

Ing. Stanislav Koten  
ředitel odboru kontroly  
elektroenergetiky a plynárenství  
Energetický regulační úřad  
Masarykovo náměstí 5  
586 01 Jihlava

datová schránka: **eeuaau7**

Naše zn.: M103 181 DOP29 002

V Rosicích dne 30.11.2015

Vaše zn.: 08890-23/2014-ERU

**Věc: Technický stav distribuční sítě elektřiny ČEZ Distribuce, a.s. – výpočty uzemnění**

Vážený pane řediteli,

děkuji za Váš dopis ze dne 20. listopadu 2015, ve kterém mě mj. žádáte o poskytnutí praktického příkladu výpočtu impedance uzemnění stožáru podle současně platné normy ČSN EN 50341, z tohoto výpočtu vycházející kroková a dotyková napětí a o případné další související podklady a informace.

Jedná se o poměrně rozsáhlou problematiku, ale pokusím se stručně shrnout hlavní body.

**1. Výpočty uzemnění – teorie**

Zkratové proudy, které v zemi tečou při poruchách na vedení, lze z hlediska bezpečnosti uzemnění modelovat jako ustálené systémy. (Toto neplatí pro účinky blesku, které přesahují rámec tohoto krátkého shrnutí.) Pro ustálené systémy platí následující parciální diferenciální rovnice:

$$\mathbf{J} = -\frac{1}{\rho} \nabla U, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = 0.$$

kde  $U$  je elektrický potenciál,  $\nabla$  vektorový operátor zvaný gradient,  $\mathbf{J}$  hustota elektrického proudu a  $\rho$  rezistivita neboli měrný elektrický odpor půdy. Jedná se o vektorovou formu Ohmova zákona a o rovnici kontinuity pro ustálené rozložení elektrického náboje.

V oblastech s konstantní rezistivitou  $\rho$  se tyto rovnice zredukuje na prostou Laplaceovu rovnici

$$\nabla^2 U = 0,$$

avšak problém nastává na hranici oblastí s různou rezistivitou, kde je nutné aplikovat příslušné hraniční podmínky. Těmi je buď konstantní elektrický potenciál (tradičně 0 V v nekonečnu a napětí  $U_E$  na povrchu uzemňovací soustavy), nebo zachování kolmé složky hustoty proudu na hranici dvou oblastí s odlišnými rezistivitami.

Po vyřešení potenciálu  $U$  lze spočítat dotyková a kroková napětí jako rozdíl potenciálu  $U$  mezi příslušnými body na povrchu. Lze také spočítat celkový proud do země  $I_E$ , a to pomocí integrálu

$$I_E = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$

vedeného po nějakém vhodně zvoleném povrchu  $S$ , který obklopuje celou uzemňovací soustavu. Odpor uzemnění  $R_E$  pak vychází z Ohmova zákona jako podíl napětí na uzemňovací soustavě  $U_E$  a celkového proudu  $I_E$ .

## 2. Praktické výpočty uzemnění

Pro přesný výpočet všech výše uvedených veličin je nutné stanovit rezistivitu  $\rho$  v půdě kolem uzemňovací soustavy, a to řádově do vzdálenosti několikanásobku průměru této soustavy. Tato rezistivita se typicky mění s hloubkou a závisí na složení jednotlivých půdních vrstev a dále na obsahu vody a na jejím chemickém složení. Rezistivitu jednotlivých půdních vrstev lze určit buď přímým měřením ze vzorků odebraných z hloubkových vrtů, nebo pomocí souboru elektrických měření provedených na povrchu (tzv. Wennerova metoda). Výpočet rezistivit jednotlivých půdních vrstev z výsledků povrchových měření je samo o sobě rozsáhlé téma, které přesahuje rámec tohoto krátkého shrnutí.

Jak jistě chápete, výše popsaný fyzikální problém má analytická řešení pouze v idealizovaných případech, kde je rezistivita  $\rho$  brána jako konstantní v celém relevantní objemu půdy a kde je geometrie uzemňovací soustavy poměrně jednoduchá. Nejjednoduším případem takové geometrie je kovová polokoule o poloměru  $r_E$ , kde symetrie systému značně zjednoduší rovnice a lze pak snadno odvodit, že

$$U(r) = U_E \frac{r_E}{r}, \quad R_E = \frac{\rho}{2\pi r_E}.$$

Co se týče výpočtu odporu uzemnění  $R_E$  pro složitější geometrie uzemňovací soustavy, v normách bývají uváděny soubory vzorců pro různé geometrie. S ohledem na stručnost uvedu pouze jeden přibližný vzorec, který je užitečný např. pro základní ekonomické rozvahy na začátku návrhu uzemnění nebo pro zběžnou kontrolu výsledků získaných z počítačových výpočtů. Jde o vzorec č. 51 z americké normy IEEE Std 80-2000:

$$R_E \leq \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L},$$

kde  $A$  je plocha uzemňovací soustavy spočítaná z jejího půdorysu a  $L$  celková délka zemničů v rámci této soustavy, které jsou v přímém kontaktu s půdou. V české normě ČSN EN 50522 je v příloze J uvedena první polovina tohoto vzorce po dosazení pro obsah kruhu.

Technické normy se obecně vyhýbají přibližným analytickým metodám pro výpočet dotkových a krokových napětí v blízkosti uzemňovacích soustav, protože tyto metody jsou pro většinu uživatelů norem příliš složité a tím pádem nepraktické. Pro jednoduché návrhy uzemnění normy místo toho stanovují jednoduchá pravidla, která vycházejí z nárůstu potenciálu uzemňovací soustavy v případě poruchy. Tento nárůst potenciálu  $U_E$  lze jednoduše spočítat z Ohmova zákona jako součin proudu do země  $I_E$  (zde vypočítaného ze zkratového výkonu distribuční soustavy v daném bodě) a odporu uzemnění  $R_E$ . Uzemňovací soustava bez dodatečných opatření je považována za bezpečnou, pokud nárůst potenciálu  $U_E$  nepřesáhne např. dvojnásobek maximálního povoleného dotkového napětí.

Váš dotaz směřoval na praktické výpočty dotkových a krokových napětí, dovolte mi proto krátce vysvětlit, jak tyto výpočty provádíme v naší společnosti. V anglosaských zemích se stal de facto standardem pro tyto výpočty jistý počítačový program, který napsal respektovaný autor několika akademických publikací, které položily základ pro přesné numerické řešení tohoto fyzikálního problému pomocí digitálních počítačů. Tyto publikace jsou citovány např. ve výše uvedeném americkém standardu IEEE Std 80-2000. Uživatel programu vytvoří geometrii uzemňovací soustavy pomocí 3D CAD systému, zadá tloušťky a rezistivity jednotlivých půdních vrstev a program následně automaticky vypočítá odpor uzemnění a kroková a dotková napětí. Podle našich informací byla v roce 2012 naše společnost jediná na území České republiky, která měla licenci na tento program. Tato licence je na české poměry velmi drahá a výstupy z tohoto programu proto poskytujeme pouze platícím zákazníkům. Pokud by měl Energetický regulační úřad zájem o vypracování studie pro některé typizované stožáry a půdní modely, rádi Vám zpracujeme cenovou nabídku.

Závěrem mi prosím dovolte několik obecných poznámek.

### 3. Jaká vedení s kovovými stožáry lze považovat za bezpečná

Pokud provozovatel distribuční soustavy pro některé vedení neprovedl měření dotkových napětí, nebo neprovedl měření rezistivity půdy v trase vedení a nedodal vlastní výpočty dotkových a krokových napětí vycházející z výše uvedených fyzikálních principů, nalézá se podle norem v režimu, kdy lze vedení považovat za bezpečné pouze v případě, že nárůst potenciálu  $U_E$  nepřesáhne např. dvojnásobek maximálního povoleného dotkového napětí, jak již bylo uvedeno výše.

### 4. Bezpečnost vedení se zemnicím lanem

Pokud jsou jednotlivé stožáry vedení spojeny zemnicím lanem, je nutné na celé vedení nahlížet jako na jeden velmi dlouhý uzemňovací systém, protože zemnicí lana zkratový proud vždy rozvedou na okolní stožáry, a to často do značné vzdálenosti. Impedanci uzemnění celého vedení lze spočítat z odporu uzemnění jednotlivých stožárů pomocí přibližného vzorce, který byl v normě ČSN EN 50341-1 deset let špatně, viz ČSN EN 50341-1 OPRAVA 1 z dubna 2012. Chyba zřejmě vznikla při překladu z originálu normy, kde byl vzorec správně. Na tuto chybu jsme upozornili společnost ČEZ Distribuce, a.s., v květnu 2011 v rámci sporů o koncepci uzemnění vedení 110 kV a našeho následného vyloučení z Katalogu dodavatelů ČEZ Distribuce, a.s.

Mýtus o tom, že stožáry vedení 110 kV stačí uzemnit na  $R_E = 10$  až  $15 \Omega$ , jsme z ČEZ Distribuce, a.s., slyšeli v tomto období opakovaně, jmenovitě např. v emailu Ing. Martina Macha, tehdejšího vedoucího odboru Rozpočtování a Standardizace, z 28. 4. 2011. Nicméně jak jsme zjistili v roce 2014 při nahlédnutí do projektové dokumentace pro rekonstrukci vedení 110 kV, V598 Červenka – Šternberk, nic se v tomto ohledu zřejmě nezměnilo: odpor uzemnění stožárů vlastního vedení byl opět stanoven jako  $10 \Omega$ . Tento mýtus pochází z šokujícího nepochopení normy ČSN EN 50341, kde jsou v národním dodatku tyto hodnoty uvedené jako dostatečné pouze co se týče ochrany před účinky blesku. Tento mýtus byl navíc vyvrácen již v PNE 33 0000-4, třetí vydání s účinností od 1. 12. 2011. V článku 3.7 byl v tomto vydání nově uveden vzorový výpočet pro stožár venkovního vedení 110 kV typ soudek s odporem uzemnění stožáru  $10 \Omega$ . Výpočet použil výše zmíněný vzorec pro impedanci vedení z normy ČSN EN 50341-1 (již ve správné verzi) a dospěl k závěru, že taková vedení překračují povolené hodnoty pro dotková a kroková napětí, a to i pro velmi nízký uvažovaný zkratový proud 7800 A. (Podotýkám, že sítě 110 kV jsou provozovány s přímým uzemněním středu.) Domníváme se, že tento vzorový výpočet byl do podnikové normy přidán v reakci na výše uvedený spor.

Dále bych chtěl vyvrátit sekundární mýtus, že stačí pouze dobře uzemnit stožáry uprostřed vesnic, blízko zahrádek atd. a že stožáry na polích stačí ponechat na  $10 \Omega$ , protože jde o místa odlehlá, kde se lidé vyskytují jen zřídka. Tento přístup pramení ze zásadního nepochopení výše zmíněného vzorce pro impedanci vedení. Vzorec předpokládá, že všechny stožáry v trase mají příslušný odpor uzemnění nebo nižší. Není samozřejmě možné dobře uzemnit jeden stožár z deseti a potom tuto hodnotu dosadit do vzorce pro výpočet impedance vedení jako celku.

Bohužel není ani možné problém vyřešit tím, že stožáry na místech navštěvovaných lidmi budou sice ponechány jako nebezpečné, ale budou provedena normou navrhovaná opatření na snížení dotkových napětí. Tento přístup totiž řeší pouze otázku dotkových napětí. Normy ale obecně ukládají, že pokud jsou překročeny limity pro dotková napětí, je nutno počítat (nebo měřit) také napětí kroková. Lze očekávat, že vedení, které podstatně překračuje bezpečnostní limity pro dotková napětí, a to plošně v celé své délce, bude mít i problémy s napětími krokovými. Tyto problémy se pak řeší jen velmi obtížně.

Obecně je proti *duchu normy*, aby např. vedení v nížinných zemědělských oblastech, kde je nízká rezistivita půdy a kde je tedy poměrně snadné vedení dostatečně uzemnit, byla od prvních fází návrhu koncipována jako nebezpečná v celé své délce. Opatření na snížení dotkových napětí jsou náplasti, ke kterým se dobrý projektant uchyluje pouze v případě, že všechny ostatní možnosti byly vyčerpány. Distribuční poplatky za 1 kWh jsou v České republice po přepočtu na eura srovnatelné se západní Evropou, je tedy na čase, aby i distribuční infrastruktura byla budována na srovnatelné technické úrovni. Náklady na uzemnění přitom tvoří jen zlomek celkové ceny za stavbu vedení.

## 5. Náhradní přenosové trasy bez zemnicích lan – smrtelná nebezpečí

Jako poslední a nejdůležitější bod z celého dokumentu si dovoluji opět poukázat na opravdu kritickou situaci u náhradních přenosových tras 110 kV. Tyto trasy jsou často provozovány bez zemnicích lan, jak jsme doložili na projektu rekonstrukce vedení 110 kV, V598 Červenka – Šternberk a u fotografií z tisku pro náhradní přenosové trasy postavené po pádu pěti stožárů vedení V599/5606 v prosinci 2013. V tom případě je zvýšení potenciálu země dáno prostým součinem odporu uzemnění stožáru a proudu do země. Pokud budeme uvažovat odpor uzemnění stožáru  $R_E = 10 \Omega$ , což je pro stožáry náhradních tras podle našeho názoru velmi optimistická hodnota, a proudu do země  $I_E = 10 \text{ kA}$ , dospějeme ke zvýšení potenciálu země  $U_E = 100 \text{ kV}$  (!). Pokud budeme pro zjednodušení dále uvažovat konstantní rezistivitu půdy  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ , z výše uvedeného vzorce pro odpor uzemnění polokoule nám vyjde poloměr ekvivalentní polokoule

$$r_E = \frac{\rho}{2\pi R_E} = \frac{100 \Omega\text{m}}{2\pi \cdot 10 \Omega} = 1,6 \text{ m} ,$$

takže můžeme zhruba odhadnout, že napětí 500 V bude ještě ve vzdálenosti řádově

$$r_{500} = r_E \frac{U_E}{500 \text{ V}} = (1,6 \text{ m}) \frac{100 \text{ kV}}{0,5 \text{ kV}} = 320 \text{ m}$$

od středu stožáru (!). Pokud by se člověk stojící v této vzdálenosti dotknul zavlečeného potenciálu 0 V, např. měděného telefonního drátu, vlakové koleje nebo dlouhého zábradlí, bude se jednat o dotykové napětí 500 V.

Obdobným výpočtem lze dovést, že ještě ve vzdálenosti řádově 25 m od stožáru bude krokové napětí  $U_s = 246 \text{ V}$  :

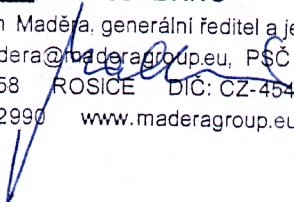
$$U_s(r) = U_E r_E \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r+1 \text{ m}} \right) = (100 \text{ kV})(1,6 \text{ m}) \left( \frac{1}{25 \text{ m}} - \frac{1}{26 \text{ m}} \right) = 246 \text{ V} .$$

Jistě pochopíte, proč tato čísla považuji za naprosto šokující a proč se domnívám, že liknavost společnosti ČEZ Distribuce, a.s., a státních orgánů v této věci hraničí s veřejným ohrožením.

Vážený pane řediteli, doufám, že Vám tento dokument pomůže proniknout do problematiky uzemnění. Pokud budete mít jakékoli další dotazy, rád Vám na ně odpovím.

S pozdravem

MADĚRA, s.r.o.  
Ing. Oldřich Maděra,  
jednatel

**MADĚRA s.r.o. OS 03 BRNO**  
Ing. Oldřich Maděra, generální ředitel a jednatel  
Oldrich.Madera@maderagroup.eu, PSČ 665 01  
Trávníky 158 ROSICE DIČ: CZ-45474915  
tel.: 530502990 www.maderagroup.eu 

P.S.

## 6. Nesmyslný vzorový výpočet v PNE 33 0000-4, třetí vydání

Po sepsání tohoto dokumentu nás napadlo podívat se podrobněji na výše zmíněný vzorový výpočet krokových a dotykových napětí, který je proveden v PNE 33 0000-4, třetí vydání s účinností od 1. 12. 2011, a to v článku 3.7 „Stožár venkovního vedení 110 kV – typ soudek“. Bylo by možná vhodné uvést plný název této podnikové normy energetiky, který je „PŘÍKLADY VÝPOČTŮ

UZEMŇOVACÍCH SOUSTAV V DISTRIBUČNÍ A PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ DODAVATELE ELEKTRINY“. Podle záhlaví normy její znění odsouhlasily mj. tyto společnosti: ČEPS, a.s., ČEZ Distribuce, a.s., PRE Distribuce, a.s. a E.ON distribuce, a.s.

Jsmo naprosto šokováni tím, co jsme zde našli. Je zřejmé, že autor výpočtu používá stejnou metodu ekvivalentní polokoule, jako jsme použili výše, ale dělá tak nikoli v režimu daleko od uzemňovací soustavy, kde tuto metodu lze použít pro zhruba a přibližné výpočty, ale naopak ji používá pro přesný výpočet krokových a dotkových napětí na samé hranici uzemňovací soustavy!

Autorova konstanta  $a$  („náhradní poloměr uzemnění stožáru“) je zjevně shodná s naší konstantou  $r_E$  a vzorec pro krokové napětí je pak po dosazení krokové vzdálenosti  $s = 1$  m a převodu na společný jmenovatel shodný s našim vzorcem uvedeným výše:

$$U_s(x) = U_E a \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x + s} \right) = \frac{U_E a s}{x(x + s)} .$$

Po dosazení  $x = a$  pak pro dotkovou vzdálenost  $l_T = s = 1$  m obdržíme údajný vzorec na výpočet dotkového napětí:

$$U_T = \frac{U_E a l_T}{a(a + l_T)} = \frac{U_E l_T}{a + l_T} .$$

Dovolte mi nyní krátce vysvětlit, proč tento výpočet považujeme za šokující.

Každý technik, který alepoň jednou v životě viděl výsledky moderních numerických výpočtů krokových napětí pro reálné uzemňovací soustavy, které většinou mívají obdélníkové půdorysy, intuitivně chápe, že největší kroková napětí jsou vždy v rozích soustavy. Patky stožárů mají půdorys čtvercový. Bez ohledu na další technické problémy spojené s tímto výpočtem je tedy zřejmé, že takové systémy prostě není možné aproximovat koulí, protože ta jak známo žádné rohy nemá. Celý tento výpočet tudíž nelze popsat jinak než slovy *naprostý nesmysl*.

Vnucuje se tedy závěr, že autor výpočtu nikdy neviděl výsledky moderních numerických výpočtů krokových napětí, že tedy problematice uzemnění plně nerozumí, a proto v této věci *není způsobilý psát vzorové výpočty do podnikových norem*.