

Karel Hlava<sup>1</sup>, Jaromír Hrubý<sup>2</sup>

## **Elektrická trakční energie**

**Klíčová slova:** *spotřeba trakční energie, ztrátové složky, metody zjišťování spotřeby trakční energie*

### **Skladba nákladů na trakční energii**

Náklady na nákup elektrické energie pro elektrickou trakci jsou v zásadě dány dvěma složkami, a to:

- a) Náklady na nákup distribučních služeb v jednotlivých trakčních napájecích stanicích, připojených k nadřazeným provozovatelům distribučních soustav (ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s., PREDistribuce, a.s.). Ceny distribučních služeb jsou regulované Energetickým regulačním úřadem a v podstatě jsou odvislé od odebíraného výkonu (rezervace kapacity, různá pro VN a VVN) a protečeného množství (platby za použití sítí, systémové služby, cena na krytí více nákladů spojených s podporou elektřiny z obnovitelných zdrojů, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných zdrojů, cena za činnosti operátora trhu s elektřinou). Ceny distribučních služeb jsou stanoveny platným cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu na příslušný rok.
- b) Cenou Wh, kupovaných od příslušného obchodníka s elektřinou. Obchodník účtuje k prodanému množství navíc daň z elektřiny, která je ovšem za zákona v tomto případě pro železniční dopravu osvobozena.

Obě složky celkové ceny hradí obvykle vlastník (správce) trakční napájecí soustavy nebo jako je to v současné době v ČR, kdy správce napájecí infrastruktury SŽDC zajišťuje pro elektrickou trakci distribuční služby a dodávky elektřiny zajišťuje majoritní dopravce České dráhy, a.s. u svého obchodníka s elektřinou.

---

<sup>1</sup> *Hlava Karel, Doc. Ing. CSc., 1930, ČVUT Praha, specializace elektrická trakce, emeritní vedoucí oddělení EMC ve VÚŽ a TÚDC, externí učitel Univerzity Pardubice, Dopravní fakulty Jana Pernera*

<sup>2</sup> *Hrubý Jaromír, Ing., 1958, VUT FE Brno, specializace technická kybernetika, měření, pracovník SŽDC s.o., SŽE Hradec Králové*



Podmínkou realizace fakturace podle naměřené spotřeby je začlenění elektrické trakce do Lokální distribuční soustavy železnice (LDSŽ) s právem přístupu třetích stran (obchodníků s elektřinou) až na sběrač EHV. Potom položku **ad a)** hradí primárně vlastník trakční napájecí soustavy, složku **ad b)** + příslušné distribuční služby stanovené pro LDSŽ si hradí přímo dopravce, který má sjednanou smlouvu o dodávce elektřiny přímo se svým obchodníkem.

### **Složky spotřeby trakční energie**

Spotřeba elektrické energie v elektrické trakci je v zásadě dána **čtyřmi složkami**, a to:

- A)** odběrem činné energie hnacími vozidly (pro trakční účely, vytápění a klimatizace vlakových souprav, restaurační vozy),
- B)** odběrem činné energie pevnými předtápěcími zařízeními,
- C)** spotřebou ostatních zařízení nutných pro provoz železniční dopravní cesty (napájení zabezpečovacích zařízení, elektrický ohřev výměn, ostatní netrakční technologická spotřeba z trakce atd.),
- D)** součtem celkových činných ztrát energie vznikajících v trakční napájecí soustavě.

**Složka podle bodu A)** tvoří největší podíl nákladů na elektrickou energii odebíranou v elektrické trakci. Jedná se zde o elektrickou energii odebíranou hnacími vozidly obou trakčních proudových soustav, a to nejen pro vlastní trakci, ale i pro napájení vlastní spotřeby vlakových souprav (topení, klimatizace, spotřeba restauračních vozů).

Elektricky vzato se jedná o energii protékající připojovacím bodem hnacího vozidla k trolejovému vedení, kterým je jeho sběrač. Je nesporné, že stejná energie se pak vrací zpětnou cestou (kolejnicemi a zemí) do napájecí stanice.

Vzhledem k tomu, že na soustavě 3 kV DC máme v měničnách diodové trakční usměrňovače, nemůže trolejovým vedením mezi sousedními měničnami protékat vyrovnávací proud, i když měničny této soustavy pracují vesměs paralelně.

Stejně tak nemůže protékat vyrovnávací proud mezi sousedními napájecími stanicemi AC soustavy (trakčními transformovny), protože trakční vedení traťových úseků je napájeno důsledně jednostranně. Provozovatel dráhy ani dodavatel elektrické energie nemá totiž zájem, ani nemůže z bezpečnostních důvodů připustit, provozovat na AC soustavě dvoustranné napájení analogicky jako na soustavě DC.

### **Metody určování činné trakční energie**

Hodnoty činné energie odebírané hnacím vozidlem je možno stanovit **třemi způsoby**, a to:

- a) operativním výpočtem založeným na zprůměrovaných hodnotách Wh/hrtkm,
- b) strojovým výpočtem reálné spotřeby použitím výpočetního programu SENA,
- c) použitím elektroměrů činné energie instalovaných na hnacích vozidlech.

Obecně lze k těmto metodám říci, že každá z nich má své nepopíratelné výhody, ale také nedostatky.

Vzniká tak obecný problém týkající se přesnosti stanovení hodnot činné energie odebírané hnacími vozidly elektrické trakce, který by měl být posuzován nikoliv jen z ryze metrologického hlediska, ale měl by posuzovat i ekonomickou a organizační stránku použitého způsobu. V dalším se pokusím o postupnou analýzu uvedených způsobů pokud možno ze všech těchto hledisek.

#### **Způsob ad a) používá zprůměrované hodnoty měrných spotřeb**

Je nejjednodušší metodou nevyžadující žádné metrologické opatření. Jako příklad uveďme zprůměrované měrné hodnoty kWh/tis.hrtkm, jaké jsou v současné době používány pro zúčtování spotřeby dopravce:

**Tabulka 1:** Zprůměrované hodnoty měrných spotřeb

<b>Druh vlaku</b>	<b>Měrná spotřeba [kWh/tis. hrtkm]</b>
<b>Vlaky Ex a R</b> (SC, EC, IC, Ex, R, Sp, Sv)	<b>25,00</b>
<b>Vlaky Os</b> (zastávkové osobní vlaky, ostatní vlaky osobní dopravy)	<b>37,00</b>
<b>Vlaky nákladní</b> (Nex, Rn, Pn, Vn, Mn+Vleč)	<b>20,00</b>
<b>Ostatní vlaky</b> (lokomotivní)	<b>43,00</b>



Je nesporné, že tato metoda má svá úskalí, spočívající např. v tom, že nerespektuje:

- sklonové poměry tratí (redukovaný sklon, odpory oblouků),
- typy hnacích vozidel, jejich elektrické schéma trakčních obvodů, účinnost a trakční charakteristiky,
- použitou techniku jízdy,
- mimořádnosti v organizaci vlakové dopravy (neplánovaná zastavení, jízdy odbočkou, omezení rychlosti).

Toto vše jsou hlediska týkající se přímo podstaty uvedené metody. Lze říci, že se jedná o vlivy, které lze statisticky zpřesnit s cílem omezení vlivu jednotlivých uvedených úskalí.

Stále však zůstává vliv týkající se stanovení vztažné hodnoty hrubých tun hmotnosti vlakových souprav. Tento problém se ve zvýšené míře týká právě velkých spotřebičů elektrické trakční energie, kterými jsou ucelené soupravy těžkých nákladních vlaků, vozících hromadné substráty (uhlí, ruda, tekutiny). Lze oprávněně předpokládat, že přesnost stanovení skutečné hmotnosti takových souprav nebude asi srovnatelná s přesností např. elektroměrů.

Některé zdroje uvádějí až 30 % rozptyl mezi deklarovanou a skutečnou hmotností vlaku, a to z těchto důvodů:

- i. hmotnost nákladu nákladního vlaku deklaruje přepravce – dopravcem není náklad až na výjimky vážen,
- ii. u osobní dopravy je problém zřejmý při uvědomění si rozdílů hmotnosti prázdného osobního vlaku a hmotnosti vlaku např. v dopravní špičce.

Podstatné zvýšení spotřeby vykazují těžké nákladní vlaky popsaného typu, pokud by z dopravních důvodů byla jejich jízda postižena vícenásobnými zastaveními s následujícími rozjezdy či požadavkem na krácení jízdních dob.

U souprav nákladních vlaků se uplatňuje ještě vliv složení vlakové soupravy z hlediska jízdního odporu. Je skutečností, že ucelené soupravy jsou obvykle sestavovány jedním typem nákladních vozů, takže z hlediska jízdního odporu taková souprava má nejmenší koeficient aerodynamického odporu („c.V<sup>2</sup> ") i při větší jízdní rychlosti.



Běžné soupravy nákladních vlaků však bývají naproti tomu mnohdy sestavovány bez zřetele na jejich aerodynamické vlastnosti (např. střídáním plošinových vozů a vozů krytých), čímž se zvyšuje aerodynamická složka jejich jízdního odporu a tedy narůstá i hodnota odebrané elektrické energie potřebné pro vedení takových vlakových souprav.

U vlakových souprav osobních vlaků je tento problém dán počtem cestujících. Lze oprávněně předpokládat, že bude znatelný rozdíl ve spotřebě elektrické energie málo a plně obsazené soupravy.

Samostatnou kapitolou jsou z hlediska spotřeby energie zastávkové vlaky. Zde se ve zvýšené míře uplatňuje nová koncepce trakčního obvodu založená pro soustavu 3 kV DC na použití máloztrátového rozjezdu (pulzní měnič). Tato vozidla mají i pro soustavu 3 kV DC rozjezdové vlastnosti jako obecně mají hnací vozidla AC soustavy 25 kV, 50 Hz. Vozidla této koncepce mají ve srovnání s klasickými vozidly DC soustavy používajícími odporový rozjezd nesrovnatelně menší měrnou spotřebu (nezávisle na tom, zda jejich rozjezdové odporníky dovolují jen dočasné či trvalé využití).

Uvedená vlastnost pulzního měniče se uplatní i u hnacích vozidel lokomotivního typu v případě dopravního požadavku na pomalou jízdu či při častých rozjezdech.

### ***Způsob ad b) využívá SW s názvem SENA***

Tento SW je určen původně pro konstrukci tachogramů a jízdních řádů. Později byl tento SW doplněn ještě podprogramem určeným pro výpočet spotřeby činné energie.

SW SENA pracuje s předem připravenými knihovnamí, obsahujícími:

- redukované profily jednotlivých traťových úseků, kde jsou respektovány i přídavné odpory traťových oblouků,
- trakční charakteristiky všech základních hnacích vozidel včetně jejich jízdního odporu a energetické účinnosti,
- jízdní odpory základních typů vlakových souprav.

Pomocí těchto pomůcek je možno po zadání typu vlakové soupravy, řady hnacího vozidla, požadované jízdní techniky i traťového úseku stanovit spotřebu elektrické energie nutnou pro zadanou jízdu a vykreslit tachogram jízdy.

Výhodou této metody je, že dovoluje stanovit mezi jiným i zvýšení spotřeby při neobvyklé jízdní technice či při jiných dopravních mimořádnostech.

Uvedený SW SENA dovoluje tedy korigovat doposud používané hodnoty kWh/tis.hrtkm, nutno si však uvědomit, že by se pak jednalo o:



- spotřebu elektrické energie pro vlastní jízdu konkrétního vlaku na konkrétním traťovém úseku a konkrétní jízdní technikou,
- tedy o hodnotu energie vztahující se na jeho připojovací místo, tedy na jeho sběrač,
- tuto hodnotu by však dodavatel trakční energie (SŽDC) byl oprávněn zvýšit o alikvotní část celkových energetických ztrát v trakční napájecí soustavě (od připojovacího bodu napájecích stanic po sběrač hnacích vozidel) i nákladů na spotřebu např. posunu apod.

Z uvedeného podle našeho názoru vyplývá, že tato metoda by byla vhodná za těchto podmínek:

- prověření platnosti zprůměrovaných hodnot kWh/tis.hrtnm individuálně např. pro ucelené vlakové soupravy (ČD Cargo, a.s.) vedené na obvyklých traťových úsecích obvyklou jízdní technikou a obvyklými hnacími vozidly, kde by však tyto zpřesněné hodnoty měrných spotřeb byly považovány za minimální možné,
- v případě dopravních anomálií lze určit pro daný konkrétní případ zvýšené hodnoty spotřeb platné pro danou situaci.

Před případným širším zavedením SW SENA pro daný účel by bylo vhodné prověřit jeho správnost porovnáním nasimulované spotřeby konkrétního vlaku s hodnotou spotřeby zjištěné měřením na sběrači jeho hnacího vozidla, pochopitelně na stejném traťovém úseku, stejnou jízdní technikou a stejným diagramem jízdy.

V případě kladného výsledku by bylo možno postupně vypracovat opakovanými simulacemi tabulky zpřesněných měrných spotřeb na hlavních tazích a pro hlavní provozovatele těžkých nákladních vlaků (ČD Cargo, a.s.).

Stále však zůstane při fakturování spotřeby problém nutnosti zvýšení těchto hodnot měrných spotřeb o alikvotní část ztrát v napájecí soustavě.

***Způsob ad c) je založen na použití individuálních elektroměrů na hnacích vozidlech***

Tento postup se na první pohled jeví jako nejdokonalejší metoda zjištění spotřeby elektrické energie v elektrické trakci. Je zároveň způsobem, který byl zvolen okolními dopravci (Německo, Rakousko, Slovensko a dalšími evropskými státy).

***Její kladné vlastnosti lze formulovat následovně:***

- respektuje konkrétní trakční podmínky dané jízdy, tj. dané hnací vozidlo včetně jeho energetické účinnosti, vlakovou soupravu z pohledu její hmotnosti a jízdního odporu, použitou jízdní techniku vedení vlaku i profil traťového úseku,

- umožňuje zjištění i spotřeby případného posunu či předtápění osobních souprav přes stojící lokomotivu,
- na stejnosměrné trakční proudové soustavě 3 kV měřicí souprava umožňuje měření skutečně odebrané elektrické energie, a to jak pro trakci, tak případně i pro napájení vlastní spotřeby osobní vlakové soupravy,
- u jednofázové trakční soustavy 25 kV, 50 Hz je situace komplikovanější a bude v dalším probrána samostatně,
- umožňuje otevření jednotného evropského dopravního trhu – liberalizaci a naplnění ustanovení vytvářené evropské legislativy.

*Tato metoda má i své **nepříznivé stránky**:*

- pořízení elektroměrů a jejich nezbytných pomocných zařízení vhodných pro provoz na hnacích vozidlech je finančně nákladné vzhledem k pracovním podmínkám panujícím na hnacím vozidle (teplota, vlhkost, otřesy, stísněnost strojovny),
- instalace měřicí soupravy na hnací vozidlo je zásahem do jeho vysokonapěťových obvodů,
- na hnacích vozidlech určených pro vedení vlaků osobní dopravy by bylo nutno část měřicí soupravy zdvojit, aby se umožnilo měření vlastní spotřeby vlakové soupravy (topení, klimatizace, restaurační vozy),
- podle analogie s podmínkami platnými v energetice by měřicí soupravy (elektroměry a jejich pomocná zařízení) byly v majetku či správě distributora trakční elektrické energie,
- všechny prvky měřicích souprav by musely být chráněny plombami pro zamezení neoprávněného odběru,
- tyto měřicí soupravy by bylo nutno periodicky kontrolovat,
- po instalaci na vozidlo by bylo nutno celou měřicí soupravu (elektroměr a jeho pomocná zařízení) společně cejchovat,
- údaje naměřené jednotlivými elektroměry by bylo nutno po vhodném přenosu periodicky vyhodnocovat, pravděpodobně na stabilním pracovišti dodavatele trakční elektrické energie („Energetickém portálu“) s cílem vystavení faktury za odebranou elektrickou energii,





- vlastní elektroměr trakční energie musí dovolit registrovat odděleně energii odebranou hnacím vozidlem pro trakci a vrácenou do napájecí soustavy (rekuperovanou pro jiné blízké hnací vozidlo v režimu trakce či zpět do sítě 110 kV) při jeho brzdění (čtyřkvadrantový elektroměr),
- elektroměrové soustavy instalované na hnacím vozidle lze použít pro fakturační účely pouze v případě, že obdrží jako celek (tj. vlastní elektroměr včetně jeho předřazených prvků, v případě AC přístrojových transformátorů proudu a napětí), atest příslušné akreditované elektroměrové služby v souladu s ČSN EN 50463,
- jinak jsou tyto měřící soupravy použitelné pouze formou podružných elektroměrů podle podmínek přístupu na železniční dopravní cestu stanovených provozovatelem trakční napájecí soustavy.

Nyní se podívejme podrobněji k použití elektroměrových soustav z metrologické stránky. Zde musíme rozlišovat, zda se jedná o trakční soustavu 3 kV DC nebo jednofázovou soustavu 25 kV, 50 Hz.

Pro použití elektroměrových souprav **u soustavy 3 kV DC** je situace jednoduchá. Pro úpravu trakčního napětí 3 kV na napěťovou hladinu odpovídající vstupu elektroměru lze použít:

- dělič napětí,
- předřadný rezistor,
- převodník.

Tímto přídatným zařízením lze trakční napětí vhodně přizpůsobit napěťovému vstupu elektroměru. Rozdíl mezi použitím děliče napětí a předřadného rezistoru spočívá v otázce elektrické bezpečnosti celé měřící soupravy. Dělič napětí by byl svojí vstupní svorkou připojen přes pojistku na vhodný bod 3 kV ve strojovně lokomotivy, druhý konec musí být spolehlivě propojen s kostrou vozidla. Elektroměr je pak připojen na odbočku děliče napětí a na kostru vozidla. Naproti tomu při použití předřadného rezistoru by se v případě nedokonalého propojení elektroměru s kostrou vozidla mohlo dostat napětí 3 kV do dalších obvodů elektroměrové soupravy, což je nepřijatelné.

Proudový vstup elektroměru by byl napájen z bočnicku na úrovni stovek mV. Bočník by byl vložen do vývodu trakčního proudu na straně kostry hnacího vozidla.



Vznikne problém, pokud by bylo zapotřebí měřit současně i odběr např. pro topení služebního vozu či vlakové soupravy. Protože tento proud se uzavírá kolejnici, bylo by nutno místo bočníku použít bezkontaktní snímač - převodník (např. LEM) vložený do vývodu 3 kV směrem do vlakové soupravy. V případě převodníku je nutné uvažovat linearitu převodu a teplotní stabilitu v širokém teplotním rozsahu (např. ve strojovně lokomotivy je teplota v létě 50 až 60 °C). Elektroměr je integrační přístroj, kde se chyba integruje. V případě nelinearity použitého převodníku se bude jeho chyba kumulovat a bude ji obtížné kompenzovat.

Na trakční proudové **soustavě 25 kV, 50 Hz** je situace podstatně složitější. Problém spočívá v principu funkce jednofázových lokomotiv používajících diodový měnič (trakční usměrňovač) a odbočkovou regulaci jízdních stupňů, jejichž koncepce je poplatná šedesátým létům minulého století. Hnací vozidla tohoto typu jsou v široké míře v provozu jak na železnicích ČR, tak i na ŽSR, částečně na bulharských a ruských železnicích. Jiné železniční správy hnací vozidla této zastaralé koncepce ve větším počtu nezavedly ani již nepoužívají.

Tato vozidla podstatně deformují časový průběh sinusovky proudu, který odebírají za jízdy výkonem z TV. Časový průběh tohoto proudu obsahuje mimo základní složku 50 Hz i řadu harmonických složek vyšších kmitočtů. Statisticky bylo zjištěno, že např. 3. harmonická (150 Hz) má relativní obsah 25 až 30 % složky základní harmonické 50 Hz. Podobně pro 5. harmonickou (250 Hz) platí hodnota 10 až 20 %, pro 7. harmonickou (350 Hz) pak 5 až 10 %, atd.

Uvedené frekvenční složky v proudu odebíraném hnacím vozidlem s diodovým měničem způsobují na impedanci TV harmonické složky trakčního napětí, jehož sinusovka je těmito složkami značně deformována. Funkce FKZ se ve vztahu k deformaci napětí na TV neuplatní, protože její schopnost omezovat 3. a 5. harmonickou se projeví až na straně 110 kV.

V souvislosti s tím však nelze obecně stanovit fázový posun jednotlivých harmonických složek proudu odebíraného hnacím vozidlem vůči harmonickým složkám v trakčním napětí stejných frekvencí.

ČSN EN 50463 požaduje měření celkového příkonu hnacího vozidla i v přítomnosti harmonických. Podle definice celkového výkonu střídavého proudu se obvykle předpokládá stav, kdy napájecí napětí je čistě sinusové, tj. neobsahuje žádné harmonické složky, které jeho sinusovku deformují, a zkreslení se týká pouze měřeného proudu. V takovém případě je činný výkon tvořen pouze základní frekvenční složkou 50 Hz odebíraného proudu v návaznosti na předpokládanou složku 50 Hz v napájecím napětí a účinníkem DPF ( $\cos \varphi_1$ ). Ostatní harmonické složky v odebíraném proudu již k hodnotě činného výkonu nepřispívají.

**Toto však není stav, který se vyskytuje v trakční soustavě železnic ČR.**

V případě, že i sinusovka napájecího napětí je deformována harmonickými, vytváří celkový výkon nejen základní harmonická 50 Hz, ale i ostatní harmonické složky proudu a napětí. Platí zde zákon, že celkový činný výkon je dán součtem činných výkonů jednotlivých harmonických složek. Tento činný výkon však mohou vytvářet jen harmonické složky napětí a harmonické složky proudu téhož řádu.

Takto definované dílčí složky celkového výkonu jsou však mimo efektivními hodnotami složek napětí a proudu ovlivněny i jejich vzájemným fázovým posunem  $\varphi_h$ , tj. hodnotami účinníků jednotlivých harmonických složek ( $\cos \varphi_h$ , kde „h“ je řád dané harmonické složky), [1].

Hodnoty účinníků  $\cos \varphi_h$  jednotlivých harmonických však není možno jednoznačně stanovit. Platí pouze, že jejich číselná hodnota se může pohybovat v mezích od  $-1$  do  $+1$  a závisí, mezi jiným, na charakteru trakčního zatížení daného hnacího vozidla i na jeho poloze vůči trakční napájecí stanici.

Elektroměr však není možno připojit přímo do výkonových obvodů hnacího vozidla. Jeho napěťový vstup obvykle leží v mezích do 200 V, proudový vstup je možno upravit vhodným převodníkem na napětí nejvýše v desítkách až stovkách mV. Je tedy zřejmé, že mezi vysokonapěťové obvody hnacího vozidla a elektroměr je nutno vložit vhodné **převodníky**. Tyto převodníky musí splňovat požadavky na minimalizaci chyby převodu a chyby úhlu, aby nebyla narušena přesnost příslušného elektroměru daná jeho třídou.

Pod pojmem chyby převodu máme na mysli poměr hodnoty měřené veličiny k hodnotě této veličiny přiváděné ke vstupním svorkám elektroměru. Chyba úhlu je pak definována jako fázová odchylka měřené veličiny vůči hodnotě této veličiny na vstupu elektroměru. Obě tyto chyby ve svých důsledcích ovlivňují chybu měření odebrané elektrické energie nezávisle na třídě přesnosti vlastního elektroměru a při nevhodné volbě či konstrukci převodníku ji zvětšují nezávisle a bez ohledu na třídu přesnosti vlastního elektroměru.

**Chyba převodu i chyba úhlu** obou převodníků je závislá nejen na jejich typu, ale v každém případě na kmitočtovém spektrálním složení měřené veličiny (proudu či napětí), protože převodník musí převádět měřené veličiny (proud i napětí) vzhledem k výše uvedené definici celkového odebíraného výkonu ve frekvenčním pásmu alespoň do 1000 Hz (20. harmonická).

Velikost obou citovaných chyb převodu i úhlu má zvláštní význam při použití převodníků napětí a proudu při měření odebrané elektrické energie. Na rozdíl od prostého měření odebíraného výkonu, které má charakter jednorázového odečtu naměřených hodnot napětí a proudu, se chyby při měření odebrané elektrické energie integrací načítají v celém časovém intervalu odečítání a jejich hodnota pak nepříznivě ovlivňuje přesnost i nejlepšího elektroměru s vysokou třídou vlastní přesnosti.

**Převodník pro přizpůsobení měřeného proudu** úrovni proudového vstupu elektroměru je možno vytvořit použitím přístrojového transformátoru proudu například průvlekového typu se jmenovitým primárním proudem např. 200 A. Převodník se umístí do vývodu vozidlového transformátoru na straně jeho připojení ke kostře vozidla. Technické údaje o vlastnostech přístrojových transformátorů proudu se obvykle týkají pouze chyby převodu i úhlu pro základní kmitočet 50 Hz. Analogické údaje pro požadovaný rozsah frekvenčního pásma však výrobce normálně neudává.

Z teoretického rozboru vlastností přístrojového transformátoru proudu vyplývá, že jeho chyba převodu i chyba úhlu by měla být obvykle vyhovující. Podmínkou je, že jádro přístrojového transformátoru proudu nesmí být přesycováno. Této podmínce lze vyhovět správnou volbou jmenovitého převodu přístrojového transformátoru proudu a dodržáním nejvyšší přípustné hodnoty vstupní impedance proudového vstupu elektroměru.

**Převodník pro přizpůsobení měřeného napětí** úrovni napěťového vstupu elektroměru musí převést jmenovité napětí trolejového vedení 25 kV na úroveň napěťového vstupu elektroměru a může být zvolen buď jako přístrojový indukční transformátor napětí, nebo jako přístrojový kapacitní transformátor napětí, či jako elektronický typ pracující na jiném principu.

Návrh převodníku napětí jakéhokoliv typu musí respektovat napěťové poměry, které se běžně mohou vyskytovat na trolejovém vedení. Jedná se v tomto ohledu o přípustné hodnoty přepětí a o spektrální složení časového průběhu periody trolejového napětí.

Hodnoty přepětí jsou dány příslušnou ČSN EN 50163 s ohledem na délku výskytu přepětí. Odolnost převodníku proti přepětí však nesmí ohrozit jeho chybu převodu ani úhlu. Při správné volbě typu převodníku by však k tomuto ovlivnění obou chyb nemělo docházet.

Podstatně obtížnější je otázka řešení vlivu spektrálního složení časového průběhu periody trolejového napětí na hodnoty chyby převodu a chyby úhlu převodníku napětí. V tomto ohledu se jednotlivé typy převodníků napětí zásadně liší.

Jako jedny z možných použitelných typů převodníků je možné uvažovat měřicí transformátor napětí, kapacitní dělič napětí a elektronický převodník. Z hlediska použitelnosti lze uvažovat pouze měřicí transformátor napětí nebo elektronický převodník. Kapacitní dělič napětí by musel z bezpečnostních důvodů mít na výstupu oddělovací transformátor, který prokazatelně naprosto vyloučí měření na vyšších harmonických. Obecně i zde je nutno vzít v úvahu integrující charakter elektroměru a poměry ve strojovně lokomotivy.

Nejčastějším převodníkem napětí je přístrojový indukční transformátor napětí. Tento převodník musí pracovat s velkou hodnotou zatěžovací impedance, která je v daném případě tvořena napětovým vstupem elektroměru. Protože přístrojový indukční transformátor napětí musí s ohledem na minimalizaci jeho chyby převodu vykazovat nepatrnou hodnotu napětí nakrátko, je nutno jej na jeho primární straně doplnit nadproudovou ochranou (obvykle vysokonapětovou tavnou pojistkou). Technické údaje o vlastnostech přístrojových indukčních transformátorů napětí se obvykle týkají pouze chyb převodu i úhlu pro základní kmitočet 50 Hz. Analogické údaje pro požadovaný rozsah frekvenčního pásma však výrobce normálně neudává.

Z teoretického rozboru vlastností přístrojového indukčního transformátoru napětí vyplývá, že jak jeho chyba převodu, tak i chyba úhlu jsou frekvenčně závislé. Tato frekvenční závislost je dána parametry indukčního transformátoru napětí a v daném použití na hnacím vozidle se neuplatní kapacita vývodu, avšak zůstává vliv impedance napětového vstupu elektroměru. V závislosti na parametrech přístrojového indukčního transformátoru napětí lze očekávat jeho chybu převodu i několik %. Chybu úhlu však nelze odhadnout.

Má-li tedy připojený elektroměr spolehlivě udávat celkový odebíraný výkon a po integraci i celkovou odebranou elektrickou energii, je tedy nutno zajistit kalibrování přesnosti nejen vlastního elektroměru, ale celé elektroměrové soupravy včetně jeho předřadníku napětí tvořeného přístrojovým indukčním transformátorem napětí.

Další možností volby převodníku napětí je přístrojový kapacitní transformátor napětí. Tento transformátor napětí obsahuje na vstupu kapacitní dělič, doplněný na svém výstupu oddělovacím indukčním transformátorem napětí. Důvodem této koncepce je zajištění bezpečnosti navazujících obvodů jejich galvanickým oddělením od vlastního vstupního kapacitního děliče pro případ poruchy jeho dolního členu. Horní člen vstupního kapacitního děliče je tvořen vysokonapětovým kondenzátorem velmi malé kapacity (řádově nejvýše desítek pF) a jeho skutečná kapacita je proto značně ovlivnitelná vlivem jeho blízkosti ke kovovým částem ve strojově hnacím vozidle, což značně ovlivní napětový převod vstupního kapacitního děliče jako celku.

Přístrojový kapacitní transformátor napětí je výhodný svojí konstrukcí, rozměry i hmotností pro měření týkající se výhradně složky 50 Hz, pro kterou také výrobce udává třídu přesnosti. Teoretický rozbor však prokazuje jeho naprostou nevhodnost pro převod frekvenčních složek měřeného napětí větších než 50 Hz. Chyba převodu dosahuje na frekvencích mírně převyšujících 50 Hz nepřijatelné hodnoty, nemluvě již o chybě úhlu. Příčinou těchto nevýhodných frekvenčních vlastností tohoto typu transformátoru napětí je právě kombinace kapacitního vstupního děliče a induktivního oddělovacího indukčního transformátoru nutného z bezpečnostních důvodů. Navíc přistupuje nebezpečí jevu ferorezonance, který je nutno omezit dodatečně vloženými L-C prvky.

Vzhledem k frekvenční závislosti hodnoty chyby převodu a úhlu nemá smysl snažit se kalibrovat celou měřicí soupravu (přístrojový kapacitní transformátor napětí a elektroměr) pro frekvence vyšších harmonických. Princip kapacitního snímače napětí jako součásti např. střešní průchodky je známý a používá se u zapouzďených rozvaděčů VN a VVN, avšak pouze pro měření na základní složce 50 Hz. Pro měření na složkách vyšších frekvencí platí vše uvedené výše pro přístrojový kapacitní transformátor napětí.

Pro oba typy přístrojových transformátorů napětí platí, že jejich vstupní vysokonapěťové přívody musí být propojeny pokud možno přímo na vstup 25 kV do strojovny hnacího vozidla.

Zde ale narazíme na okolnost, že toto napětí ve strojovně již provozovaných hnacích vozidel samostatně není přístupné. Přívod od střešní průchodky do vozidlového transformátoru je proveden z bezpečnostních důvodů jako zakrytý.

Nabízí se zde možnost získat obraz napětí 25 kV trolejového vedení z některého ze sekundárních vinutí vozidlového transformátoru. Na hlavním jádře magnetického obvodu, tvořícího základ vstupního regulačního autotransformátoru, jsou k dispozici dvě vinutí vlakového topení (1500 V) a vinutí vlastní spotřeby hnacího vozidla (230 V). Výstupní napětí obou těchto vinutí není pro 50 Hz ovlivněno navoleným jízdním stupněm, je však ovlivněno funkcí diodového trakčního usměrňovače napájějícího trakční motory.

Bylo by nutné předem prověřit přenos periody napětí 25 kV z trolejového vedení na tato vinutí, a to jak s ohledem na chybu převodu, tak i chybu fáze, pochopitelně však i vliv trakčního usměrňovače na obě tyto chyby. Při tomto prověřování je nutno respektovat různé trakční režimy hnacího vozidla (navolená odbočka autotransformátoru, jízdní rychlost a tažná síla). Opět je nutno respektovat, že při funkci elektroměru se vlivy obou chyb integrují, takže tyto chyby ovlivní především zjištěné hodnoty odebrané elektrické energie.

Pokud se týče elektronických snímačů napětí, nejsou známe žádné údaje o jejich frekvenční závislosti chyby převodu a úhlu. Lze však oprávněně vyslovit pochybnost o jejich vhodnosti jako předřadníků napětí elektroměrů. Jejich umístění vně strojovny na střeše hnacího vozidla je možné, nutno však uvážit ověření pro předepsané klimatické vlivy.

### ***Složka spotřeby podle bodu B)***

Tato složka se týká odběru činné energie pevnými předtápěcími zařízeními. Je řešitelná elektroměrovými soupravami na vstupu do rozvaděče pevných předtápěcích zařízení, ať jsou napájena přímo z TV, nebo z místní sítě. Zde vzniká otázka přiřazení odpovídající spotřeby jednotlivým uživatelům – dopravcům.

### ***Složka spotřeby podle bodu C)***

Tato složka se týká spotřeby ostatních zařízení je řešitelná použitím individuálních elektroměrových souprav doplněných případně dálkovým přenosem dat jak pro účely fakturace, tak i pro případné následné vyhodnocování spotřeby včetně ovlivňování způsobu jízdy ze strany dopravců.

### ***Složka spotřeby podle bodu D)***

Tato složka je dána součtem celkových činných ztrát energie vznikajících v trakční napájecí soustavě a je dnes nejdiskutovanější složkou týkající se vztahů vlastníka železniční dopravní cesty a dopravců.

Je nesporné, že elektrickou energii pro trakci lze považovat za energii pro tento účel zvláště upravenou.

**Pro soustavu 3 kV DC** se jedná o energii převedenou z trojfázové soustavy 22 kV 50 Hz usměrněním na napětí 3 kV DC. Tato konverze je zatížena energetickými ztrátami a proto finanční náklady na tyto energetické ztráty je dodavatel elektrické energie oprávněn požadovat na odběrateli této energie.

Podobně je dodavatel elektrické trakční energie oprávněn přenést na uživatele této energie i ztráty vznikající v rozvodu usměrněného napětí 3 kV DC od měniřny po vozidlový sběrač.

U soustavy 3 kV DC je podstatné, zda transformátory usměrňovačů měniřny jsou napájeny vlastním transformátorem 110/22 kV, či přímo z napětí 22 kV ze sítě dodavatele elektrické energie. V obou případech se jedná o ztráty magnetizační (prakticky nezávislé na trakčním zatížení) a dále o ztráty ve vinutí (závislé na trakčním zatížení).

Další ztráty vznikají provozem **trakčních usměrňovačů**. Zde je výhodou důsledné používání kvalitních výkonových diod, jejichž činné ztráty již nevyžadují vnější energii pro jejich chlazení a jejichž elektrické vlastnosti omezily i počet diod zapojených v sérii. V každém případě tato složka ztrát je úměrná čtverci zatěžovacího proudu. Podobně jsou závislé i ztráty v reaktoru, sloužícím k omezení počátečního nárůstu zkratového proudu.

Také činný odpor **trakčního obvodu** (trolejové vedení, zpětné vedení) vede ke vzniku ztrát energie. Zatím co doposud uváděné ztrátové složky je možno do jisté míry stanovit výpočtem, tyto ztráty však závisí na okamžité poloze hnacího vozidla. Díky dvoustrannému napájení trakčního vedení má okamžitá poloha hnacího vozidla přímý vliv na rozdělní trakční zátěže mezi sousední trakční měniřny i na časový průběh odebíraného proudu.



Podstatnou výhodou důsledně používaného dvanáctipulzního usměrnění nemá vlastník napájecí soustavy potíže se splněním požadavku na kvalitní účinník trakčního odběru, ani na minimální deformaci sinusovky napětí napájecí sítě, či na symetrické zatížení této sítě, ani na splnění požadavku na impedanci napájecí soustavy vůči signálu HDO.

Trakční napětí 3 kV DC se používá s výhodou např. pro napájení statických měničů jako zdrojů pro ohřev výměn na zhlaví železničních stanic či jako zdroje pro staniční i traťové zabezpečovací zařízení. Spotřeba energie v obou těchto případech je snadno měřitelná a evidovatelná.

Napětí 22 kV vzaté z přípojníc trakčních měření se v poslední době zavádí i pro napájení traťových rozvodů (zabezpečovací zařízení, staniční budovy) jako náhrada zastaralých rozvodů 6 kV či napájení z místní sítě. I tato spotřeba je snadno měřitelná a evidovatelná.

**Pro soustavu 25 kV, 50 Hz** se opět jedná o elektrickou energii zvláště upravenou pro trakční účely, mezi jiným nejen pro její atypičnost danou jednofázovým zatížením napájecí sítě 110 kV, ale především nutností úpravy proudového spektra proudu odebíraného diodovými hnacími vozidly pomocí FKZ tak, aby byly splněny požadavky dodavatele elektrické energie ze sítě 110 kV. Také takové úpravy vykazují nezanedbatelné ztráty, které dodavatel trakční energie je oprávněn přenést na uživatele této energie.

Podobně je dodavatel elektrické trakční energie oprávněn přenést na uživatele této energie i ztráty vznikající v rozvodu napětí 25 kV, 50 Hz, i když tyto ztráty jsou u AC soustavy podstatně menší než u soustavy 3 kV DC.

U soustavy 25 kV, 50 Hz se elektrická energie získává výhradně z hladiny 110 kV. Důvodem je jak požadavek na zkratový výkon napájecí sítě, tak i na přípustnou hodnotu napěťové nesymetrie způsobované mezifázovým připojením trakčních transformátorů 110/27 kV. Jejich ztráty se opět dělí na magnetizační (na zátěži prakticky nezáležející) a na ztráty ve vinutí (závislé na čtverci zatěžovacího proudu).

V důsledku používání dnes již technicky zastaralých lokomotiv s diodovým trakčním měničem, které se u zahraničních železničních správ v takové míře nikdy neprovozovaly, bylo trakční napájecí soustava nutno ve všech napájecích stanicích této soustavy (s výjimkou napájecí stanice Čebín vzhledem k její těsné blízkosti rozvodny 400/110 kV) doplnit a dodnes provozovat filtračně kompenzační zařízení. Účelem tohoto unikátního zařízení je:

- zlepšit účinník základní harmonické DPF příkonu hnacích vozidel a odebíraného napájecí stanicí z průměrné hodnoty 0,84 na požadovanou hodnotu nejméně 0,95, a to při všech v úvahu připadajících trakčních zatíženích či změnách konfigurace napájených traťových úseků,



- podstatně omezit průnik 3., 5. a případně i 7. proudové harmonické produkované hnacími vozidly s diodovým trakčním měničem do sítě 110 kV s cílem omezit zkreslení sinusovky napětí sítě 110 kV v připojovacím bodě trakční transformovny,
- zabránit, aby DPF odběru trakční transformovny přešel do kapacitního charakteru (především při chodu trakční transformovny trakčně naprázdno), přičemž indukční výkon dekompenzační větve musí vykompenzovat kapacitní výkon obou rezonančních větví, kapacitní výkon napájených úseků trolejového vedení a kapacitu případných kabelových napájecích vedení, a to v případě, že na napájeném úseku není trakční odběr,
- zajistit při chodu napájecí stanice trakčně naprázdno i při daném trakčním zatížení, že vstupní impedance trakční napájecí soustavy jako celku neklesne pod dodavatelem předepsanou mezní hodnotu, platící individuálně pro daný napájecí bod, v zájmu zamezení nežádoucímu útlumu signálu HDO v okolní síti 110 kV.

Filtračně kompenzační zařízení (FKZ) obsahuje:

- dvojici LC větví, složených ze vzduchové rezonanční tlumivky doplněné v sérii kondenzátorovou skupinou s balančními ochranami a výkonovým vypínačem,
- dekompenzační větev, obsahující jednofázový snižovací transformátor s převodem od 27/5 kV do 27/10 kV (podle stupně vývoje regulátoru, výhledově bez tohoto transformátoru), dekompenzační vzduchovou tlumivku a fázový regulátor typu COMPACT; fázový regulátor pracuje bezkontaktně a samočinně udržuje účinník základní harmonické ( $\cos \varphi_1$ , DPF) energie odebírané napájecí stanicí v jejím připojovacím bodě k síti 110 kV od jejího nulového trakčního zatížení až po provozovatelem trakce zadané trakční zatížení; softwarové nastavení fázového regulátoru je zvoleno hodnotou 0,98, aby skutečná hodnota účinníku v připojovacím bodě napájecí stanice spolehlivě ležela v požadovaných mezích 0,95 až 1,00, a to za všech stavů trakčního zatížení.

Popsaná technologie trakční transformovny vykazuje **ztrátové složky**, především v těchto výkonových prvcích:

- ztráty v **prvcích LC** větví FKZ jsou z větší části tvořeny činnými ztrátami v rezonančních tlumivkách a jsou dány materiálem jejich vinutí, tyto ztráty jsou trvalé a s trakčním odběrem narůstají vzhledem k tomu, že spektrum harmonických v proudu „diodových“ hnacích vozidel je úměrné jimi odebíranému činnému výkonu,
- protože tyto rezonanční tlumivky musí být přesně naladěny svými odbočkami na požadovanou indukčnost ve vztahu ke kapacitě příslušné kondenzátorové skupiny, nemohou být opatřeny železným magnetickým obvodem, takže ztráty v železe odpadají,

- činné ztráty v **kondenzátorových skupinách** jsou díky moderním materiálům dielektrika jejich kondenzátorových prvků zanedbatelné,
- činné ztráty ve **snižovacím transformátoru** dekompenzační větve (pokud je ještě použit) jsou dvojího druhu:
  - ztráty **magnetizační** jsou prakticky nezávislé na trakčním odběru a jsou dány především hodnotou použitého trakčního napětí,
  - činné ztráty ve **vinutích snižovacího transformátoru** jsou závislé na trakčním odběru trakční transformovny, avšak opačně, tj. při chodu trakční transformovny trakčně naprázdno jsou tyto ztráty největší, při chodu trakční transformovny s maximálním trakčním odběrem jsou nejmenší,
- **dekompenzační tlumivka** také nemá železný magnetický obvod z důvodů snížení jejích činných ztrát; ztráty vznikají pouze v jejím vinutí a platí pro ně totéž, co je uvedeno pro vinutí snižovacího transformátoru dekompenzační větve,
- podstatnějším zdrojem činných ztrát je **fázový regulátor typu COMPACT**, obsahující soupravy výkonových tranzistorů pro proudy stovek A; závislost hodnoty činných ztrát by bylo možno vyšetřit po konzultaci s výrobcem.

Ztráty v trakčním obvodu jsou totožné jako v případě soustavy 3 kV DC, zde je ale nutno zdůraznit, že proud základní harmonické odebraný klasickým hnacím vozidlem AC, je přibližně o jeden řád menší než proud odebraný na soustavě DC. Z toho vyplývá, že také činné ztráty ve vodičích TV budou podstatně menší a vzhledem k provozu hnacích vozidel se spíše uplatní úbytek napětí na indukčnosti smyčky TV.

Trakční napětí 25 kV, 50 Hz se používá s výhodou např. pro napájení statických měničů jako zdrojů pro ohřev výměn na zhlaví železničních stanic či jako zdroje pro staniční i traťové zabezpečovací zařízení. Spotřeba energie v obou těchto případech je snadno měřitelná a evidovatelná. Napájení staničních budov z přilehlých napájecích stanic nepřichází v úvahu, protože nelze jednoduše zajistit trojfázové napětí.

Souhrnem lze konstatovat, že popsané ztrátové složky vytvářejí náklady vlastníka železniční dopravní cesty, který je oprávněn je promítnout do tarifu pro dopravce.

**Dosavadní praxe** je založena na operativním využití zprůměrovaných měrných spotřeb trakční elektrické energie s použitím registrovaných údajů o typu vlaku, hmotnosti a ujeté vzdálenosti podle bodu a).

Použití metody podle bodu b) (SW SENA) či podle bodu c) (elektroměrové systémy na vozidlech) by současně vyžadovalo předběžné zpřesnění poměrných energetických ztrát vznikajících mezi připojovacími body trakčních napájecích stanic a sběrači hnacích vozidel pokud možno s následným experimentálním ověřením.



**V předběžných návrzích** se předpokládá použití jednosložkové ceny distribuce při zúčtování trakční spotřeby dopravce, která v sobě bude zahrnovat:

- pokrytí průměrných nákladů na nákup distribuce
  - včetně rezervace kapacity (technického maxima) na trakčních napájecích stanicích,
  - včetně nákladů na platby za nedodržení účinníku na napájecích stanicích,
  - včetně nákladů na platby za vyžádanou dodávku jalové kapacitní energie do sítí provozovatele nadřazené distribuční soustavy,
- pokrytí nákladů na ztráty v soustavě, které v současné době nejsou k dispozici.

Jako příklad je možno uvést hodnoty měrných ztrát obou hlavních trakčních proudových soustav, odvozených pro poměry Železnic Slovenské republiky:

- pro soustavu 25 kV, 50 Hz byla odvozena hodnota 5,33 %,
- pro soustavu 3 kV DC byla odvozena hodnota 17,94 %.

K tomu lze dodat, že provozní podmínky i technické zázemí na ŽSR jsou prakticky analogické poměrům na ČD. Bylo by proto možno v prvním přiblížení použít uvedené hodnoty ztrát i pro ČD do doby, než se získají adekvátní hodnoty odvozené přímo pro podmínky ČD.

#### **Literatura:**

- [1] Trnka, Zdeněk: Teoretická elektrotechnika, SNTL, 1972, odst. 5.6.9, str. 352
- [2] ČSN EN 50163 - Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav
- [3] ČSN EN 50463 - Drážní zařízení – Energetické měření na palubě vlaku

V Praze, červenec 2010

Lektoroval: Ing. Vladimír Kudyn, Ph.D.  
SŽDC, s.o.