

Примери термичких проблема и практичних поступака из електроенергетике

1. Полагање каблова у ров

Изводи из документа ТПЗ

http://www.epsdistribucija.rs/interni_standardi/preporuke/Tr03N12.pdf

уз пратеће коментаре

Техничка препорука бр.3

Основни технички захтеви за избор и монтажу енергетских каблова и кабловског прибора у електродистрибутивним мрежама 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV и 110 kV

V издање

новембар 2012.

Извод из ТПЗ је одабран тако да повеже принципе теорије преноса топлоте разматране у претходном делу курса и начине како се релевантне температурне појаве третирају у инжењерској пракси. Пожељно је да се у пракси користе методе и поступци који су једноставни за примену. Примена комплекснијих и тачнијих поступака по правилу значи да су они имплементирани у наменским софтверским алатима. Фокус овог извода из ТПЗ је на фактору k_{op} , чија је суштина да уважи чињеницу да постоји кашњење промене температуре за променом оптерећења, као и чињеницу да је старење зависно од температуре изолације.

24.2 **Струјно оптерећење у стационарном режиму** треба да буде ограничено тако да топлота произведена у кабловском воду буде одведена у околину и да се не прекорачи максимална дозвољена температура проводника (за ХРЕ кабл: 90 °C).

Дозвољено струјно оптерећење кабловског вода I_{doz} [A] рачуна се према емпиријском изразу који се користи за рутинске инжењерске прорачуне:

$$I_{doz} = k_{op} \cdot k_{\theta t} \cdot k_{\rho t} \cdot k_{bk} \cdot I_{nd}$$

где је:

k_{op} = сачинилац промене дозвољеног струјног оптерећења I_{doz} од фактора оптерећења (фактор испуне) m дневног дијаграма оптерећења, чије су вредности за стално (100%) оптерећење и за променљиво (дистрибутивно) оптерећење дате у тачкама 24.6 и 24.7, односно у табели 24.7;

$k_{\theta t}$ = сачинилац промене дозвољеног струјног оптерећења I_{doz} од температуре тла θ_t на дубини полагања кабловског вода, и у опсегу $+5\text{ °C} \leq \theta_t \leq +25\text{ °C}$ рачуна се према изразу (тачка 24.3): $k_{\theta t} = 1 + 0,007 \cdot (\theta_{ref} - \theta_t)$;

$k_{\rho t}$ = сачинилац промене дозвољеног струјног оптерећења I_{doz} од специфичне топлотне отпорности тла ρ_t , тачка и табела 24.4;

k_{bk} = сачинилац промене дозвољеног струјног оптерећења I_{doz} од броја кабловских водова b_k у рову и њиховог међусобног удаљења "а", тачка и табела 24.5;

I_{nd} = назначена вредност дозвољеног струјног оптерећења кабловског вода у [A], која је утврђена (прорачуната) за променљиво (дистрибутивно) оптерећење и референтне услове дате у тачки и табели 24.7.

24.6 **Фактор оптерећења (фактор испуне) m** дневног дијаграма оптерећења је однос средњег и максималног оптерећења и износи $m = 1$ за стално (100%) оптерећење, док **за променљиво (дистрибутивно, циклично) оптерећење износи:**

- $m = 0,7$ за конзум који се напаја из НН и СН мреже, и то одговара дијаграму оптерећења са смењивањем максималног оптерећења у трајању 6 сати, са оптерећењем у висини 60% максималног оптерећења у наредних 18 сати;
- $m = 0,80$ за конзум који се напаја из 110 kV мреже, и то одговара дијаграму оптерећења са смењивањем максималног оптерећења у трајању 6 сати, са оптерећењем у висини 73% максималног оптерећења у наредних 18 сати.

$$(1 \cdot 6 + 0.6 \cdot 18) / 24 = 0.7$$

$$(1 \cdot 6 + 0.73 \cdot 18) / 24 = 0.8$$

24.7 **Назначене вредности дозвољеног струјног оптерећења I_{nd} [A]** кабловског вода дате су у табели 24.7 за референтне услове: температура тла $\theta_t = \theta_{ref} = 20$ °C, специфична топлотна отпорност тла $\rho_t = 1$ K·m/W (за кабл 110 kV: $\rho_t \leq 1,2$ K·m/W), дубина полагања $h = 0,7$ m ($h = 1$ m за кабл 35 kV; $h = 1,2$ m за кабл 110 kV), један кабл у рову ($b_k = 1$), **променљиво (дистрибутивно) оптерећење** фактора испуне: **$m = 0,70$ за НН и СН мрежу и $m = 0,80$ за мрежу 110 kV**, са уважавањем утицаја циркулационих струја у електричним заштитима на умањење вредности I_{nd} .

У табели 24.7 су вредности I_{nd} [A] за НН и СН кабловске воде преузете од произвођача, док су вредности I_{nd} [A] за вод изведен каблом 64/110 kV типа ХНЕ 49-А прорачунате према IEC 60853-2, за референтне услове дате у овој табели.

Закључак: избором кабловске постелице према тачки 10.6, референтне температуре тла која одговара температури тла у летњем периоду, типског пресека кабла и назначене вредности дозвољене струје I_{nd} [A] према табели 24.7, искључује се могућност појаве исушивања тла око енергетског кабла.

Табела 24.7: Назначене вредности дозвољеног струјног оптерећења I_{nd} [A] кабловског вода изведеног кабловима са Al проводницима, за променљиво (дистрибутивно, циклично) оптерећење

Пресек Al проводника кабла [mm ²]	Назначена вредност дозвољене струје I_{nd} [A]						
	НН кабл		СН кабл				кабл 64/110 kV
	PVC	XPE	6/10 kV ; 12/20 kV		20/35 kV		
		NPO	XPE	NPO	XPE	XPE	
50	141	157	-	-	-	-	-
95	211	233	190	262	185	253	
150	270	300	250	333	235	321	
240	-	-	325	436	305	419	
630	-						726
800	-						797
1000	-						878

$\theta_{ref} = 20$ °C; $\rho_t = 1$ K·m/W; $b_k = 1$. Нема исушивања тла око кабла.
 $h = 0,7$ m за каблове до 20 kV; $h = 1$ m за кабл 35 kV и $h = 1,2$ m за кабл 110 kV;
 фактор оптерећења (испуне): $m = 0,70$ за НН и СН мрежу;
 фактор оптерећења (испуне): $m = 0,80$ за 110 kV мрежу.
 PVC (XPE) НН кабл: PP00-AS (XP00-AS итд.);
 NPO кабл: трожиљни (NPO 13-AS, NPZO 13-A итд.);
 XPE кабл: три једножилна СН или 110 kV кабла у троугластом снопу (ХНЕ 49-А).
 Напомена: | За стално (100%) оптерећење вредности струја из ове табеле
 | треба помножити са сачиниоцем:
 | $k_{op} = 0,75$ за НН и СН каблове и $k_{op} = 0,91$ за 64/110 kV кабл. |

k_{op} се примењује у случају сталног (100%) оптерећења, док је за горе специфицираним двостепене дневне дијаграме за НН и СН каблове (код којих је било $m = 0.7$) и за за ВН каблове (код којих је било $m = 0.8$), $k_{op}=1$.

10 ПРЕПОРУКЕ ЗА ДИРЕКТНО ПОЛАГАЊЕ ЕНЕРГЕТСКИХ КАБЛОВА У ЗЕМЉУ

- 10.6 **Енергетски кабл се полаже тако да буде у слоју постелице** која се ставља на дно кабловског рова (инсталациона зона рова). **Дебљина кабловске постелице** износи најмање 0,2 m за НН и СН каблове (сл.10.8), односно најмање 0,7 m за кабл

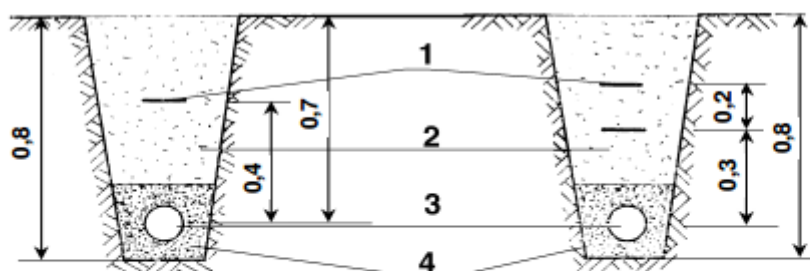
64/110 kV (сл.10.10). За набијање слоја кабловске постелице користе се искључиво ручни набијачи.

а) Кабловска постелица за НН и СН каблове:

За стандардну кабловску постелицу користи се мешавина песка и шљунка који имају добре карактеристике одвођења топлоте (висок садржај кварца) гранулације до 4 mm (на пример: песок "Моравац").

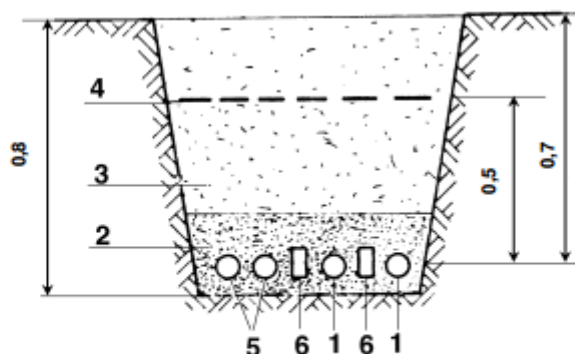
У случају тешких услова одвођења топлоте и опасности од исушивања тла, на пример: при полагању више каблова у исти ров (сл.10.8в) или приближавању топловоду, **треба обавезно применити постелицу од специјалних мешавина** чија специфична топлотна отпорност ρ_p [K·m/W] што мање зависи од садржаја воде, на пример: **мешавина 85% шљунка и песка високог садржаја кварца са 15% млевеног кречњака, мешавина песка и цемента** итд. Специјална мешавина се примењује и у условима лоше специфичне топлотне отпорности тла (песак), ако се покаже да је то повољније решење у односу на смањење дозвољених оптерећења (поглавље 24, пример 1), или на повећање пресека вода (тачка 7.1).

Уситњена и просејана (окце сита 4 mm x 4 mm) земља се користи изузетно и то само у оним подручјима у којима је земљиште "здравица" (насуто земљиште, без грађевинских отпадака и сл.). Гранулација је битна због контактнoг топлотног отпора.



- а) на регулисаним површинама б) на нерегулисаним површинама
1 упозоравајућа трака; 2 земља набијена у слојевима (испуна);
3 кабл; 4 кабловска постелица.

Сл.10.8 Директно полагање енергетског НН и СН кабла у земљу



- 1 СН кабл; 2 кабловска постелица од специјалне мешавине; 3 земља набијена у слојевима (испуна); 4 упозоравајућа трака; 5 НН каблови; 6 опека.

Сл.10.8в Директно полагање више НН и СН каблова у исти ров

Квалитативна зависност отпора преносу топлоте провођењем између електропроводног дела кабла и референтне тачке у тлу (D_{ref}):

- Са постелицом (индекс p):

$$R_l^T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{D_s}{D_u}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} \cdot \ln\left(\frac{D_p}{D_s}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} \cdot \ln\left(\frac{D_{ref}}{D_p}\right)$$

- Без постелице:

$$R_l^T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{D_s}{D_u}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_z} \cdot \ln\left(\frac{D_{ref}}{D_s}\right)$$

λ_i Специфична топлотна проводност изолације кабла (израз прецизно важи за једножилни кабл)

λ_p Специфична топлотна проводност материјала постелице

λ_z Специфична топлотна проводност тла (земље)

D_p Пречник (пречник круга чији је обим једнак обиму пресека спољашње површи стварне постелице). Начин на који би се тачније одредио топлотни отпор за стварну геометрију постелице, круг у правоугаонику објашњен је у лабораторијској вежби 3.

4. Toplovod (sl. 4.27)

Najmanje horizontalno rastojanje između kablovskih vodova i spoljne ivice kanala za toplovod mora da iznosi 1,0 m.

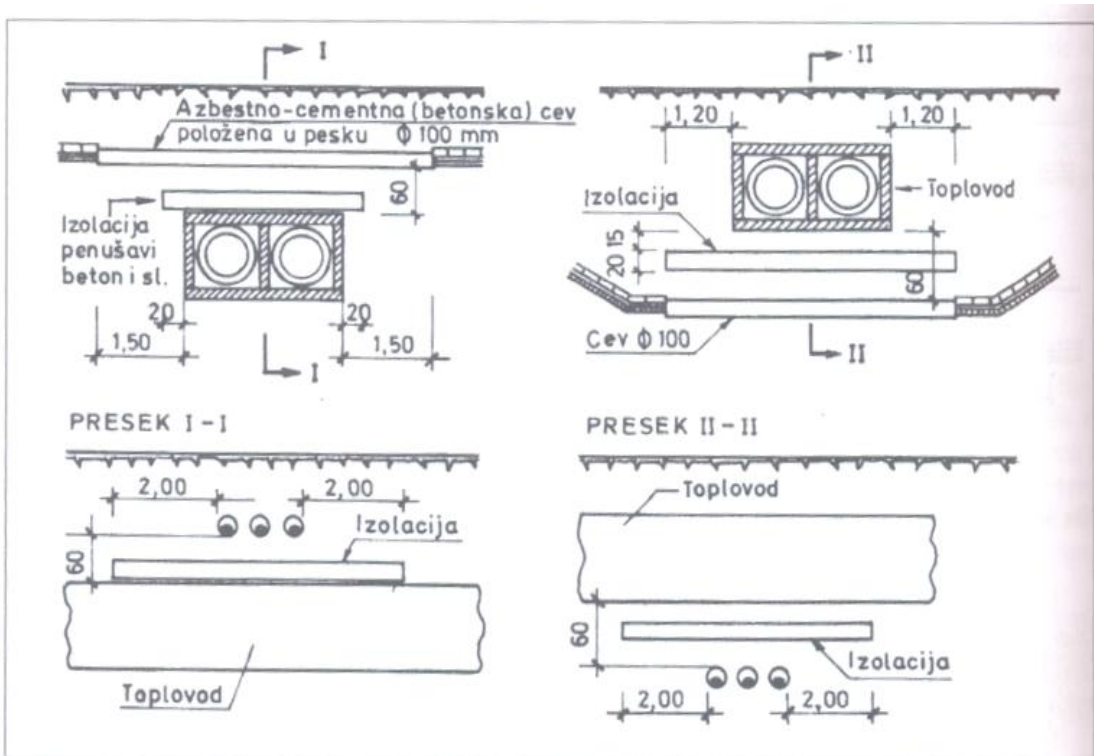
Polaganje energetskih kablovskih vodova iznad kanala toplovoda nije dozvoljeno.

Pri ukrštanju energetskih kablovskih vodova sa kanalima toplovoda, minimalno vertikalno rastojanje mora da iznosi 60 cm. Energetski kablovski vod po pravilu treba da prelazi iznad kanala toplovoda, a samo izuzetno, ako nema drugih mogućnosti, može preći ispod toplovoda.

Na mestima ukrštanja energetskih kablovskih vodova sa kanalima toplovoda, mora se između kablova i toplovoda obezbediti toplotna izolacija od penušavog betona ili sličnog izolacionog materijala debljine 20 cm.

Na mestu ukrštanja kablovski vodovi se polažu u azbestnocementne cevi unutrašnjeg prečnika Φ 100 mm, čija dužina mora sa svake strane da premašuje širinu kanala toplovoda najmanje za 1,5 m.

Dimenzije sloja toplotne izolacije treba da budu takve da on pokriva kanal toplovoda najmanje za 2,0 m sa svake strane od spoljnih ivica azbestnocementnih cevi kroz koje su provučeni kablovski vodovi, a da je širi od širine kanala bar za 20 cm sa svake strane, ako kablovski vod prolazi iznad toplovoda odnosno 1,20 m sa svake strane ako kablovski vod prolazi ispod toplovoda.



Slika 4.27. Ukrštanje kablovskog voda sa kanalom toplovoda

2. Оптеретљивост самоносивог кабловског снопа при различитим амбијенталним условима

Карактеристични садржаји документа

ТЕХНИЧКА ПРЕПОРУКА број 8 Б: ТЕХНИЧКИ ЗАХТЕВИ ЗА СРЕДЊЕНАПОНСКЕ ДИСТРИБУТИВНЕ НАДЗЕМНЕ ВОДОВЕ ИЗВЕДЕНЕ САМОНОСЕЋИМ КАБЛОВСКИМ СНОПОМ

http://www.epsdistribucija.rs/interni_standardi/preporuke/TP%208b%20-%20I%20izdanje.pdf

Слика 6.0, страна 19 - изглед и конструкција СКС

Дозвољено струјно оптерећење

стр. 43 - 52

Термички модел, базиран на базним законима преноса топлоте, на основу кога се може израчунати температура изолације до електропроводног дела СКС-а у стационарном топлотном стању, разматра се у задатку 20 – материјали за рачунске вежбе – део за први колоквијум.

3. Загревање проводника током трајања кратког споја (квара)

Напомена: на овом математичком моделу је заснована метода за проверу загревања електроенергетских водова из стандарда ИЕС 60865 (дозвољена термичка струја).

Један електрични проводник је начињен од бакра, чија специфична електрична отпорност на 20°C износи $\rho_{20}=1.7\times 10^{-8}\ \Omega\text{m}$, а коефицијент њеног линеарног пораста са температуром $\alpha_{\text{Cu}20}=3.9\times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$: $\rho=\rho_{20}(1+\alpha_{\text{Cu}20}(\vartheta-20))$. Површина кружног попречног пресека изолованог проводника износи $S_{\text{Cu}}=263.25\ \text{mm}^2$. При протицању константне номиналне струје кроз проводник, његова устаљена температура износи $100\ ^{\circ}\text{C}$. Колико износи једносекундна струја кратког споја, који настаје у устаљеном номиналном радном режиму, при којој температура изолације неће прећи $180\ ^{\circ}\text{C}$. Занемарити ефекат потискивања струје у проводнику и сматрати да је термички процес по настанку кратког споја адијабатски. Густина бакра износи $\rho_{\text{Cu}}=8900\ \text{kg/m}^3$, а специфични масени топлотни капацитет $c_{p\ \text{Cu}}=390\ \text{J/(kg K)}$.

Решење:

Пошто се термички процес по настанку кратког споја сматра адијабатским, занемарује се снага којом се топлота размењује са околином у току кратког споја и сматра да се целокупна топлотна енергија генерисана у том периоду акумулира у проводнику. Оваква претпоставка је при проверама загревања у току кратког споја на страни сигурности, тј. стварно загревање проводника у току кратког споја ће бити (занемарљиво мало) мање од тако израчунатог.

Снага којом се топлотна енергија акумулира у бакру једнака је снази којом се топлота генерише услед Џулових губитака.

$$P_{\text{akum}} = P_{\text{gen}} \quad (0.1)$$

Подужна снага којом се топлотна енергија генерише у проводнику дата је изразом

$$P_{\text{gen}} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{\text{Cu}20} \cdot (\vartheta_{\text{Cu}} - 20)) \cdot \frac{I^2}{S} \quad (0.2)$$

Подужна снага којом се енергија акумулише у проводнику дата је изразом

$$P_{\text{akum}} = C_{\text{Cu}}^T \cdot \frac{d\vartheta_{\text{Cu}}}{dt} \quad (0.3)$$

Подужни топлотни капацитет проводника је једнак

$$C_{\text{Cu}}^T = \rho_{\text{Cu}} \cdot S \cdot c_{p\ \text{Cu}} = 913.741 \frac{\text{J}}{\text{mK}} \quad (0.4)$$

Из претходник израза се добија диференцијална једначина која описује промену температуре бакарног проводника. То је уједно и температура најтоплијих тачака изолације (тачке на унутрашњој површи изолације уз сам проводник).

$$C_{\text{Cu}}^T \cdot \frac{d\vartheta_{\text{Cu}}}{dt} = \rho_{20} \cdot (1 - 20 \cdot \alpha_{\text{Cu}20}) \cdot \frac{I^2}{S} + \frac{\rho_{20} \cdot \alpha_{\text{Cu}20} \cdot I^2}{S} \cdot \vartheta_{\text{Cu}} \quad (0.5)$$

Једначина (0.5) се може представити у следећем облику:

$$\frac{d\vartheta_{\text{Cu}}}{dt} - \frac{1}{\tau} \cdot \vartheta_{\text{Cu}} = \frac{1}{\tau \cdot \alpha_{\text{Cu}20}} \cdot (1 - 20 \cdot \alpha_{\text{Cu}20}), \quad \tau = \frac{S \cdot C_{\text{Cu}}^T}{\rho_{20} \cdot \alpha_{\text{Cu}20} \cdot I^2} \quad (0.6)$$

$$\frac{d\mathcal{G}_{Cu}}{\mathcal{G}_{Cu} + \frac{(1-20 \cdot \alpha_{Cu20})}{\alpha_{Cu20}}} = \frac{dt}{\tau}$$

Интеграцијом једначине (0.6) у границама $[\mathcal{G}_{nom}, \mathcal{G}_{max}]$, односно $[0, t^*]$, добија се

$$\int_{\mathcal{G}_{nom}}^{\mathcal{G}_{max}} \frac{d\mathcal{G}_{Cu}}{\mathcal{G}_{Cu} + \frac{(1-20 \cdot \alpha_{Cu20})}{\alpha_{Cu20}}} = \int_0^{t^*} \frac{dt}{\tau}$$

$$\ln \left(\frac{\mathcal{G}_{max} + \frac{1-20 \cdot \alpha_{Cu20}}{\alpha_{Cu20}}}{\mathcal{G}_{nom} + \frac{1-20 \cdot \alpha_{Cu20}}{\alpha_{Cu20}}} \right) = \frac{t^*}{\tau}$$

$$\tau = \frac{t^*}{\ln \left(\frac{\mathcal{G}_{max} + \frac{1-20 \cdot \alpha_{Cu20}}{\alpha_{Cu20}}}{\mathcal{G}_{nom} + \frac{1-20 \cdot \alpha_{Cu20}}{\alpha_{Cu20}}} \right)}$$

$$I_{max1s} = \sqrt{\frac{S \cdot C_{Cu}^T}{\rho_{20} \cdot \alpha_{Cu20} \cdot \tau}} = 27.821 \text{ kA} \quad (0.7)$$

4. Примери коришћења преноса топлоте кроз бакар (алуминијум) у циљу смањивања пресека проводника

1) Кратак кабл између сабирница:

(биће урађен пример на рачунским вежбама)

Задатак 11 – материјали за рачунске вежбе – део за други колоквијум.

2) Приказ експеримента и модела чијом се применом може уважити и пренос топлоте дуж проводника

Design of the winding–bushing interconnections in large power transformers
<http://term-procesi.etf.rs/dokumenti/istrazivanja/Design%20of%20the%20winding%E2%80%93bushing%20interconnections%20in%20large%20power%20transformers>

Ако би се температура изолације одредила производ подужне снаге губитака и збира топлотног отпора провођењу топлоте кроз слој изолације повећане дебљине и топлотног отпора преносу топлоте струјањем, добијена вредност би била већа од стварне. Тачнији прорачун захтева пренос топлоте и дуж проводника, ка деоницама са мањом дебљином изолације. Крајњи ефекат примене тачнијег модела је смањење попречног пресека проводника, које је значајно како због уштеде материјала, тако (превасходно) и због мање масе проводника и лакшег мануелног процеса израде додатне изолације у фабричком производном процесу проводника за везу намотаја и проводног изолатора.

