom i plaštom od gume, za napajanje obrtnih bušilica, tip GN58 i E_pN58, za nazivni napon 450/750 kV i*
- *JUS N. C5. 360 (1994. godina) - Rudarski kablovi sa izolacijom i plaštom od gume za napajanje električnih uređaja i osvetljenja za nazivni napon 0,6/1 kV.*

Takođe se *Pravilnikom o tehničkim normativima za električna postrojenja, uređaje i instalacije u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom* (Službeni list SFRJ, br. 21/88) u članu 251 određuje koji se tipovi kablova koriste u pojedinim slučajevima primene.



Sl. 5.37. Kabel za polaganje u rudarska okna 3,5/6 kV

1 - provodnik; 2 - PVC izolacija; 3 - plastična traka; 4 - koncentrični zaštitni provodnik od Cu trake; 5 - unutrašnji PVC plašt i plastične trake; 6 - pocinkovane čelične žice sa pocinkovanim čeličnom trakom; 7 - PVC plašt.

Ako se kabl slobodno veša sa nagibom većim od 50° mora imati najmanje petostruku sigurnost u odnosu na opterećenje sopstvenom masom (u Nemačkoj se dozvoljava slobodno vešanje samo kao privremeno). Ako je kabl pričvršćen na svakih 6 m mora imati trostruku sigurnost u odnosu na opterećenje masom slobodno visećeg kablova.

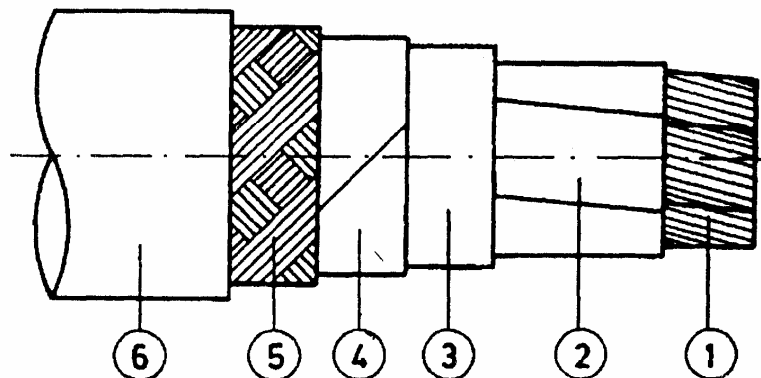
5.5.3. BRODSKI KABLOVI

Kablovi namenjeni za brodove treba da zadovolje više teških i različitih pogonskih uslova. Od njih se zahteva da su otporni na spoljašnje uslove: sunčevu svetlost, kiseonik, ozon, na niske i visoke temperature, a takođe na ulja i na plamen.

Izolacija je od sintetičkog kaučuka koji ima znatne prednosti u odnosu na prirodni kaučuk. Sintetički kaučuk ima radnu temperaturu 80 °C sa mogućnošću preopterećenja do 100 °C.

Iznad unutrašnjeg omotača i trake postavlja se pletena bakarna žica da bi se ograničili uticaji i smetnje na radio uređaje, navigacione uređaje i radare.

Spoljašnji plašt je od sintetičkog kaučuka: polihloroprena. Ovaj materijal je otporan na spoljašnje uslove, ulja, plamen, vrlo je elastičan kako na niskim tako i na visokim temperaturama. Pogodan je za tropske uslove, a takođe i za brodove hladnjače.



Sl. 5.38. Jedan tipičan brodski kabl 0,6/1 kV

1 - kalajisani bakarni provodnik; 2 - izolacija od sintetičkog kaučuka; 3 - unutrašnji omotač;
4 - plastična traka; 5 - Cu oplet; 6 - plašt od polihloroprena

On je takođe otporan na mehaničke uticaje (grebanje, ureze i sl.), te mu nije potrebna posebna mehanička zaštita. Brodski kablovi treba da zadovolje uslove koje propisuju brodska udruženja:

- Lloyd's Register of Shipping,
- Deutsche Schiffs - Revision und Klassifikation,
- Germanischer Lloyd,
- American Bureau of Shipping i
- Det Norske Verifas.

Nemačkim standardom DIN 89158 određuje se konstrukcija brodskih kablova.

5.5.4. KABLOVI OTPORNI PREMA GORENJU

Nema apsolutno negorljivog materijala. Teži se za materijalom koji neće podržavati gorenje, tj. koji neće sam bez podržavanja sa strane goreti i stvarati dim i gasove u opasnom obimu.

Gumene mešavine od etilen-propilenskog kaučuka, bez halogenih supstanci, predstavljaju najviše korišćen materijal za izradu kablova od kojih se zahteva otpornost prema gorenju. Supstanca, protiv gorenja koja se dodaje kao punilac etilen-propilenu, je aluminijumski hidroksid. Najčešće je izolacija kablova od uobičajenog materijala (PVC, UP, XPE i sl.), a plašt od materijala otpornog prema gorenju.

Za ispitivanje ovih materijala postoji više internacionalnih i stranih standarda, kao: VDE 0472, IEC 331, IEC 332-1, IEC 332-3, IEC 751-1, UL 94 itd.

Ovi kablovi se često nazivaju bezhalogeni kablovi. Koriste se u objektima gde se sakuplja veliki broj ljudi (železničke i metro stanice, bioskopi, pozorišta, sportske i sale za zabavu, veće stambene zgrade, putnički brodovi i sl.).

6. PROVODNIK

6.1. OPŠTE

U opštem smislu pod pojmom provodnik podrazumeva se onaj materijal koji ima specifični električni otpor mali: reda 10^{-6} do $10^{-9} \Omega\text{m}$. Po svom sastavu takvi materijali su metali i njihove legure.

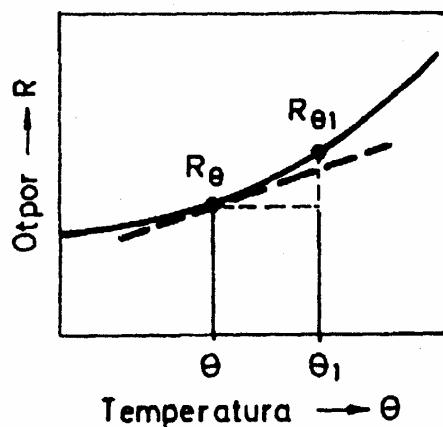
U čvrstom stanju metali su kristalne strukture sastavljene od čvrsto i slabo vezanih kristalnih rešetaka. U kristalnim rešetkama koje su slabo vezane postoje lako pokretni elektroni. Ako je provodnik podvrgnut električnom naponu, onda će se elektroni, koji se inače pod uticajem temperature kreću haotično, usmeriti u smeru suprotnom smeru električnog polja. Proticanje struje kroz metal proizilazi iz sudara slobodnih elektrona sa nepokretnim česticama što izaziva zagrevanje metala. Najveću električnu provodnost imaju jednovalentni metali. Sa povećanjem valentnosti znatno se umanjuje provodnost.

6.2. ELEKTRIČNI OTPOR PROVODNIKA

Električni otpor provodnika raste kad njegova temperatura raste.

Temperaturni koeficijent otpora provodnika (α_θ) na temperaturi θ definiše se kao odnos promene otpora na toj temperaturi i otpora R_θ .

$$\alpha_\theta = \frac{1}{R_\theta} \cdot \left(\frac{dR}{d\theta} \right)_\theta \quad (6.1.)$$



Sl. 6.1. Promena električnog otpora sa temperaturom

Važe sledeće relacije:

$$\alpha_{\theta} = \frac{R_{\theta_1} - R_{\theta}}{R_{\theta} \cdot (\theta_1 - \theta)} \quad (6.2.)$$

$$R_{\theta_1} = R_{\theta} \cdot (1 + \alpha_{\theta} \cdot (\theta_1 - \theta)) \quad (6.3.)$$

$$\frac{1}{\alpha_{\theta}} = \frac{1}{\alpha_{\theta_0}} + \theta \quad (6.4.)$$

$$\rho_{\theta_1} = \rho_{\theta} \cdot (1 + \beta_{\theta} \cdot (\theta_1 - \theta)) \quad (6.5.)$$

$$\frac{1}{\beta_{\theta}} = \frac{1}{\beta_{\theta_0}} + \theta \quad (6.6.)$$

$$\beta = \alpha + \lambda \quad (6.7.)$$

gde je:

ρ - specifični električni otpor provodnika ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$),

β_{θ} - temperaturni koeficijent specifičnog el. otpora ($1/^{\circ}\text{C}$) i

λ - koeficijent linearnog širenja ($1/^{\circ}\text{C}$).

Za praktične proračune, pošto je λ vrlo malo ($\lambda_{\text{Cu}} = 0,17 \cdot 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$, $\lambda_{\text{Al}} = 2,3 \cdot 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$) može se uzeti da je:

$$\alpha \approx \beta$$

Pri tehničkim proračunima dovoljno je tačno, za tu vrstu posla, uzimati vrednost temperaturnog koeficijenta za 20°C , pa se može napisati:

$$R_{\theta_1} = R_{\theta} \cdot (1 + \alpha_{\theta} \cdot (\theta_1 - \theta)) \quad (6.8.)$$

Električna otpornost se određuje nacionalnim normama (JUS N.C0.011, JUS N.C0.015, VDE 0201, VDE 0202 i td.) i međunarodnim standardima (IEC 28, IEC 11, IACS¹⁾ i td.)

¹⁾ IACS - International Annealed Copper Standard

Tabela 6.1. Specifični električni otpor i temperaturni koeficijent za Cu i Al

Metal	Specifični električni otpor (20 °C) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Temperaturni koeficijent $1/^\circ \text{K}$	
		0 °C	20 °C
Bakar	0,017241	$4,26 \cdot 10^{-3}$	$3,93 \cdot 10^{-3}$
Aluminijum	0,028264	$4,38 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$

Merenje jednosmernog otpora provodnika dato je u JUS N.C0.035 - *Merenje otpora provodnika*. U stvari radi se o merenju otpora provodnika pri proticanju jednosmerne struje. Izmereni otpor provodnika kabla za 20 °C ne sme da prekorači vrednost dobijenu na osnovu izraza:

$$R_{20} = \frac{4 \cdot \rho \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{n \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{\rho \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{A} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (6.9.)$$

gde je:

R_{20} - najveći dozvoljeni jednosmerni otpor u Ω/km na 20 °C.

ρ_{Cu} - 17,241; specifični otpor standardnog odžarenog bakra u $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$ na 20 °C, prema JUS N.C0.011,

ρ_{Al} - 28,264 specifičan otpor vučenog aluminijuma u $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$ na 20 °C, prema IEC dokumentu 20 Central Office 125,

n - broj žica u provodniku,

d - prečnik žice (mm),

A - računski presek provodnika (mm^2),

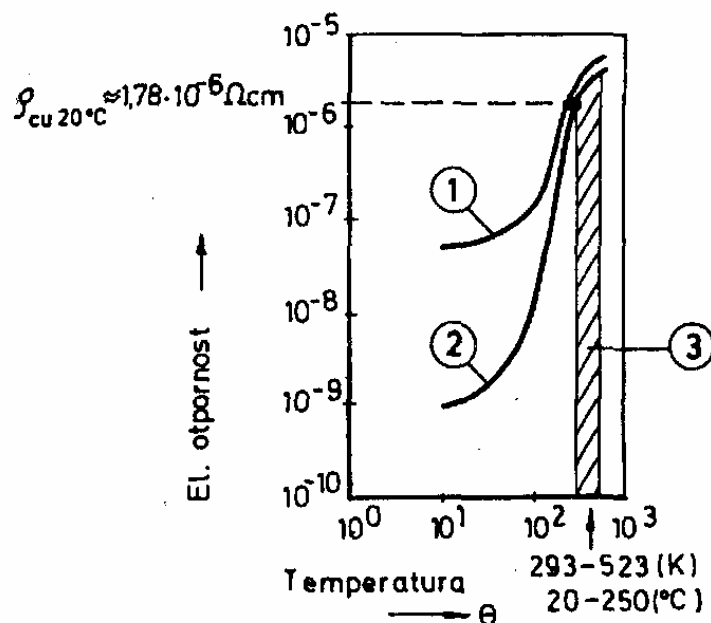
K_1 - faktor povećanja otpora u zavisnosti od prečnika žice, od vrste materijala provodnika i od toga da li je bakarni provodnik sa metalnom prevlakom ili bez nje,

K_2 - faktor povećanja otpora usled pužavanja ili upredanja žica u provodniku i

K_3 - faktor povećanja otpora usled pužavanja žila u izolovanom višezilnom provodniku ili kablju.

Tab. 6.2. Faktori K_1 , K_2 i K_3

			Prečnik žica u provodniku (mm)				
			preko 0,05 do 0,10 zaključno	preko 0,10 do 0,31 zaključno	preko 0,31 do 0,91 zaključno	preko 0,91 do 3,60 zaključno	preko 3,60
K_1	puni (jednožični) provodnici	od bakra sa metalnom prevlakom od aluminijuma bez prevlake	-	-	1,05	1,04	1,04
		od bakra bez prevlake	-	-	1,03	1,03	1,03
	použeni (višežični) provodnici	od bakra sa metalnom prevlakom od aluminijuma bez prevlake	1,12	1,07	1,04	1,03	-
		od bakra bez prevlake	1,07	1,04	1,02	1,02	-
K_2	1,00 za pune (jednožične) provodnike 1,02 za použene (višežične) provodnike u klasama 1, 2 i 3 kada je nazivni prečnik žice veći od 0,6 mm 1,03 za použene (višežične) provodnike u klasama 4, 5 i 6 kada je nazivni prečnik žice veći od 0,6 mm 1,04 za použene (višežične) provodnike u klasama 2, 4, 5 i 6 kada je nazivni prečnik žice manji od 0,6 mm						
K_3	1,00 za jednožilne provodnike i kablove kao i višežilne sa paralelnim žilama 1,02 za višežilne provodnike i kablove (osim savitljivih) sa použenim žilama 1,05 za višežilne savitljive provodnike i kablove sa použenim žilama						

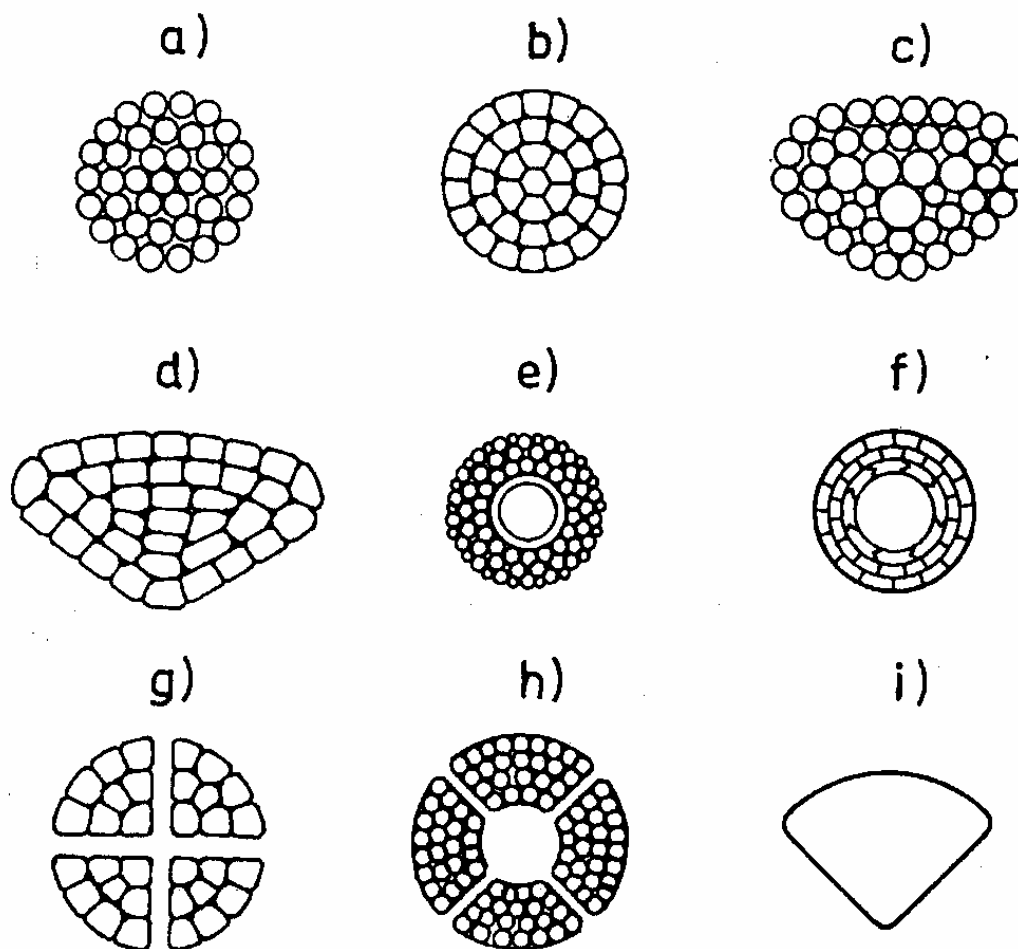


Sl. 6.2. Zavisnost električne otpornosti Cu i Al od temperature
 1 - Al, čistoće 100%; 2 - Cu, čistoće 100%; 3 - temperaturni opseg normalnog rada

(na osnovu - G. Wanser, F. Wiznerowicz:
 Eigenschaften von Energiekabeln und deren Messung, VWEW)

6.3. GRAĐA I GEOMETRIJA PROVODNIKA

Provodnici za kablove mogu biti po obliku: kružni, sektorski, segmentni, šuplji, puni, i sl.



Sl. 6.3. Građe provodnika

- a - okrugli višezični; b - okrugli presovani (kompaktan); c - višezični sektorski;
d - višezični sektorski presovani; e - višezični sa kanalom za ulje;
f - segmentni sa kanalom za ulje; g - višezični segmentni presovani;
h - tzv. "Milliken"; i - sektorski jednožični (za Al provodnik naziv "Solidal")

Provodnici od bakra preseka do 16 mm^2 izrađuju se kao jednožični, a za veće preseke kao višezični okrugli i sektorski. Provodnici od aluminijuma, preseka od 35 mm^2 do 300 mm^2 izrađuju se kao jednožični puni, sektorskog oblika.

Tab. 6.3. Podaci o okruglim provodnicima

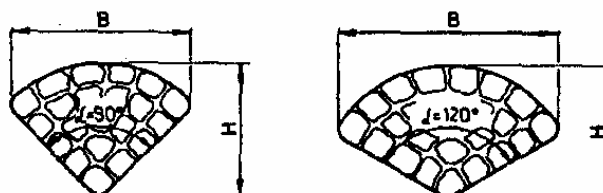
Nazivni presek mm ²	Najmanji broj žica u provodniku	Prečnik provodnika mm	Najveći jednosmerni otpor provodnika u kablu na 20 °C ²⁾	
			Bakar Ω/km	Aluminijum Ω/km
2,5	1	1,78	7,28	-
4	1	2,25	4,56	7,54
6	1	2,76	3,03	5,01
10	1	3,57	1,81	3,00
16	1	4,50	1,14	1,89
25 ¹⁾	7	6,40	0,727	1,20
35 ¹⁾	7	7,6	0,524	0,876
50	19	8,9	0,387	0,641
70	19	10,7	0,268	0,443
95	19	12,6	0,193	0,320
120	37	14,2	0,153	0,253
150	37	15,8	0,124	0,206
185	37	17,6	0,0991	0,164
240	61	20,3	0,0754	0,125
300	61	22,7	0,0601	0,100
400	61	25,6	0,0470	0,0778
500	61	28,8	0,0373	0,0617
630	127	32,8	0,0289	0,0478
800	127	37,1	0,0226	0,0374
1000	127	41,7	0,0179	0,0297

Prema H.P. "Kablovi" - Jagodina

Tab. 6.4. Podaci o višezličnim presovanim sektorskim provodnicima

Nazivni presek mm ²	Najmanji broj žica u provodniku		Osnovne dimenzije sektorskih provodnika				Najveći otpor provodnika u kablu na 20° C	
	Cu	Al	Za četvorožilne kablove α=90°		Za trožilne kablove α=120		Cu Ω/km	Al Ω/km
			H (mm)	B (mm)	H (mm)	B (mm)		
S 35	6	1	6,8	9,6	6,0	10,3	0,520	0,868
S 50	15	6	8,0	11,6	7,2	12,5	0,387	0,641
S 70	15	15	9,3	13,2	8,5	14,4	0,268	0,443
S 95	15	15	11,0	15,7	9,9	17,1	0,193	0,320
S 120	30	30	12,3	17,3	11,2	18,8	0,153	0,253
S 150	30	30	13,9	19,7	12,5	21,2	0,124	0,206
S 185	30	30	15,4	21,5	13,9	23,2	0,099	0,164
S 240	53	30	17,7	24,9	15,9	26,8	0,075	0,125
S 300	53	53	20,0	28,1	17,8	30,2	0,060	0,100
S 400	53	53	22,7	32,6	22,0	34,6	0,047	0,077

Prema H.P. "Kablovi" - Jagodina



Sl. 6.4. Sektorski višezlični provodnik

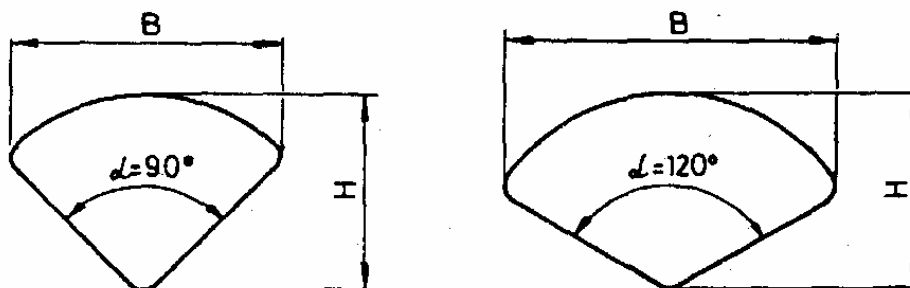
¹⁾ Aluminijumski provodnik može biti izrađen kao jednožični

²⁾ Za jednožilne kablove otpor treba smanjiti za 2%

Tab. 6.5. Podaci o jednožičnim sektorskim aluminijumskim provodnicima ("Solidal")

Nazivni presek mm	Broj žica u provodniku	Osnovne dimenzije sektorskih provodnika				Max. jednosmerni otpor provodnika na 20 °C Ω/km
		Za četvorožilne kablove $\alpha=90^\circ$		Za trožilne kablove $\alpha=120^\circ$		
		H (mm)	B (mm)	H (mm)	B (mm)	
SJ 35	1	6,2	8,7	5,5	9,6	0,868
SJ 50	1	7,3	10,7	6,6	11,8	0,641
SJ 70	1	8,5	12,2	7,8	13,4	0,443
SJ 95	1	10,1	14,5	9,1	15,9	0,320
SJ 120	1	11,7	16,5	10,2	17,4	0,253
SJ 150	1	12,7	18,1	11,4	19,8	0,206
SJ 185	1	13,9	19,6	12,7	21,5	0,164
SJ 240	1	16,1	22,8	14,4	24,7	0,125
SJ 300	1	18,3	26,1	16,3	28,3	0,100

Prema H.P. "Kablovi" - Jagodina



Sl. 6.5. Jednožični sektorski aluminijumski provodnici ("Solidal")

Prema *JUS N.C0.015 - Provodnici za energetske kablove i izolovane provodnike*, provodnici su grupisani u četiri klase 1, 2, 5 i 6 od kojih su klase 1 i 2 namenjene za kablove i izolovane provodnike.

Provodnici klase 1 su jednožični, a klase 2 višezični.

Provodnici mogu biti izrađeni od:

- meko-žarenog bakra sa metalnom prevlakom ili bez nje,
- aluminijuma ili legure aluminijuma,
- aluminijuma sa metalnim košuljicom i
- aluminijuma sa metalnom košuljicom koja je presvučena drugim metalom.

Prevlake za bakar su kalaj i legure kalaja i olova a za aluminijum bakar, nikl i kalaj.

Tab. 6.6. Mehaničke osobine meko-žarenog bakra

Prečnik žice (mm)		Najmanje izduženje (%)	
iznad	do	gole žice	metalom presvučene žice
-	0,1	10	6
0,10	0,15	12	8
0,15	0,25	15	11
0,25	0,40	20	13
0,40	0,50	20	15
0,50	1,00	25	17
1,00	1,50	25	20
1,50	2,50	30	23
2,50	8,00	30	25
8,00	-	35	30

Prema JUS N.C0.015

Ovim standardom se reguliše: podela provodnika (na klase), vrste materijala, provodnici klase 1 i 2 i savitljivi klase 5 i 6, provera električne otpornosti i granična vrednost prečnika.

Tab. 6.7. Mehaničke osobine aluminijumske žice

Prečnik žice (mm)		Prekidna čvrstoća (N/mm ²)
iznad	do	
1,0	1,5	170
1,5	2,0	165
2,0	3,0	160
3,0	4,0	150
4,0	5,0	140
5,0	-	130

Prema JUS N.C0.015

Tab. 6.8. Podaci o bakru

Veličina	Jedinica	Temperatura	
		20 °C	0 °C
Najveći specifični otpor	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$0,017241 = \frac{1}{58}$	$0,01588 = \frac{1}{63}$
Gustina	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	8,89	8,90
Koeficijent linearnog širenja	1/ K	0,000016	0,000016
Temperaturni koeficijent otpora	1/ K	$0,00393 = \frac{1}{245,5}$	$0,00426 = \frac{1}{234,5}$
Tempeaturni koeficijent specifičnog električnog otpora	1/ K	0,00394	0,00428

Prema JUS N.C0.011 (odgovara IEC 28)

Tab. 6.9. Najveći specifični el. otpor i najmanja el. provodnost bakarnog provodnika za kablove i izolovane vodove pri 20 °C

Vrsta vodiča	Specifični otpor pri 20 °C	El. provodnost pri 20 °C
	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\frac{\text{S} \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$
Nekalajisan provodnik	0,01786	56
Nekalajisan provodnik spoljašnjeg prečnika većeg ili jednakog 0,3 mm	0,01802	55,5
Kalajisan provodnik spoljašnjeg prečnika od 0,1 do 0,3 mm	0,01835	54,5
Kalajisan provodnik spoljašnjeg prečnika manji od 0,1 mm	0,01887	53

Prema VDE 0201 i 0202

Specifični električni otpor bakra u zavisnosti od primesa:

$$\rho = \frac{0,017241}{1 - 0,01 \cdot a \cdot \text{Ad}} \left(\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right) \quad (6.10)$$

gde je: a - primeše, %

Ad - Addicksov koeficijent.

Tab. 6.10 Addicksov koeficijent

Primeše	Ad	Primeše	Ad
Aluminijum	500	Kalaj	67
Antimon	190	Silicijum	70
Arsen	720	Olovo	3
Bizmut	4	Srebro	6
Cink	30	Telur	4
Fosfor	800	Zlato	10
Kadmijum	9	Gvožđe	140
Kiseonik	25		

Tabela 6.11 Metalurški aluminijum

Vrste aluminijuma	Oznaka ¹⁾	Dopuštena nečistoća % maks.						
		Ukupno	Si ²⁾	Fe ²⁾	Ti	Cu	Cu-Zn	Ostalo
Aluminijum 99,8	Al 99,8 M	0,20	0,15	0,15	0,03	0,01	0,07	0,01
Aluminijum 99,7	Al 99,7 M	0,30	0,20	0,25	0,03	0,01	0,08	0,03
Aluminijum 99,5	Al 99,5 M	0,50	0,30	0,40	0,03	0,02	0,09	0,01
Aluminijum 99,0	Al 99,0 M	1,00	0,50	0,60	0,03	0,02	0,10	0,04
Elektrotehnički aluminijum	E.Al	0,50	0,10	0,20 0,35	- ³⁾	0,02	0,09	-

¹⁾ Brojke u oznaci izražavaju minimalni sadržaj aluminijuma,

²⁾ Oblike za valjanje i presovanje moraju imati SiFe

³⁾ Sadržaj (Ti+V+C+Cr+Mn) ne sme preći 0,03% a ni jedan navedeni element ne sme preći 0,01%

Prema JUS C.C1.100

Tab. 6.12 Aluminijum za električne provodnike

Vrsta aluminijuma	Specifični električni otpor na 20 °C $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$		Čvrstoća na istezanje N/mm ²
	Najveći	Redovni	
Meko žaren	0,0280	0,0278	<100
Tvrđi nežaren	0,028264	0,028264	>150

Prema IEC 111

Tab. 6.13 Podaci o aluminijumu za elektrotehniku

Veličina	Jedinica	Temperatura 20 °C za kablove i izolovane vodove
Najveći specifični električni otpor	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	0,02941
Gustina	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	2,7
Koeficijent linearnog širenja	1/ K	0,0000238
Temperaturni koeficijent otpora	1/ K	0,00403
Temperaturni koeficijent specifičnog el. otpora	1/ K	0,00405

Prema VDE 0202

6.4. UPOREĐENJE BAKRA I ALUMINIJUMA

Tab. 6.14 Uporedni podaci za bakar i aluminijum

Veličina	Jedinica	Bakar	Aluminijum
Gustina	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	8,89	2,7
Električna provodnost	$\frac{\text{S} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	55-58	33-36
Specifični električni otpor	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	17,2-18,1	27,7-30,3
Čvrstoća	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	200-370	65-130
Temperaturni koeficijent otpora pri 20 °C	$\frac{10^{-3}}{\text{K}}$	3,93	4,03
Specifična toplota	$\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	0,092	0,214

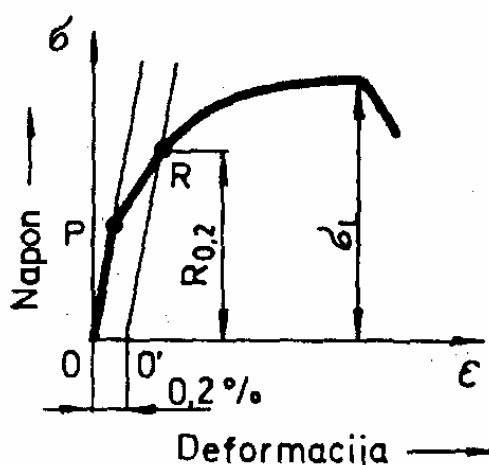
Tab. 6.15 Relativni uporedni podaci za bakar i aluminijum (isti presek)

Veličina	Jedinica	Bakar	Aluminijum
Presek	mm ²	1	1
Prečnik	mm	1	1
Specifični električni otpor	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	1	1,65
Električna provodnost	$\frac{\text{S} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	1	0,61
Struja (za jednako zagrevanje provodnika)	A	1	0,8
Masa	kg	1	0,303

Tab. 6.16 Relativni uporedni podaci za bakar i aluminijum (ista struja i otpor)

Veličina	Jedinica	Bakar	Aluminijum
Struja (za jednako zagrevanje provodnika)	A	1	1
Presek	mm ²	1	1,45
Specifični električni otpor	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	1	1,13
Električna provodnost	$\frac{\text{S} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	1	0,88
Masa	kg	1	0,44
Prečnik	mm	1	1,18
Otpor	Ω	1	1
Provod	S	1	1
Presek	mm ²	1	1,65
Struja (za jednako zagrevanje provodnika)	A	1	1,13
Masa	kg	1	0,5
Prečnik	mm	1	1,28

§.5. MEHANIČKE OSOBINE BAKRA I ALUMINIJUMA



Sl. 6.6. Dijagrami $\sigma - \epsilon$ (napon - deformacija) za bakar i aluminijum
 σ_L - napon loma, P - granica proporcionalnosti,
 $R_{0,2}$ - napon pri deformaciji 0,2%.

Za pravolinijski deo dijagrama (OP) važi zakon proporcionalnosti između σ i ε (Hook-ov zakon). Postoje veze:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6.11.)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (6.12)$$

a takođe (za deo proporcionalnosti):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6.13)$$

gde je:

- σ - napon (na istežanje),
- A - površina na koju deluje sila F,
- ε - specifična deformacija (skraćeno deformacija),
- l - dužina pre istežanja,
- l + Δl - dužina posle istežanja,
- E - modul elastičnosti.

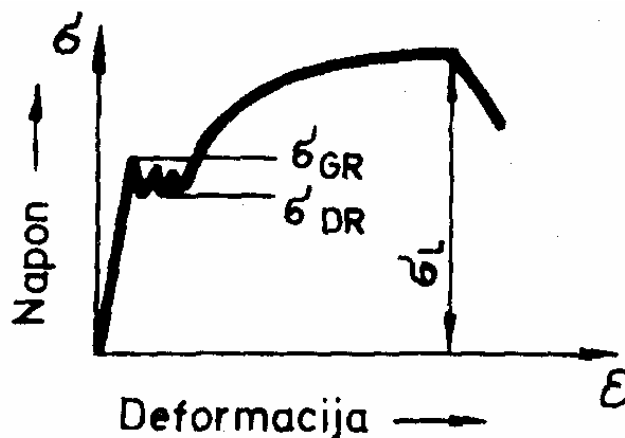
Za granicu elastičnosti uzima se tačka R kod koje duž OO' predstavlja plastičnu deformaciju od 0,2%.

Maksimalno dozvoljeno naprezanje (napon) σ_{\max} materijala mora biti ispod granice proporcionalnosti (u oblasti elastičnosti), tako da nema trajne deformacije.

Tab. 6.17 Moduli elastičnosti

Materijal	Modul elastičnosti E (N/mm ²)
Čelik (uopšte)	210.000
Sivo liveno gvožđe	100.000
Al (za elektrotehniku)	65.000
Cu (za elektrotehniku)	115.000

Kod čelika u dijagramu σ - ε postoji opseg razvlačenja (tečenja), dok kod bakra i aluminijuma koji nemaju jasnu granicu između oblasti elastičnosti i plastičnosti ona nije jasno izražena.



Sl. 6.7. Dijagram $\sigma - \epsilon$ (napon deformacija) za čelik
 σ_{GR} - napon gornje granice razvlačenja (tečenja)
 σ_{DR} - napon donje granice razvlačenja (tečenja)

Tab. 6.18. Mehaničke osobine bakra za elektrotehniku

Oznaka bakra	Ispitni napon na istezanje ¹⁾ (N/mm ²)	Granica razvlačenja (N/mm ²)
meki E-Cu F20	200 - 250	max. 100
polutvrđi E-Cu F25	250 - 300	min. 150
tvrdi E-Cu F30	300 - 370	min. 200
E-Cu F37	370 - 450	min. 330

Prema DIN 40500 (62)

- ¹⁾ - za prečnike do 1 mm važe niže vrednosti,
²⁾ - za prečnike od 1 mm važe više vrednosti.

Tab. 6.19. Mehaničke osobine aluminijuma za elektrotehniku

Oznaka bakra	Ispitni napon na istezanje (N/mm ²)	Granica razvlačenja (N/mm ²)
E-Al F7	70 - 90	max. 50 - 60
E-Al F9	90 - 130	min. 90
E-Al F13	130 - 170	min. 100
E-Al F17	170	min. 110

Prema DIN 40500 (61)

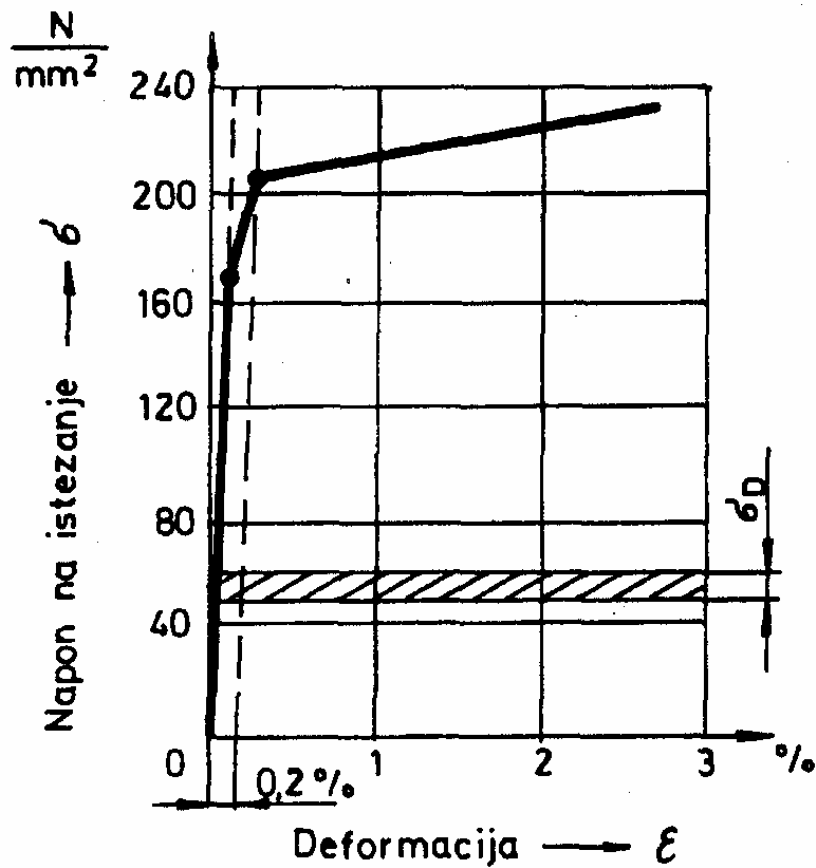
Tab. 6.20. Najveće dopušteno naprezanje provodnika

Materijal	Ispitni napon na istezanje (N/mm ²)	Dopušteni napon (N/mm ²)		
		Normalno		Izuzetno
		žica	uže	žica i uže
Tvrđi bakar	400	120	190	300
Polutvrđi bakar	300	100	120	240
Aluminijum	170 - 180	-	70	120

Pri polaganju kablova pri vuči preko provodnika uzimaju se sledeći dozvoljeni naponi:

- za bakar $\sigma_D = 50 - 60 \text{ N/mm}^2$,
- za aluminijum $\sigma_D = 25 - 45 \text{ N/mm}^2$ (za meki Al 25, za tvrdo 45 N/mm^2)

Neki proizvođači kablova uzimaju 50 i 30 N/mm^2 respektivno za Cu i Al



Sl. 6.8. Dijagram napon - deformacija za bakarni višežični provodnik

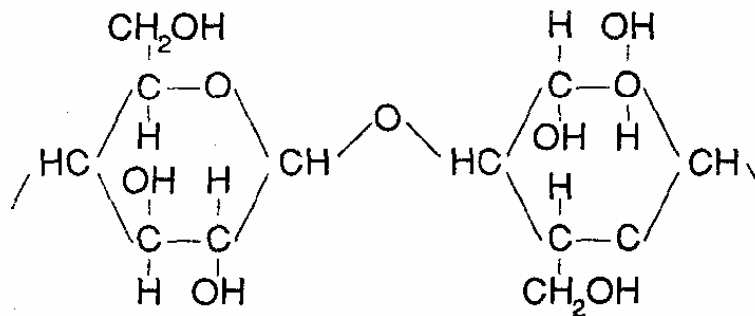
7. IZOLACIJE KABLOVA

7.1. PAPIR

Za izolaciju kablova koristi se tehnički papir po nazivu natron-papir, koji se proizvodi od čiste natronceluloze. Za proizvodnju papira dobrih osobina najviše se koristi drvo smrče, jele i bora.

U morfološkom pogledu postoji velika razlika između četinara i listara. Ta razlika se ispoljava u dužini vlakana što je izuzetno važno za proizvodnju papira dobrih osobina. Dužina vlakana celuloze od smrče je 3,4 mm, breze 1,2 mm, topole 1,1 mm, a bukve svega 0,9 mm.

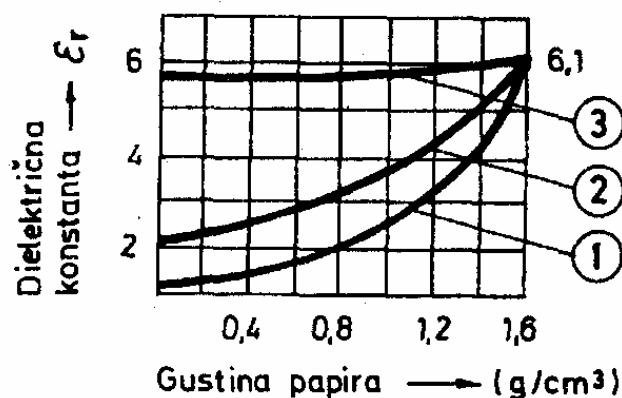
Celuloza je sačinjena sa hemijskog gledišta od linijskog molekula koji se periodično ponavljaju, a povezani su među sobom kiseoničkim mostovima.



Sl. 7.1. Struktura osnovnog molekula celuloze

Fizički gledano celuloza je izgrađena od veoma malih delića, micela koji su u obliku dugačkih lanaca međusobno vezanih u snopove. Vlakna papira sastoje se od kristalnih micela među kojima se nalaze izdvojeni molekuli celuloze. Na taj način se obrazuje porozna struktura sa kapilarima prečnika 10^{-1} do 10^{-2} μm . Takva struktura ima znatnu unutrašnju površinu, čime se objašnjava velika higroskopnost papira.

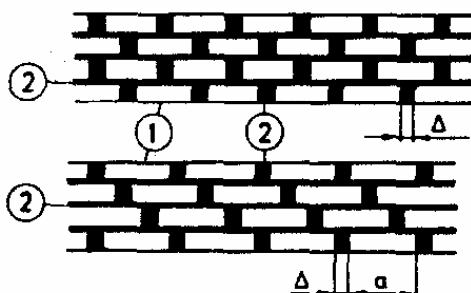
Dielektrična konstanta papira se znatno razlikuje od dielektrične konstante čiste celuloze (6,1 pri 20 °C). U stvari papir predstavlja kombinaciju od celuloze i vazduha koji se nalazi u šuplinama celuloze.



Sl. 7.2. Dielektrična konstanta u funkciji gustine papira

1 - neimpregnisani papir; 2 - papir impregnisan uljem;
3 - papir impregnisan uljnim kompaundom.

Gustina papira za kablove iznosi oko 0,6 - 0,7 g/cm³, a celuloze 1,54 g/cm³. Iz ovoga proizilazi da oko polovine dielektrike zauzima impregnans. Npropustljivost papira je obrnuto srazmerna njegovoj poroznosti. Sasvim zbijen, gust papir, se i ne može uspešno impregnisati. Standardom JUS N.A8.251 predviđeno je merenje papira na propustljivost vazduha.



Sl. 7.3. Načini motanja papira

Δ - papirni procep (obično oko 1mm)

Papirne trake se motaju helikoidno oko provodnika, tako da ostaje međuprostor između njih. Na taj način pri savijanju kabla ne dolazi do deformacije papirnih traka. Ovakva izolacija je kombinovana sa papirom i uljem tako da važi odnos:

$$\frac{E_u}{E_p} = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_u} = \frac{6,1}{2,2} = 2,77 \quad (7.1.)$$

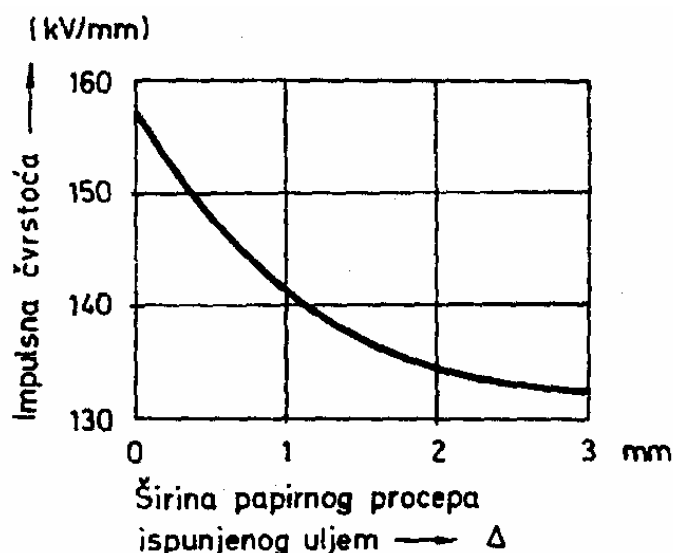
gde je:

E_u - jačina električnog polja u ulju,

E_p - jačina električnog polja u papiru,

ϵ_u - relativna dielektrična konstanta ulja i

ϵ_p - relativna dielektrična konstanta papira.



Sl. 7.4. Zavisnost impulsne čvrstoće papira impregnisanog uljem od širine papirnog procepa (Δ u sl. 7.3.)

Iz ovoga proizilazi da je ulje više napregnuto, tj. da u njemu vlada jačina električnog polja veća 2,77 puta od polja u papiru, a sa druge strane ima manju dielektričnu čvrstoću od papira.

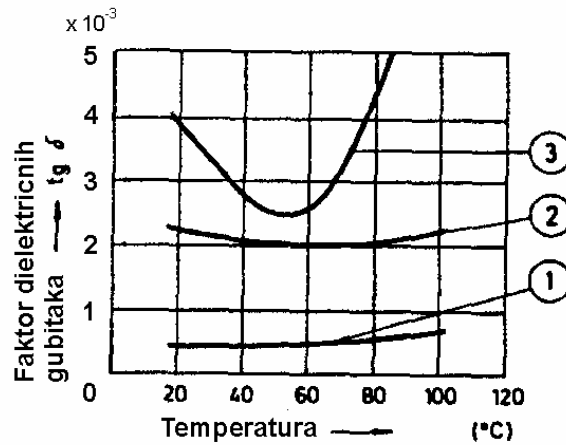
Tab. 7.1. Dielektrična čvrstoća papira za kablove (orijentacione vrednosti)

Izolacija	Dielektrična čvrstoća (kV/mm)		
	50 Hz (napon)	je. napon	impulsni napon
Neimpregnisan papir	8-14 ¹⁾	-	-
Impregnisan papir	45-55	80-100	100-130 ²⁾
Ulje	20-30	-	-

¹⁾ prema JUS N.A8.256 uslovljava se vrednost od 7 kV/mm,

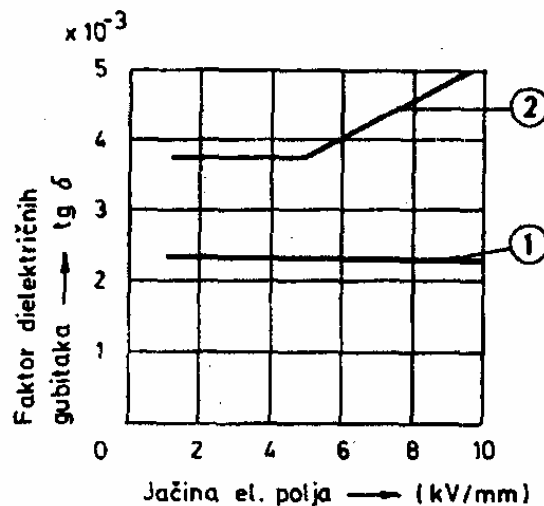
²⁾ Zavisno od debljine papira i broja impulsa

Papir je neizotropne strukture te mu se probojna čvrstoća menja sa pravcem delovanja električnog polja: upravno na papir ili podužno na papir. Probojna čvrstoća papira podužno na njega je znatno niža (10 do 12 puta). Ovo je naročito važno kod kablovskih glava i spojnica gde postoji tzv. tangencijalna komponenta električnog polja. Prisustvo vlage do 1% u papirnoj izolaciji impregnisanom uljem niskog viskoziteta ne utiče na pad električne čvrstoće. Pri većem sadržaju vlage ona naglo opada.



Sl. 7.5. Zavisnost $\text{tg}\delta$ od temperature
1 - XPE; 2 - uljni kabl; 3 - papirni kabl.

Iz krive zavisnosti $\text{tg}\delta$ od temperature vidi se da posle 60-80 °C $\text{tg}\delta$ počinje naglo da raste. To je razlog što se za radnu temperaturu papirnih kablova uzima maksimalna temperatura 60 (za 35 kV) odnosno 65 °C (za 10 kV).



Sl. 7.6. Zavisnost $\text{tg}\delta$ od jačine električnog polja
1 - uljni kabl; 2 - papirni kabl

Između 5-6 kV/mm $\text{tg}\delta$ za papirne kablove naglo raste. Stoga se za pogonsku jačinu električnog polja uzima vrednost 4-5 kV/mm.

Tab. 7.2. Vrednosti ϵ_r i $\text{tg}\delta$ za razne kablove izolovane na bazi papira

Vrsta kabla	Dielektrična konstanta ϵ_r	Faktor gubitaka $10^{-3} \text{tg}\delta$	$\epsilon_r \text{tg}\delta$
Papirni kabl	3,5 - 4,0	3,0 - 4,0	0,01
Uljni kabl	3,3 - 3,6	2,5 - 3,0	0,01
Kabl sa spoljašnjim pritiskom gasa	3,4 - 3,5	2,5 - 3,0	0,01
Kabl sa unutrašnjim pritiskom gasa	3,4 - 3,5	2,5 - 3,0	0,01

Tab. 7.3. Neke fizičke osobine papira¹⁾

Oznaka papira	Debljina papira (mm)	Prekidna dužina (km)		Prekidno izduženje (%)	
		podužna	poprečna	podužna	poprečna
EP7	0,125	8,0	4,0	3,0	5,0
VP8	0,125	9,0	5,0	4,0	5,0
VP10	0,085	10,0	5,0	4,0	5,0

¹⁾ Prema katalogu H.P. "Kablovi" - Jagodina

Tab. 7.4. Toplotne osobine papira

Izolacioni materijal	Toplotna otpornost Km/W	Specifična toplota ¹⁾ J/m ³ K	Granična temperatura ²⁾ °C
Papir impregnisan u uljnom kompaundu (papirni kablovi)	5-6	2,0·10 ⁶	60-80
Papir impregnisan u ulju (uljni kablovi)	5	2,0·10 ⁶	85
Papir impregnisan u sintetičkom ulju visokog viskoziteta (kablovi sa spoljašnjim pritiskom gasa)	5,5	2,0·10 ⁶	85
Papir impregnisan u uljnom kompaundu visokog viskoziteta, neosetljiv na vlagu (kablovi sa unutrašnjim pritiskom gasa)	6-6,5	2,0·10 ⁶	85

¹⁾ Specifična toplota se daje nekad za masu od 1 kg, tj. u J/kgK. Pretvaranje J/kgK u J/m³K prema odnosu:

$$1 \text{ kg} = X \text{ m}^3 \cdot g \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad X = \frac{1}{g}$$

gde je g - gustina.

²⁾ Granična temperatura za impregnisani papir: 105 odnosno 110 °C, ali se mora računati i sa ubrzanim starenjem (vidi 7.1.1. STARENJE PAPIRA).

Prema standardu JUS N.A8.250 - Celulozni papiri za elektrotehničke svrhe (definicije i opšti zahtevi) predviđa se sedam vrsta papira, a za kablove se koristi tzv. natron papir (Kraft papir). Standardizovane su nazivne debljine papira za opštu elektrotehničku upotrebu:

15; 20; 25; 50; 65; 75; 100; 125; 160; 200; 250 μm

Uobičajena debljina papira za kablove je: od 75 do 200 μm. Za više napone se koristi tanji papir. Standard JUS N.A8.256 - Celulozni papir za elektrotehničke svrhe (specijalni papir) odnosi se i na kablove. Papirne izolacije se dele na 4 klase:

- A - Kraft papir 1. klase, posebno velike čistoće,
- B - Kraft papir 1. klase, visoke čistoće,
- C - Kraft papir 1. klase, normalne čistoće i
- D - Kraft papir 1. klase, srednji stepen čistoće.

JUS N.A8.251 - Celulozni papir za elektrotehničke svrhe (metode ispitivanja) predviđa niz ispitivanja: dielektrične čvrstoće, $\text{tg}\delta$ i ϵ_r (impregnisanog i neimpregnisanog papira), provodne staze, termičku stabilnost, apsorpciju ulja, propustljivost vazduha, propustljivost vodenog ekstrakta i više hemijskih i fizičkih osobina. Ovoj grupi propisa pripada i *JUS N.A8.252 - Celulozni papir za elektrotehničke svrhe (papir za opštu elektrotehničku upotrebu)*.

Zahtevi za celulozni papir prema JUS-u su u skladu IEC 551-1, IEC 554-2, IEC 554-3-1 i IEC 554-3-5.

Osnovni Nemački standardi za izolacioni papir su:

DIN 6740 - Isolierpapiere für Elektrotechnik (Masse),
 DIN VDE 0311, Teil 10 - Isolierpapiere auf Zellulosebasis für elektrotechnische Zwecke (Begriffe und allgemeine Anforderungen),
 DIN VDE 0311, Teil 31 - Isolierpapiere auf Zellulosebasis für elektrotechnische Zwecke (Anforderungen-Papiere für allgemeine elektrotechnische Zwecke).

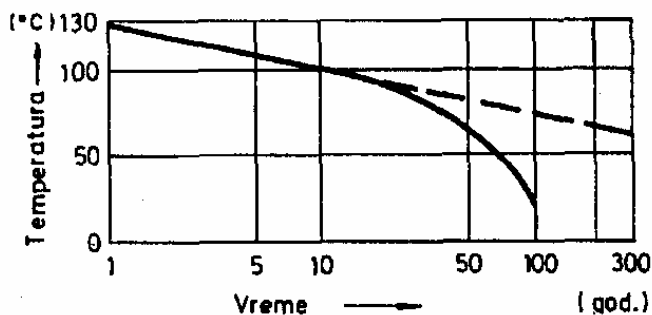
7.1.1. STARENJE PAPIRA

Ispitivanja su pokazala da se za svakih 8 °C povećanja temperature impregnisanog papira skraćuje njegov relativni "životni vek" za pola. Ta zavisnost važi u opsegu od 0 do 20-30 godina i data je u eksponencijalnom obliku:

$$L_N = C \cdot e^{-K_T \cdot \theta_{PN}} \quad (7.2.)$$

gde je:

- L_N - životni vek impregnisanog papira pri temperaturi provodnika θ_{PN} ,
- θ_{PN} - naznačena (max. trajno dozvoljena) temperatura provodnika,
- K_T - temperaturna konstanta (0,0865 1/K),
- C - konstanta starenja.



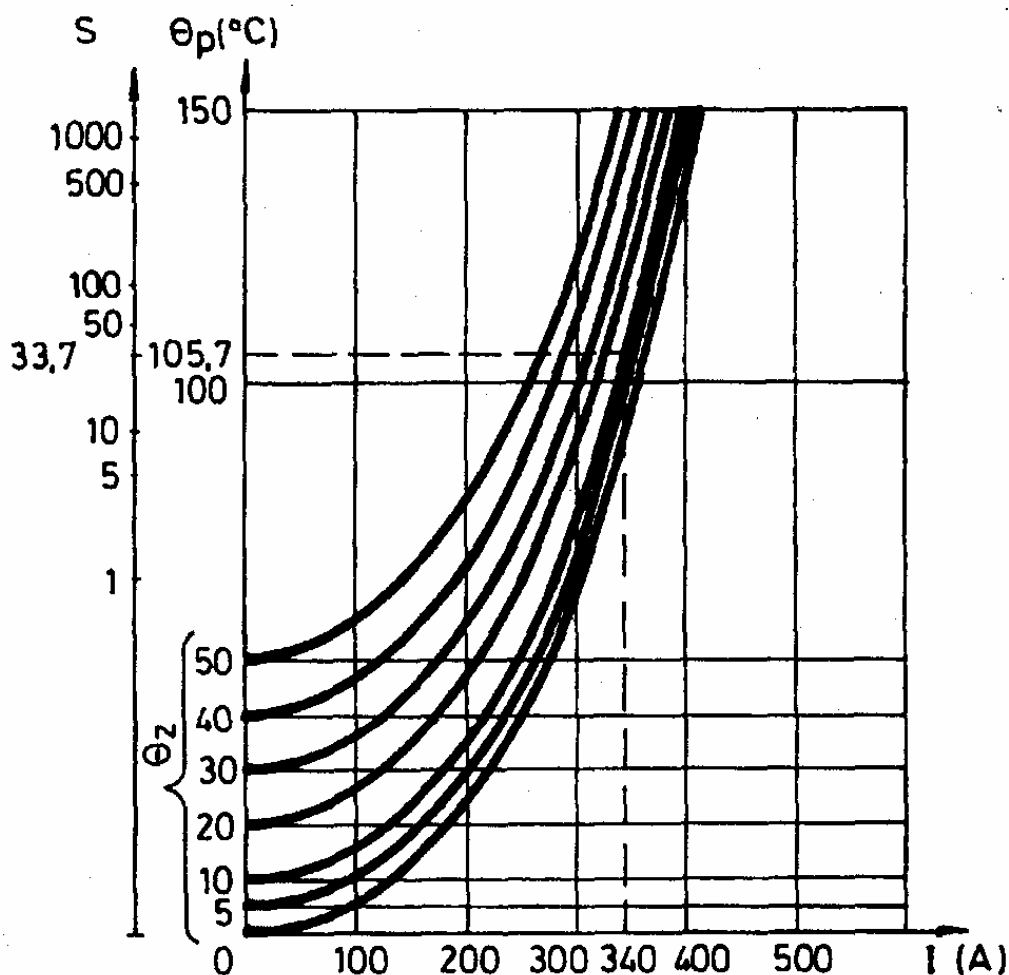
Sl. 7.7. Dejstvo temperature na relativni "životni vek" impregnisanog papira (prema Monsinger-u ¹⁾)

¹⁾ V. M. Monsinger: Loading Transformer by Temperature, Journal A. I. E. E. April, 1930.

Faktor starenja je definisan kao odnos:

$$S = \frac{L_N}{L} = e^{K_T \cdot (\theta_P - \theta_{NP})} \quad (7.3.)$$

gde je L "životni vek" za neku temperaturu provodnika θ_P .



Sl. 7.8. Nomogram starenja (S) kabla NPO 13 AS $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 10 kV u funkciji strujnog opterećenja, za različite temperature zemljišta

θ_P - temperatura provodnika; θ_z - temperatura zemljišta;
 $\rho_z = 1 \text{ Km/W}$ specifični toplotni otpor zemljišta

Papir je po svojoj prirodi znatno preopteretljiv. Ispitivanja su pokazala vidne promene tek na $240 \text{ }^\circ\text{C}$. Između $190 \text{ }^\circ\text{C}$ i $270 \text{ }^\circ\text{C}$ nalazi se područje samozapaljivosti uljnog kompaunda. Otuda proizilazi da bi se kratkotrajno mogla dozvoliti temperatura papira od $200 \text{ }^\circ\text{C}$, ali bi onda svi spojevi morali biti urađeni varenjem i rešen problem isušivanja zamlišta. Ograničenja postoje i kod Pb-omotača i Al-provodnika, jer njihove mehaničke osobine opadaju sa porastom temperature. Tako za Pb je granica oko $120 \text{ }^\circ\text{C}$ a za čisti Al oko $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Uobičajeno je da se za maksimalnu temperaturu uzima $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (neki proizvođači daju i $110 \text{ }^\circ\text{C}$).

Primer 7.1. (Sl. 7.8. ¹⁾)

Ako je kabl NPO 13 AS $3 \times 150 \text{ mm}^2$, 10 kV opterećen sa 340 A ($I = 1,38 \times I_N = 1,38 \times 245 \approx 340 \text{ A}$), pri temperaturi zemljišta $\theta_z = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, u trajanju 24 h, onda je faktor starenja 33,7. Kabl, tj. papir će ostareti za:
 $24 \times 33,7 \approx 749 \text{ h}$

Proizilazi kao da je kabl bio pod opterećenjem nominalnom strujom 245 A 33,7 dana. Znači da mu je životni vek skraćen za 32,7 dana.

7.2. IZOLACIONA ULJA I ULJNI KOMPAUNDI

Za uljne kablove koriste se mineralna ulja male viskoznosti. Ova ulja su smeša više ugljovodonika kao: parafin, naften, aromatični ugljovodonici, olefin itd. Ulja se dobijaju iz sirove nafte, a takođe i od parafinske nafte. Toplotna otpornost ulja je 7 Km/W, a specifična toplota $1,7 \times 10^6 \text{ Jm/K}$.

Tab. 7.5. Osnovne osobine mineralnog ulja niske viskoznosti

Osobina	Jedinica	Vrednost
Probojni napon	kV/cm	200-350
Dielektrična konstanta, ϵ_r	-	2,2
Gustina	g/cm ³	0,9
tg δ za 50 Hz	-	1×10^{-3}
Koeficijent širenja	1/K	$8,3 \cdot 10^{-4}$

Za kablove se takođe koriste sintetička ulja. Tako se za kablove niskog pritiska koristi dodeksil-benzol koji ima nisku viskoznost. Takođe se koristi i polibutilen.

Impregnacioni kompaund je mešavina mineralno-naftenskih ulja i dodataka za povećanje viskoznosti (kalofonijum i poliizobutilen).

Tab. 7.6. Propisane vrednosti normalnog kompaunda²⁾

Osobina	Jedinica	Propisana vrednost
Faktor dielektričnih gubitaka tg δ 100 °C 60 °C	-	max. 0,008 max. 0,006
Faktor dielektričnih gubitaka tg δ , posle starenja ³⁾ 100 °C 60 °C	-	max. 0,016 max. 0,0016
Dielektrična konstanta ϵ_r , 20 °C	-	max. 2,6
Specifični električni otpor 100 °C 60 °C	Ωm	min. 3×10^{12} min. 30×10^{12}

¹⁾ Detaljnije o toku proračuna vidi: Strujna opteretljivost papirnih kablova 10 kV i njihov životni vek (B. Lalević), "Elektrodistribucija Beograd", 1982. godine br.3

²⁾ Prema H.P. "Kablovi" - Jagodina

³⁾ Starenje na 120 °C za 24 h u prisustvu bakra.

Tab. 7.7. Neke osobine normalnog kompaunda¹⁾

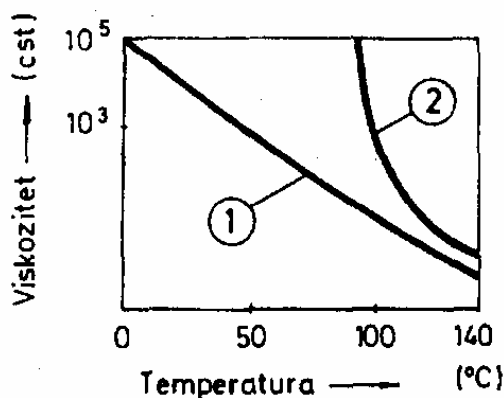
Temperatura °C	Viskozitet °E *	Specifična težina g/cm ³	Specifični otpor Ωcm	Faktor dielektričnih gubitaka %	
				pre starenja	posle starenja
40	270	0,925	500·10 ¹²	0,05	0,05
60	60	0,915	80·10 ¹²	0,30	0,40
80	20	0,905	20·10 ¹²	1,40	1,50
100	9	0,895	6·10 ¹²	3,50	4,50

* - Jedinica za kinematički viskozitet je °E (Engler) i cSt (centistokes) a njihovi odnosi su:

°E	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8	10
cSt	1	6,25	11,8	16,7	21,1	29,5	37,4	45,2	52,9	60,8	76

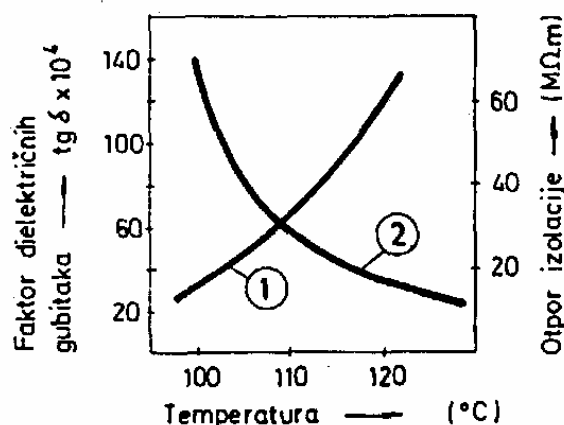
iznad 10°E važe odnosi: 1 cSt = 10⁶ m²/s = 1 mm²/s i n°E = 7,6 · n cSt

Za veće visinske razlike i vertikalna polaganja kablova za impregnaciju papira se koristi gusti kompaund. Ovaj kompaund se dobija od mineralnih ulja sa dodatkom kalofonijuma, poliizobutilena i drugih specijalnih dodataka. Ovakav sastav omogućava da kompaund na 90 °C ostane u polučvrstom stanju. Ovakav kompaund se zove i naročiti kompaund.



Sl. 7.9. Zavisnost viskoziteta od temperature

1 - normalni kompaund; 2 - naročiti kompaund



Sl. 5.10. Zavisnost tgδ i otpora izolacije naročtog kompaunda od temperature

1 - tgδ; 2 - Ri¹⁾

¹⁾ Prema katalogu H.P. "Kablovi" - Jagodina

7.3. IZOLACIJE IZ GRUPE POLIMERA

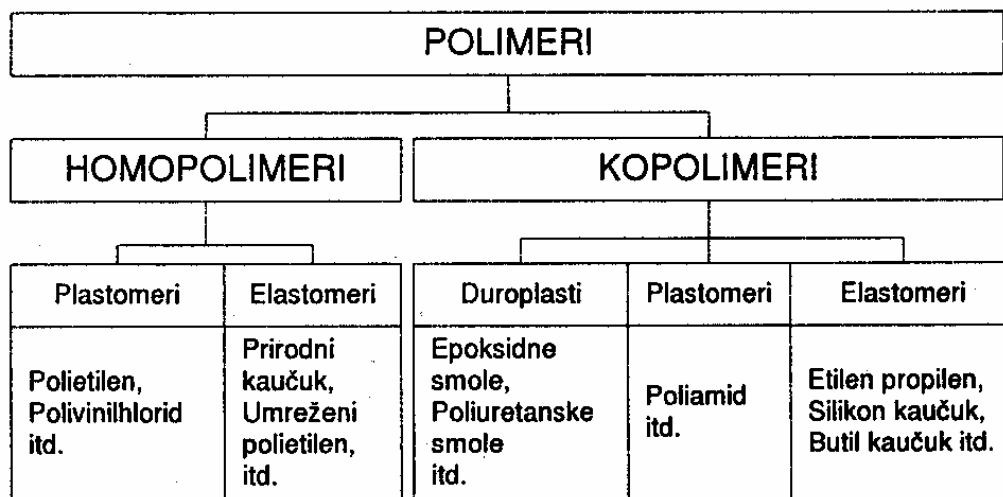
Za izolacije kablova se koriste sintetički materijali i prirodni kaučuk koji pripadaju grupi polimera. Osnovne izolacije kablova iz grupe polimera su:

- Polivinilhlorid (PVC),
- Polietilen (PE),
- Umreženi polietilen (XPE) i
- Etilenpropilen (EPR).

Polimeri su materijali sa velikim molekulima - makromolekulima sastavljenim od malih molekula (monomera) ili njihovih grupa. Ako se pri sintezi koriste makromolekuli samo jedne vrste monomera dobija se kao produkt homopolimer. Kopolimer je produkt dva različita tipa monomera. Prema toplotnim i mehaničkim osobinama polimeri se dele na plastomere i elastometre. Pod plastometrima se podrazumevaju sintetički materijali koji su u oblasti normalnih temperatura kruti i žilavi, a u oblasti viših temperatura plastični. Elastomeri se karakterišu promenljivom elastičnošću pri niskim, radnim i visokim temperaturama. Ove njihove osobine počivaju na umrežavanju dugih lanaca molekula.

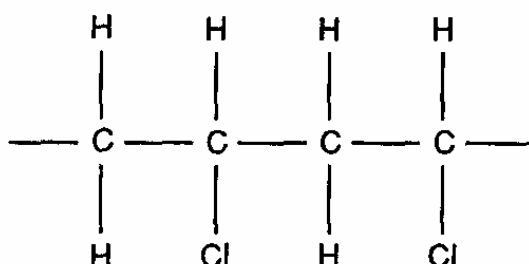
Duroplasti su vrlo jako umreženi polimeri koji u celom temperaturnom opsegu ostaju tvrdi i kruti.

Tab. 7.8. Podela polimera sa gledišta kablovske tehnike



7.3.1. POLIVINILHLORID (PVC)

Polivinilhlorid pripada grupi polarnih dielektrika i oni se karakterišu polarnim molekulima - električnim dipolima. Pri unošenju polarnog dielektrika u električno polje dolazi do polarizacije i trošenja električne energije koja se pretvara u toplotnu. U stvari to su dielektrični gubici. Otuda PVC izolacija ima dielektrične gubitke, što ograničava njegovu primenu za više napone.



Sl. 7.11. Građa PVC-a

PVC se dobija polimerizacijom etilena i hlora u prisustvu katalizatora pod pritiskom. Za dobijanje PVC-a koriste se dva postupka: emulzioni i suspenzioni. Prvi postupak se koristi za niskonaponske kablove, pošto nije potrebna velika čistoća. Ostatak emulzije, u stvari elektrolit, pogoršava dielektrične osobine PVC-a. PVC dobijen postupkom suspenzije ne sadrži elektrolit, vrlo je čist i ima dobre dielektrične osobine. On se koristi za više napone.

PVC je bez dodataka tvrd, krt i toplotno nestabilan. Stoga se njemu dodaju: omekšivači, stabilizatori, punioci i još neki sastojci koji poboljšavaju obradivost. PVC pripada hemijskoj grupi plastomera čija je osobina da su u normalnim uslovima krti i žilavi, a pri višim temperaturama plastični i topljivi. Radna temperatura im je relativno visoka skoro kao kod papira, ali se po pravilu ne sme prekoračiti. Za kablove izolovane standardnim PVC-om kaže se da su nepreopteretljivi. Moguća je izrada PVC-a veće toplotne klase, koji izdržavaju temperaturu od oko 105 °C u trajanju 25.000 h (JUS N.C0.195).

PVC se smatra da je negorljiv, tj. da ne pomaže gorenje - u stvari gori samo uz prisustvo plamena. Pri tome se stvaraju dim i gasovi.

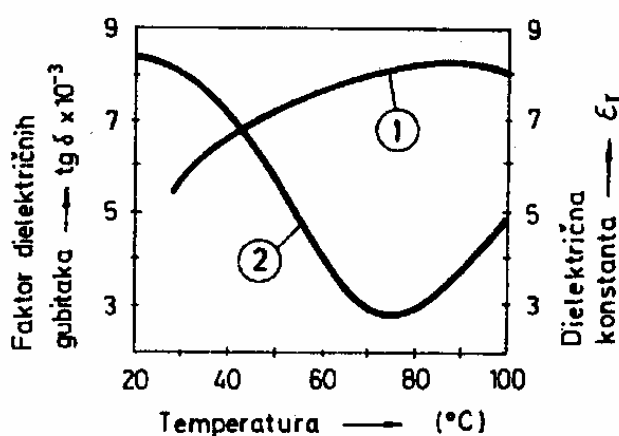
Tab. 7.9. Toplotne i električne osobine PVC-a

Specifični toplotni otpor (Km/W)	do 3 kV - 5; iznad 3 kV - 6	Sačinilac gubitaka ($\epsilon_r \times \text{tg}\delta$)	$\approx 0,3$
Specifična toplota (J/m ³ K)	$1,7 \times 10^6$	Dielektrična čvrstoća (kV/mm)	10 - 20
Faktor gubitaka ($\text{tg}\delta \times 10^{-3}$)	$\approx 10 - 100$ ¹⁾	Električna otpornost (Ωcm)	$> 10^{15}$
Dielektrična konstanta (ϵ_r)	3 - 8 ²⁾	Granična temperatura (°C)	70

Pogonska jačina električnog polja PVC je 2,5 - 3 kV/mm, što ograničava njegovu primenu kao izolacije kablova.

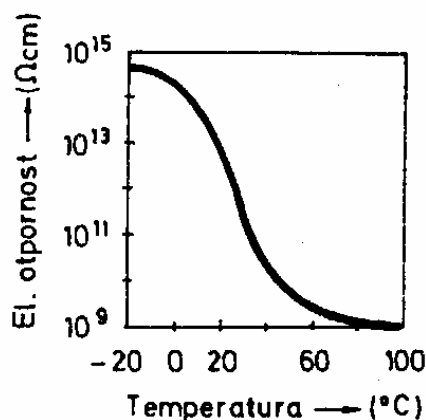
Tab. 7.10. Fizičko - mehaničke osobine PVC-a

Materijal	Gustina g/cm ³	Čvrstoća (N/mm ²)		
		na istezanje	na pritisak	na savijanje
PVC				
meki	1,38	19 - 68	-	-
tvrdi	1,38	40 - 59 ³⁾	68 - 78 ⁴⁾	107



Sl. 7.12. Faktor gubitaka ($\text{tg}\delta$) i dielektrična konstanta (ϵ_r) PVC-a u zavisnosti od temperature.

1 - ϵ_r ; 2 - $\text{tg}\delta$



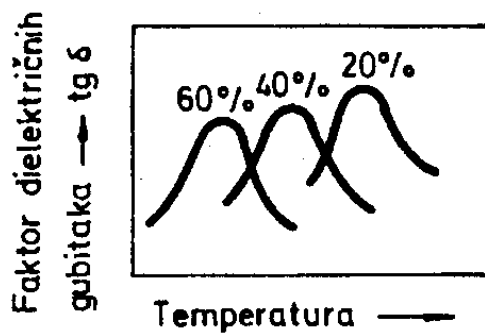
Sl. 7.13. Električna otpornost PVC-a u zavisnosti od temperature

¹⁾ Zavisno od temperature i omekšivača.

²⁾ Zavisno od temperature: za 20 °C $\epsilon_r=3 - 4$; za 70 °C $\epsilon_r=8$.

³⁾ Za spoljašnji plašt kabla se uzima 12,5 N/mm²; za 20 °C 8 N/mm², a za 40-50 °C svega 2 N/mm²

⁴⁾ Za spoljašnji plašt kabla se uzima 5 N/mm²

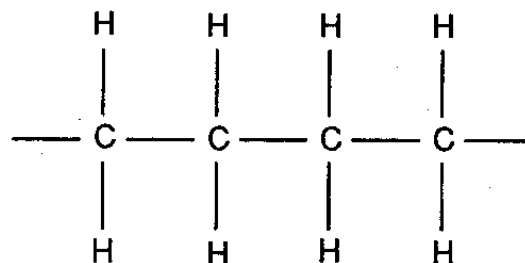


Sl. 7.14. Faktor gubitaka ($\text{tg}\delta$) u zavisnosti od temperature 20%; 40% i 60% - sadržaj omekšivača

7.3.2. POLIETILEN (PE)

Građa PE je vrlo jednostavna i simetrična što govori da se radi o nepolarnom dielektriku. Stoga PE ima male dielektričke gubitke.

Proizvodnja PE iz etilena može se podeliti u dve grupe: polimerizacija pod visokim pritiskom i polarizacija pod niskim pritiskom. Postupkom pod visokim pritiskom dobija se PE niske gustine (LDPE), a pod niskim pritiskom PE visoke gustine (HDPE). LDPE je savitljiv i omekšava na nižoj temperaturi no HDPE koji je krući.



Sl. 7.15. Građa PE

PE je osetljiv na parcijalna pražnjenja (vidi 7.3.6. PARCIJALNA PRAŽNJENJA), te se za napone od 6 kV obavezno predviđaju slaboprovodljivi slojevi preko provodnika i izolacije. Radna jačina električnog polja, baš zbog parcijalnih pražnjenja kod sredjenaponskih kablova, ograničava se na 2 - 5 kV/mm.

PE se smatra zapaljivim, tj. kad se upali sam dalje gori. PE ne propušta vodu, međutim vodenu paru propušta ali ne značajno.

Tab. 7.11. Uporedne osobine LDPE i HDPE ¹⁾

Osobina	LDPE	HDPE
Termoplastičnost	- ²⁾	+
Zatezna čvrstoća	-	+
Otpornost na pucanje	+	-
Otpornost na udar	-	+
Saviljivost	+	-
Skupljanje	+	-

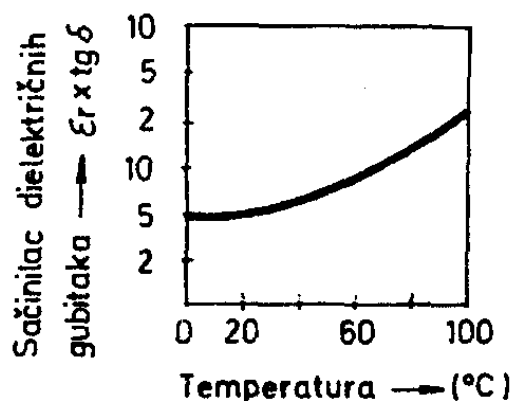
Tab. 7.12. Toplotne i električne osobine PE

Specifični otpor (Km/W)	3,5	Sačinilac gubitaka $\epsilon_r \times \text{tg} \delta$	0,001
Specifična toplota (J/m ³ K)	2,4 × 10 ⁶ (20 °C) 3,7 × 10 ⁶ (80 °C)	Dielektrična čvrstoća (kV/mm)	50 - 70
Faktor gubitaka $\text{tg} \delta \times 10^3$	0,4 - 0,8	Električna otpornost (Ωcm)	> 10 ¹⁷
Dielektrična konstanta ϵ_r	2,3	Granična temperatura (°C)	70 - 80 ³⁾

PE ima izvanredne električne osobine: izdržava nekoliko stotina kV (zavisno od debljine uzorka i trajanja ispitivanja). Tako za debljinu uzorka od 0,5 mm izdržava 200 kV, a za 3 mm oko 100 kV (kratkotrajna dielektrična čvrstoća), da bi se ustalila (za veće debljine) na oko 50 - 60 kV.

Tab. 7.13 Fizičko - mehaničke osobine PE

Vrsta PE	Gustina (g/cm ³)	Čvrstoća (N/mm ²)		
		na istezanje	na pritisak	na savijanje
HDPE	0,94 - 0,98	23 - 30	-	30
LDPE	0,91 - 0,92	10 - 18	5	12



Sl. 7.16. Sačinilac gubitaka ($\epsilon_r \times \text{tg} \delta$) PE-a u zavisnosti od temperature

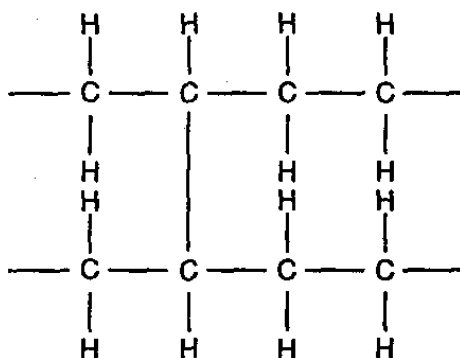
¹⁾ Ove osobine su važeće za zaštitni plašt kabla.

²⁾ + bolja osobina; - lošija osobina.

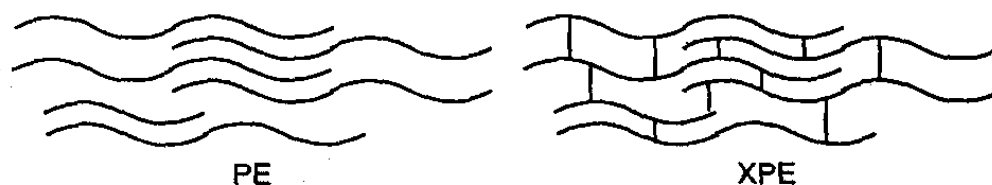
³⁾ Prema IEC 20A - 122 Draft

7.3.3. UMREŽENI POLIETILEN (XPE)

Polietilen ima linearnu molekularnu građu, i njegovi molekuli nisu hemijski povezani, te se lako deformiše pri visokim temperaturama. Molekuli XPE-a su povezani u trodimenzionalnu mrežu i imaju sposobnost da bez deformacija podnose visoke temperature.



Sl. 7.17. Građa XPE



Sl. 7.18. Figurativna predstava molekularnih veza PE i XPE

Postoji više načina za umrežavanje PE. Postupak pomoću peroksida koristi zasićenu vodenu paru (15 - 20 bara na 200 - 220 °C). Ovaj konvencionalni postupak dovodi da se u izolaciji obrazuju i uključi vode (0,30%). Kod radijacionog postupka polimer-lanci se direktno umrežavaju pod dejstvom elektronskog zračenja. Ovde se pri umrežavanju obrazuje gasni produkt - vodonik. Kod postupka koji primenjuje "Sumitomo" - Japan, izolovani provodnik se zagreva infracrvenim zracima u okruženju inertnog gasa (N₂) pod visokim pritiskom. Na ovaj način smanjen je sadržaj vlage više od 10 puta (oko 0,02%). U H.P. "Kablovi" - Jagodina primenjuje se tzv. suvi postupak umrežavanja i predhlađenja u azotu. Pritiskom inertnog gasa u toku umrežavanja obezbeđuje se obrazovanje homogene i kompaktne izolacije, a nastale šupljine se ispunjavaju gasom. Na ovaj način se značajno smanjuje tzv. vodeni "treeing". Da bi se obezbedila simetrična geometrija slojeva i čistoća, proizvodna linija je vertikalna i zatvorenog tipa. Proces izolovanja se izvodi nanošenjem sva tri sloja (dva slabovodljiva sloja i izolacije). Poznat je i hemijski način umrežavanja pomoću siloksana.

Tab. 7.14. Toplotne i električne osobine XPE

Specifični toplotni otpor (Km/W)	2,5	Sačinilac gubitaka $\epsilon_r \times \text{tg}\delta$	$\approx 0,002$
Specifična toplota (J/m ³ K)	$2,4 \times 10^6$ (20 °C) $3,7 \times 10^6$ (80 °C)	Dielektrična čvrstoća kV/mm	50 - 70
Faktor gubitaka $\text{tg}\delta \times 10^3$	0,6 - 1,2	Specifični el. otpor Ωcm	$> 10^{17}$
Dielektrična konstanta ϵ_r	2,3 - 2,5	Granična temperatura °C	90 (130) ¹⁾

Tab. 7.15. Neke fizičko-mehaničke osobine XPE

Gustina (g/cm ³)	Čvrstoća na istezanje (N/mm ²)	Relativno istezanje (%)
0,93	20	250 - 350

7.3.4. ETILEN PROPILEN (EPR)

Etilen propilen pripada grupi elastomera. Pokazuje malu osetljivost na parcijalna pražnjenja. Otporan je na uticaj ozona i sunčevo zračenje. Pokazuje visoku savitljivost pri niskim temperaturama. Do napona 110 kV koristi se u USA i Italiji. Ima povećane dielektrične gubitke u poređenju sa XPE.

Tab. 7.15a. Toplotne i električne osobine EPR

Specifični toplotni otpor (Km/W)	3,5 - 5 ²⁾	Sačinilac gubitaka $\epsilon_r \times \text{tg}\delta$	$\approx 0,015$
Specifična toplota (J/m ³ K)	2×10^6	Dielektrična čvrstoća kV/mm	40 - 85
Faktor gubitaka $\text{tg}\delta \times 10^3$	5 - 6	Specifični el. otpor Ωcm	$10^{14} - 10^{16}$
Dielektrična konstanta ϵ_r	2,7 - 3,2	Granična temperatura °C	90 (130) ³⁾

7.3.5. DUROPLASTI

Duroplasti se odlikuju odličnim mehaničkim osobinama, praktično su netopljivi, stabilnog oblika i sl.

U kablovskoj tehnici se koriste kao epoksidne i poliuretanske smole, i to za nalivanje kablovskih garnitura.

¹⁾ Za tzv. nužni pogon

²⁾ Kablovi do 3 kV - 3,5; kablovi preko 3 kV - 5.

³⁾ Odnosi se i na tzv. nužni pogon.

Tab. 7.16. Osobine epoksidne smole

Osobina	Bez punioca	Sa puniocem
Gustina (g/cm ³)	1,1 - 1,25	1,7 - 1,8
Dielektrična konstanta (ϵ_r)	3,7 - 4,2	5,9
tg δ (%)	0,7 - 0,9	1
Specifični električni otpor (Ω cm)	10 ¹⁵ - 10 ¹⁷	10 ¹⁶ - 10 ¹⁹
Dielektrična čvrstoća (kV/mm)	35 - 40	30 - 35
Čvrstoća na istezanje (N/mm ²)	65 - 80	75 - 80
Čvrstoća na pritisak (N/mm ²)	110 - 130	200 - 220
Čvrstoća na savijanje (N/mm ²)	90 - 120	70 - 90
Temperaturni koeficijent širenja (10 ⁻⁶ /°C)	60	30
Granična temperatura (°C)	105 - 130	120 - 130
Specifični toplotni otpor (W/mK)	0,21	0,6 - 0,8
Upijanje vode (% - težine)	0,1 - 0,3	<0,2

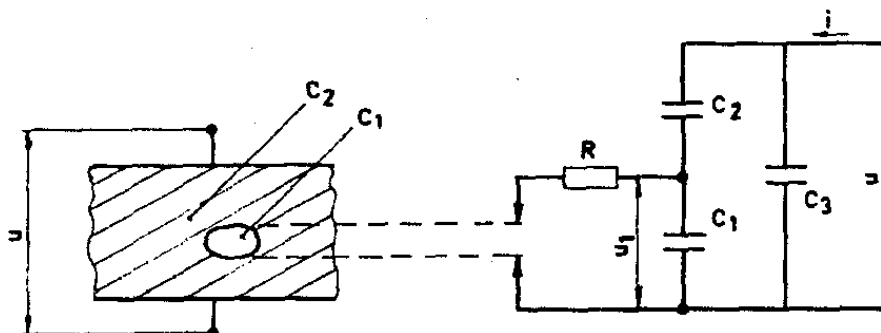
7.3.6. PARCIJALNA PRAŽNJENJA

Smatra se da nivo parcijalnih pražnjenja u "čvrstim" izolacijama verodostojno daju podatke o njenom kvalitetu.

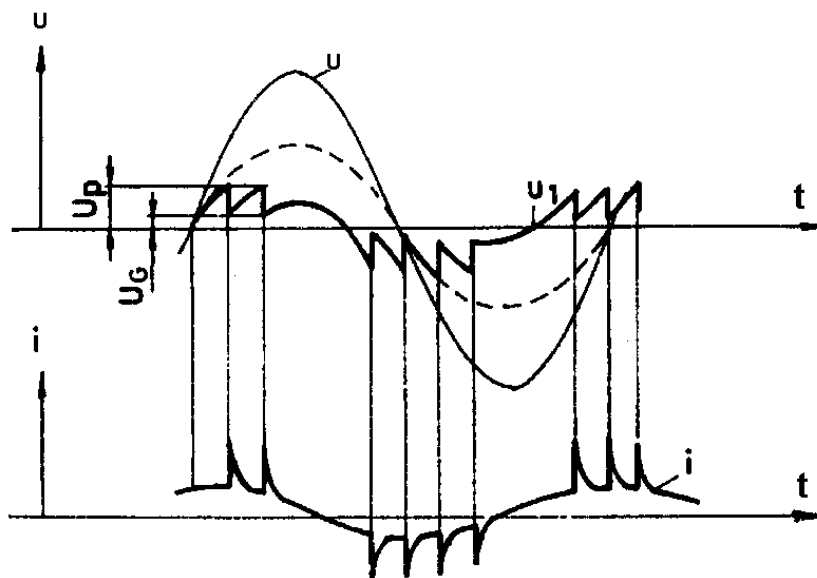
Unutrašnja parcijalna pražnjenja se javljaju u uključcima male dielektrične čvrstoće. Ovi uključci - šupljine mogu sadržavati: gas, vodenu paru, vodu, ulje i sl. Napon pri kome nastaju pražnjenja zavisi od jačine električnog polja u uključku i njegove probojne čvrstoće.

Prisustvo malih količina vlage i postojanje šupljina, nečistoće i neravnina između slojeva kabla (poluprovodni slojevi i izolacija) vode ka obrazovanju figura sličnih krošnji drveta pa se tako i nazivaju u engleskoj literaturi "Water Trees", odnosno nemačkoj "Wasserbaumchen".

"Water Trees" ugrožavaju izolaciju, jer je u prostoru svog postojanja premošćuju. Pod dosad ne sasvim jasnim tumačenjima "Water Trees" prelazi u "Electrical Trees" što neminovno vodi ka električnom probiju. Ovi procesi su dugotrajni pa mogu trajati i više godina.



Sl. 7.19. Električno kolo parcijalnih pražnjenja u izolaciji



Sl. 7.20. Napon šupljine izolacije tokom vremena pražnjenja i ukupna struja

U_P - Napon paljenja u šupljini izolacije, i - ukupna struja kroz izolaciju i
 U_G - Napon gašenja u šupljini izolacije, u_1 - napon šupljine izolacije.

Propisima se određuje dobar kvalitet izolacije sa gledišta parcijalnih pražnjenja, ako pri ispitnom naponu $2U_0$ budu manja od ≤ 5 pC (VDE 0273, 5.45. Teilentladung).

7.3.7. STARENJE POLIMERA

Starenje polimera je u osnovi hemijske prirode i ono ima negativni uticaj na njegove mehaničke i električne osobine. Hemijsko starenje se naročito ubrzava sa porastom temperature. Da bi se hemijsko starenje ograničilo izolaciji se dodaju stabilizatori, odvaja se CU - provodnik (ima dejstvo katalizatora pri oksidaciji) od izolacije tzv. separatorima (to može biti i slaboprovodljivi sloj), spoljašnji plašt kabla ima dodatak radi sprečavanja razarajućeg dejstva ultraljubičastih zraka i sl.

Za ocenu starenja polimera vitalne su dve veličine: vreme i temperatura. Kao krajni kriterijum uzima se mehanička osobina izolacije: prekidno izduženje, 50%.

DIN VDE 0304 daje smernice za određivanje toplotne postojanosti izolacija (DIN IEC 216).

Mikrostruktura polimera pokazuje prisustvo kanala i šupljina koji su ispunjeni gasom, vodom ili nekim drugim nusproduktom proizvodnje izolacije. Jačina električnog polja u tim kanalima i šupljinama se višestruko povećava, te se povećava naprezanje i pritisak u njima. Prostorna električna opterećenja nastala u toku jonizacije šupljine, prodiru u neoštećenu izolaciju, stvarajući tako nove kanale i povećavajući dimenzije postojećih kanala. Kanali se mogu uvećati do oblika kratera kada dolazi do lokalnih parcijalnih pražnjenja. Ovaj fizički model električnog starenja uvodi pojam "napona praga" koji određuje stvaranje električnih opterećenja unutar izolacije i bitno se razlikuje od napona nastajanja parcijalnih pražnjenja.

Električno starenje polimera nastaje zbog nepravilnosti u mikrostrukturi izolacije kada naponsko naprezanje premašuje naprezanje "napona praga".

Raznorodna naprezanja izolacije kabla otežavaju izradu ekvivalentnog matematičkog modela ove kompleksne pojave.

7.4. PAPIR LAMINIRAN POLIPROPILENOM (PPLP - Polypropylen Laminated Paper)

Sa povećanjem napona kabla naglo opada prenos snage zbog velikih dielektričnih gubitaka (srazmerno U^2). Tako se sa naponom 850 kV ne može preneti ni 1 kVA (uljni kablovi).

PPLP izolaciju čine jedna ekstrudovana traka polipropilena koja se nalazi između dve trake papira ukupne debljine 100 - 200 μm . Ovde je svrha papira: štiti polipropilen traku od parcijalnih pražnjenja, mehanički ojačava celu traku, dopušta primenu ulja za popunjavanje šupljina. Sačinilac dielektričnih gubitaka ($\epsilon_r \times \text{tg}\delta$) za PPLP je manji oko 5 puta no kod papira. Impulsna čvrstoća PPLP izolacije veća je za oko 20% no kod impregnisanog papira.

Tab. 7.17. Upredni pregled ϵ_r i $\text{tg}\delta$ papira i PPLP-a

Materijal	ϵ_r	$\text{tg}\delta$
Impregnisani papir	3,5	<ul style="list-style-type: none"> • za jačinu polja: od 5 - 25 kV/mm; 0,0023 - 0,0027 • za temperaturu: od 20 - 90 °C; 0,0022 - 0,0023
PPLP	2,6 - 2,8	<ul style="list-style-type: none"> • za jačinu polja: od 5 - 25 kV/mm; 0,0007 • za temperaturu: od 20 - 90 °C; 0,0007 - 0,001

Tab. 7.18. Strujna opteretljivost uljnog kabla i kabla izolovanog PPLP-om (A)

Vrsta kabla	Napon (kV)					
	200	400	600	800	1000	1200
Uljni kabl-prirodno hlađen	1640	1550	1200	400	0	0
Uljni kabl -indirektno hlađen vodom	1780	1850	1658	1500	1250	850
PPLP kabl-prirodno hlađen	2400	2280	2050	1650	1050	380
PPLP kabl -indirektno hlađen vodom	2600	2580	2400	2200	1900	1600

Podaci: Dubina polaganja kabla 100 cm, osno rastojanje kablova u ravni 30 cm, toplotna otpornost zemljišta 1,2 Km/W, temperatura provodnika 90 °C, a zemljišta 15 °C (prema dijagramu C. A. Arkell; D. R. Edwards u. a.: Development of polypropylene/paper laminate (PDL) oil filled cable for UHV systems - CIGRE 1980., 21 - 04).

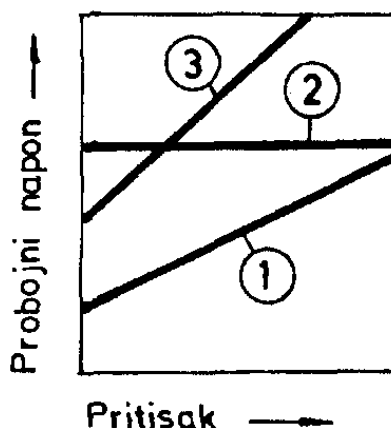
7.5. GASOVI

U kablovskoj tehnici se uglavnom koriste gasovi: elegas (električni gas - SF₆), azot (N₂) i helijum (He). Kao izolacija koristi se gas SF₆.

Gas SF₆ je bez mirisa i boje, negorljiv je, neotrovan i inertan. Vrlo je stabilan, čak i na 500 °C. U slučaju kratke veze stvaraju se produkti raspadanja SF₆ koji su otrovni i ne više inertni. Eventualno prisutna vlaga sa produktima raspadanja stvara fluorovodonik koji deluje razorno na konvencionalne izolacije, kao što su porcelan, papir, staklo i sl. Stoga se za držače, potporne izolatore provodnika u cevima s gasom koriste izolatori od epoksidne smole i sličnih materijala.

Tab. 7.19. Osobine elegasa (SF₆)

Osobina	Vrednost
Gustina pri 1 bar, 0 °C (g/l)	6,5
Specifična toplota pri 1 bar, 25 °C (J/kgK)	665,7
Toplotna provodnost pri 70 °C (W/Km)	0,0158
Dielektrična konstanta (ε _r) pri 4 - 6 bara	≈1
Faktor gubitaka tgδ×10 ³	0,0002
Sačinilac gubitaka ε _r ×tgδ	≈2×10 ⁻⁷



Sl. 7.21. Probajni napon u zavisnosti od pritiska

1 - vazduh; 2 - ulje; 3 - gas SF₆

Tab. 7.20. Relativna dielektrična čvrstoća gasnih dielektrika ¹⁾

Gas	Odnos električnih čvrstoća gasa i vazduha E _{GAS} /E _{VAZ}
Elegas (SF ₆)	2,5
Azot (N ₂)	1,0
Vodonik (H ₂)	0,6
Helijum (He)	0,06

¹⁾ Na osnovu B.Tareev: Physics of Dielectric Materials.

8. SLABOPROVODLJIVI SLOJEVI

Slaboprovodljivi slojevi mogu biti od:

- kombinacije slaboprovodljivog premaza i slaboprovodljive trake,
- kombinacije ekstrudovanog slaboprovodljivog sloja i slaboprovodljive trake i
- ekstrudovanog slaboprovodljivog sloja.

Kod papirnih kablova u cilju upravljanja električnim poljem koriste se:

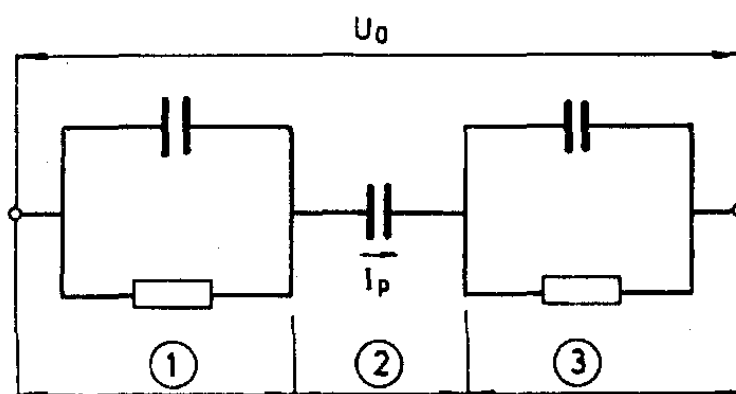
- slaboprovodljivi sloj i
- metalizirani sloj.

Kablovi izolovani sa PE, XPE i EPR napona iznad 6/10 kV moraju imati iznad i ispod izolacije slaboprovodljivi sloj.

Za kablove izolovane impregniranim papirom napona 6/10 kV primena slaboprovodljive trake ili metalizirane trake preko provodnika ili direktno preko "pojasne" izolacije, a ispod metalnog plašta nije obavezna.

Slaboprovodljivi slojevi oko provodnika i izolacije treba dobro da naležu na provodnik, odnosno izolaciju. Da bi se to uspešno ostvarilo primenjuje se ekstruzija slaboprovodljivih slojeva u jednoj tehnološkoj operaciji, zajedno sa ekstruzijom izolacije.

Otpornost slaboprovodljivog sloja se reguliše količinom čađi.



Sl. 8.1. Električna šema izolacije i slaboprovodljivih slojeva
1 - unutrašnji (preko provodnika) slaboprovodljivi sloj; 2 - izolacija;
3 - spoljašnji (preko izolacije) slaboprovodljivi sloj;
 I_p - struja punjenja kabla (faktor gubitaka same izolacije vrlo mali)

Sa porastom otpornosti slaboprovodljivog sloja takođe raste faktor gubitaka ($\text{tg}\delta$), odnosno dielektrični gubici. Međutim, posle neke vrednosti otpornosti, faktor gubitaka počinje da opada.

Prema podacima koje daje Radna grupa 21-09 (CIGRE) gornja granica otpornosti unutrašnjeg slaboprovodljivog sloja je $1000 \Omega\text{m}$, a spoljašnjeg $500 \Omega\text{m}$. Engleski standard ESI-Standard 09-14 za oba sloja daje sledeće uslove:

- novi sloj pri 90°C max. $500 \Omega\text{m}$,
- posle sedmočasovnog starenja na 100°C max. $1000 \Omega\text{m}$.

Praksa je u Nemačkoj da se za najveću vrednost uzima $500 \Omega\text{m}$, bilo da je sloj nov ili izložen starenju. Da bi se izbeglo da prilikom odvajanja slaboprovodljivog sloja od izolacije ne dođe do električnih pražnjenja kao gornja granica otpornosti se uzima $10^2 - 10^4 \Omega\text{m}$.

Prema JUS N.C5.235 propisuje se da otpornost slaboprovodljivog sloja na bazi PE ne sme biti veća od $10^3 \Omega\text{m}$.

Slaboprovodljivi slojevi treba da *odgovaraju JUS N.C0.195 - (mehaničke osobine, zapreminska otpornost na 20°C i zapreminska otpornost na najvišoj radnoj temperaturi)*. Vrste i osobine slaboprovodljivih slojeva propisane su u JUS N.C0.190. Merenje otpornosti ekstrudovanih slojeva, slaboprovodljivog papira i traka kao i otpornosti ekstrudovanih slaboprovodljivih slojeva na kablju dato je u JUS N.C0.036.

9. PLAŠTEVI, ELEKTRIČNE ZAŠTITE I ARMATURE

Pod plaštom se razume: metalni plašt i zaštitni spoljašnji plašt kabla (PVC, PE), bitumenska juta i td.

9.1. METALNI PLAŠTEVI

Metalni plašt kabla štiti kabl od prodora vlage, hemijskih i mehaničkih oštećenja, ograničava električno polje u samom kabl, služi za povratnu vezu struje kratkog spoja.

Za izradu metalnih plašteva kablova uobičajeno se koriste metali: olovo, aluminijum i ređe bakar.

Sve vrste metalnih plašteva ne mogu uvek, zavisno od uslova okruženja i tipa električne mreže, da odgovore pomenutim zadacima, pa se preduzimaju dodatne mere (zaštita od korozije, mehaničkih sila, dodatne Cu trake i sl. za povratak velikih struja kratke veze i sl.).

Već oko 100 godina u elektrotehnici se koristi olovo kao plašt za kablove. Njegova laka obrada i spajanje, savitljivost, plastičnost, vodonepropustljivost, dobra postojanost na različite agresivne sredine učinile su da se i danas uspešno koristi kao omotač kablova, a naročito u opsegu srednjeg napona. Međutim, ono je osetljivo na vibracije i potrese kojom prilikom dolazi do naprslina na njemu. Granica čvrstoće olova pri kratkotrajnom delovanju sile na istezanje se nalazi na oko 1500 N/cm^2 . Pri trajnom delovanju sile na istezanje granična čvrstoća olova brzo opada.

Ciklično naprezanje čisto olovo (na istezanje i pritisak) izdržava oko 10 miliona puta (280 N/cm^2).

Čisto olovo nije upotrebljivo za omotač kablova. Stoga se ono legira bakrom, antimonom, kalajem itd. zavisno od željenog stepena otpornosti na vibracije i potrese.

Tab. 9.1. Uporedne osobine olova i aluminijuma

Osobina	Materijal za plašt		
	Olovo za plašt kabla		Aluminijum za plašt kabla
	Kb-Pb	Legirano	
Gustina (kg/cm ³)	11,34	11,34	2,7
Čvrstoća na istezanje (N/mm ²)	13 - 18	16 - 26	55 - 65
Izduženje do kidanja (%)	40 - 50	25 - 35	25 - 30
Tvrdoća po Brinell-u (N/mm ²)	40 - 50	50 - 65	160 - 180
Granica zamora (N/mm ²)	4,3	8,6	23,3
Temperatura topljenja (°C)	327	327	658
Specif. el. otpor - 20 °C (Ωmm ² /km)	214	214	28,45
Specif. toplotna provodnost (W/Km)	34,8	34,8	218
Specifična toplota (J/m ³ K)	1,45×10 ⁶	1,45×10 ⁶	2,5×10 ⁶
Temperaturni koef. el. otpora - 20 °C (1/K)	4,0×10 ⁻³	4,0×10 ⁻³	4,03×10 ⁻³

Prema DINE 1764, 1712; IEC 287

Našim nacionalnim standardima regulisan je kvalitet olova odnosno njegovih legura za izradu olovnih omotača kablova (JUS C.E1.040). Njime se predviđa da se za izradu legura za olovne omotače kablova može upotrebiti samo rafinisano olovo dobijeno iz ruda redukcijom i rafinacijom. Posebno se zabranjuje korišćenje olova koje se dobija pretapanjem.

Tab. 9.2. Sastav olova (čistoće 99,94) za plašt kablova

Upotreba	Vrste olova	
	Kablovsko olovo Kb-Pb	Telur-olovo legirano (Kb-Pb Te 0,04)
	Slabo legirani Pb	Za kablove izložene jakim potresima
Pb legirano (% težine)		
Cu	0,03 - 0,05	0,03 - 0,05 ¹⁾
Sb	-	-
Sn	²⁾	-
Te	-	0,035
Pb	ostatak do 100%	ostatak do 100%
Dozvoljene primese (% težine)		
Ag		0,001
As		0,001
Bi		0,050
Fe		0,001
Mg		0,001
Sb		0,005
Sn		0,005
Zn		0,001

¹⁾Može se odustati od Cu

²⁾Može imati Sn do 0,05%

Prema DIN 17640 i DIN 1719

U Velikoj Britaniji sastav legura otpornih na vibracije regulisan je standardom - B.S.801:1953.

Tab. 9.3. Legure olova za izradu plašta kablova

Vrsta olova i olovnih legura	Oznaka	Obavezni sadržaj (%)			Hemijski sastav (%) dozvoljene nečistoće (najviše)								Ukupno drugih elemenata
		Cu	Sn	Sb	Ag	Bi	Cu	Zn	Fe	Mg	SbSn	As	
Rafinisano olovo A ^{1), 2), 3)}	EPb 99 %	-	-	-	0,001	0,05	0,05	0,001	0,002	0,001	0,005	0,001	0,01
Olovna legura sa Cu B ^{1), 4)}	EPb Cu	0,03 do 0,05	-	-	0,001	0,10	-	0,001	0,002	0,001	0,005	0,001	0,01
Olovna legura sa Sn i Al D ^{2), 5)}	Epb Sn Sb	-	0,35 do 0,45	0,15 do 0,25	0,003	0,05	0,05	0,001	0,002	0,001	-	0,001	0,01

Prema JUS C. E1. 040

¹⁾ Poručilac može zahtevati da rafinisano olovo, odnosno olovna legura sa bakrom sadrži antimona 0,01 do 0,15 % i kalaja do 0,02 %.

²⁾ Poručilac može zahtevati da rafinisano olovo, olovna legura sa antimonom i olovna legura sa kalajem i antimonom sadrži bakra do 0,05 %

³⁾ Vrlo meko. Za posebne svrhe gde se zahteva veoma mek i plastičan plašt, a može se tolerisati slaba otpornost protiv zamora.

⁴⁾ Vrlo meko. Za opštu upotrebu. Ima veći otpor, protiv zamora, korozije, savijanja i vibracija nego rafinisano olovo.

⁵⁾ Meka. Veoma otporna protiv zamora, vremenski ne otvrdnjava. Upotreba za izradu plašta brodskih kablova.

U SSSR-u se za kablove koji se koriste za normalne uslove (bez vibracija) koristi olovni omotač oznake C-3 (sadrži čistog olova ne manje od 99,95 % i primesa magnezijuma, arsenika i gvožđa ne više od 0,01 %). Kablovi s ovakvim omotačem moraju biti zaštićeni čeličnim trkama ili žilicama, jer pri mehaničkim naprezanjima kabla dolazi do hladnog tečenja olova. Ova vrsta olovnog omotača nije otporna na vibracije i toplotna naprezanja, te se na njemu javljaju pukotine. U cilju povećanja otpornosti olovnog omotača na vibracije olovu se dodaje antimon. Kod uljnih kablova i kablova pod pritiskom da bi se otklonilo hladno tečenje olova dodaje se 0,08 % bakra. Kalaj u sadržaju od 0,06 do 0,12 % dodaje se da bi se postigla ravnomerna raspodela bakra u olovu.

U SAD je vrlo rasprostranjeno korišćenje olovne legure za omotače kablova sa dodatkom 0,15 % srebra, 0,1 % kalaja, 0,1 % bizmuta ili legure olova sa 0,1 do 0,17 % srebra, 0,1 % kalaja i 0,04 do 0,06 % bakra. Za omotače kablova sa papirnom izolacijom, gumenom izolacijom, gasne i uljne kablove primenjuje se olovni omotač s dodatkom 0,006 % bakra. Za povećanje otpornosti olovnog omotača kabla na vibracije, olovu se dodaje 0,18 do 0,20 % srebra, 0,13 do 0,14 % kalaja, 0,06 do 0,08 % bizmuta i 0,07 do 0,10 % telura. Za energetske kablove koji se polažu nadzemno primenjuje se legura sa dodatkom do 0,1% antimona.

Kvalitet aluminijuma se određuje prema JUS C.C1.100 i DIN 1712. Debljine metalnih plašteva kablova određuje JUS N.C5.020 i kreću se za olovni plašt od 1,2 do 3,7 mm, a za aluminijum od 0,6 do 1,5 mm zavisno od računskog prečnika jezgra kabla. U normalnim okolnostima Al-plašt ne zahteva mehaničku zaštitu. Al-plašt može imati kod niskonaponskih kablova ulogu "0" provodnika, te je neobično važna njegova zaštita od korozije (višeslojna zaštita bitumenom).

Tab. 9.4. Ponašanje metala u raznim sredinama

Sredina	Metali						
	Al	Al eloksiran	Pb	Fe	Cu	Zn	Sn
Atmosfera	1	1	1	2	2	1	1
Morski vazduh	4	2	2	3	4	3	2
Dimni gas	1	1	1	3	4	3	1
Suvi hlor	1	1	1	1	2	2	1
Vlažni hlor	5	5	3	5	5	5	4
Sumpordioksid	1	1	1	5	4	4	1
Destilisana voda	3	1	3	4	2	3	1
"meka" voda	3	1	5	3	2	5	1
"tvrda" voda	1	1	1	2	2	1	1
Morska voda	4	2	2	4	4	5	3
Kisela voda	3	2	1	4	5	4	2
Hlorisana voda	5	5	3	5	5	5	4
Gips	3	2	2	3	2	4	2
Cement	4	4	4	1	2	4	2

obro postojan;

ovoljno postojan;

is primenljiv;

amo uslovno primenljiv; 5-neprimenljiv.

9.2. ZAŠTITNI SPOLJAŠNI PLAŠTEVI

Polivinilhlorid (PVC) ima visoku čvrstoću na istezanje, pritisak u širokom temperaturnom opsegu, postojan je u zemljištu, otporan na plamen i postojan na starenje.

Polietilen (PE) nekoliko desetina puta manje upija vodu od PVC-a, te se koristi kao spoljašnji plašt kod srednjenaponskih i visokonaponskih kablova. Prema DIN VDE 0273 preporučuje se korišćenje PE plašta. Ima visoku čvrstoću, ali ima i mana: gorljiv je, na njega ne prijanjaju lako izolacioni materijali kablovskih glava i spojnice i podužno se skraćuje pri zasecanju.

Poliamid (PA) iako ima loše dielektrične osobine koristi se za spoljašnji plašt kablova u teškim uslovima, jer je vrlo otporan na abanje, vrlo je žilav a otporan je na organske rastvore (benzin i sl.).

Nitril-butadijen - kaučuk (NBR) se koristi za plašteve kablova koji se trajno nalaze u ulju.

Za izradu plašta otpornog na hladnoću, toplotu i dejstvo plamena koristi se polihloropen (CR).

Kao osnovni materijal za izradu plašteva tzv. negorljivih plašteva koriste se olefinkopolimeri. To su kablovi sa usporenim gorenjem i nekorozivnim dimnim gasom (Flame - Retardent, Non Corrosive).

Antikoroziorna zaštita nože biti od višeslojne bitumenske jute. Ona takođe može imati sledeći sastav: više slojeva bitumeniziranog papira i jedan sloj impregnisane jute sa međuslojem od asfalta. "Pojasni" kablovi sa Pb plaštom i čeličnim trakama imaju sledeće zaštite: posle Pb plašta nekoliko slojeva bitumeniziranih vlakana sa međuslojevima od bitumen-kompaunda koji služe kao jastuk za čelične trake, a površ čelične trake bitumenizirana juta sa trakom od krede (sprečava međusobno lepljenje na bubnju).

Tab. 9.5. Uporedne osobine PVC i PE

		Osobina	PVC	PE	Primedba	
INSTALISANJE	polaganje	Mehanička otpornost	0	+	$\sigma_{ppvc} / \sigma_{ppe} = 15 / 25 \text{ MPa}$ $\lambda_{pvc} / \lambda_{pe} = 150 / 300 \%$	
		Abrazija pri vučenju kabla preko neregularnog tla, stena ...	+	-	Tvrđi PE prenosi naprezanje na unutrašnje slojeve.	
		Otpornost na oštećenje usled obrušavanja kamena, stena, ...	0	+	Tvrdoća po Shore - D	
		Otpornost na oštećenja kod zemljanih radova	+	0	zavisno od gustine PE	Ispitivanje udarom alata za kopanje
		Naprezanje pri savijanju	+	0		
		Sile trenja pri uvlačenju u cev	0	+	$K_{TPVC} / K_{TPE} = 1,2$; za manje vučne sile ne smeju se koristiti lubrikanti koji sadrže mineralna ulja ili deterđente, samo specijalni lubrikanti.	
		Polaganja sa motornim valjcima	0	+	Zbog manjeg K_T treba se koristiti više valjaka kod PE.	
spajanje	Adhezija za ostale materijale	+	-	PE ne prijanja za nalivene smole, potrebna je obrada površine ili primena elastičnih elemenata		
	Skidanje PVC, odnosno PE	+	0	Za PE se koristi odgovarajući alat		
	Popravka	+	-	Toploskupljajuće cevi		
ambijent	Otpornost na ultraljubičaste zrake	+	+	Obavezno crn plašt, sa 2,4 % čađi		
	Upijanje vode	-	+	Absorpcija PE $\approx 0,1 \%$ absorpcije PVC-a		
	Širenje plamena	0	-	PE nasuprot PVC-u nema emisiju hidrogen hlorida kao prigušivača plamena.		
	Otpornost na hemikalije	0	+			
EKSPLOATACIJA	termičke osobine	Rad pri pogonskoj temperaturi provodnika (90 °C) i kratkom spoju (250 °C)	0	+		
		Rad pri kratkotrajnom preopterećenju (130 °C)	-	-		
		Kratak spoj za električnu zaštitu (350 °C)	0	+		
		Skupljanje	+	-	Kod kablovskih glava i spojnica.	
električne osobine	U slučaju kvara	0	+	Dielektrična čvrstoća vlažnog PVC plašta može opasti do 1/3 vrednosti suvog plašta.		

K_T - koeficijent trenja; σ - naprezanje na pritisak; λ - izduženje do kidanja; (+) - bolja osobina; (-) - lošija osobina; (0) - zadovoljavajuća osobina

9.3. ELEKTRIČNE ZAŠTITE

Kablovi sa izolacijom od PE, XPE EPR i sl. imaju električnu zaštitu od metalnih žičanih traka (Cu ili Al) postavljenih preko jezgra kabla ili preko žila kabla (vidi 3. Definicija konstruktivnih elemenata kabla). Funkciju električne zaštite mogu imati i metalni plaštevci (Pb i Al) kod papirnih, pojasnih i sličnih kablova. Svrha električne zaštite je: da ograniči električno polje unutar kabla, da odvodi struje odvoda i jednopolnog kratkog spoja, da smanji uticaj na telekomunikacione vodove.

Kablovi nazivnog napona 3,6/6 kV i više moraju imati električnu zaštitu. Naši standardi (JUS N.C5.230 za PE i XPE, JUS N.C5.240 za EPR) navode da zaštita mora biti od bakra. Njen presek se kreće od 10 do 35 mm² zavisno od preseka provodnika kabla.

Za kablove sa izolacijom od PVC za nazivne napone veće od 0,6/1 kV moraju imati električnu zaštitu. Koncentrični provodnik preseka 6 mm² i većeg može imati ulogu električne zaštite. Armatura može takođe imati ulogu električne zaštite ako joj otpor nije veći od 3,03 Ω/km na 20 °C (JUS N.C5.220).

Prema JUS N.C5.020 (Papirni kablovi) električna zaštita je slabovodljivi ili metalizirani sloj (za U₀ veći od 6 kV) preko izolacije.

9.4. ARMATURE

Armatura kabla postavlja se preko unutrašnje zaštite kabla, a izrađena je od čelične trake, okruglih ili profilisanih žila. Armatura jednožilnih kablova izrađena je od nemagnetnih metala i legura (naprimer Al legura). Mere armatura date su u JUS N.C5.020, JUS N.C5.230, JUS N.C5.240 i JUS N.C5.220).

Kod pojasnih papirnih kablova postavljaju se dve čelične trake, tako da gornja traka zatvara međuprostor između donjih traka. Kod kablova koji su izloženi povećanim mehaničkim naprezanjima, armatura je izrađena od pocinkovanih čeličnih žica.

Tab. 9.6. Specifični električni otpor i temperaturni koeficijent čelika

Materijal	Specifičan električni otpor na 20 °C (Ω/m)	Temperaturni koeficijent na 20 °C (1/K)
Čelik	13,8×10 ⁻⁸	4,5×10 ⁻³
Nerđajući čelik	70,0×10 ⁻⁸	zanemarljiv