

Richard Lacko¹, Radovan Doleček²

Specifika trakčního napájecího systému 2 AC 25 kV 50 Hz

Klíčová slova: *elektrická trakce, trakční systém, trakční napájecí stanice, autotransformátor*

Úvod

Počátky elektrizace drah jsou ve znamení zejména stejnosměrných trakčních soustav, které s rozvojem výkonové polovodičové techniky ztrácejí svoje výhody ve prospěch soustav střídavých. V 60. a 70. letech 20. století nastává ve světě rozvoj vysokorychlostních železnic, které ovšem vyžadují vyšší trakční výkony. V Japonsku se projektanti rozhodují tento požadavek splnit realizací autotransformátorového napájecího systému (dále AT systém) 2 AC 25 kV 50 Hz.

Postupně se začínají AT systémy uplatňovat i v jiných zemích, a to nejen na vysokorychlostních tratích. Z Evropy jmenujme např. Francii, Itálii, Španělsko a ze zemí bývalého východního bloku Maďarsko. Rozvoj AT systému probíhá také v Německu, zde se však jedná o systém 2 AC 15 kV 16,7 Hz.

Historicky však není využití AT systému novinkou druhé poloviny 20. století, jak by se mohlo zdát. První realizace se objevují již v roce 1913 v USA pro napájení příměstských drah. Dále se historicky objevují kombinace AT systémů se sacími transformátory (boostertransformátory), jako bylo např. řešení 274 km dlouhé tratě mezi švédskými městy Mjölby a Hässleholm z roku 1929 [3].

1 Stručný popis systému

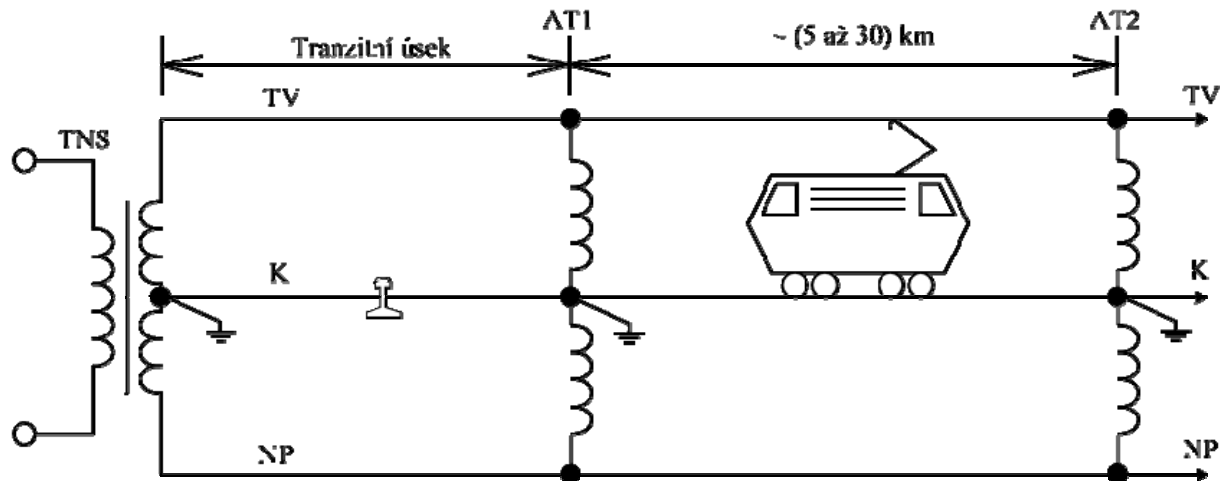
Kromě **trolejového vodiče (TV)** je na trakčních podpěrách zavěšen pro vedení zpětných proudů také tzv. **negativní napáječ (NP)**. Ten je nejčastěji veden souběžně s trolejovým vodičem např. způsobem obdobným, jako je realizováno zesilovací vedení u stejnosměrné soustavy. Účelem negativního napáječe je postupné převzetí zpětných proudů do trakční napájecí stanice (dále TNS) na úkor kolejnic.

V pravidelných vzdálenostech přibližně 5 km až 30 km je nutno umístit jednovinuťové autotransformátory, jejichž střed je připojen ke kolejnicím (K), které jsou zemněny. Krajiní vývody jsou pak připojeny k trolejovému vedení a negativnímu napáječi. Autotransformátor je nutné instalovat též na konci napájeného úseku.

¹Ing. Richard Lacko; nar. 1980; Univerzita Pardubice, DFJP, obor Dopravní infrastruktura: Elektrotechnická zařízení v dopravě.

²doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.; nar. 1971; Univerzita Pardubice, DFJP, obor Dopravní prostředky a infrastruktura, specializace elektrotechnika, se sídlem v Pardubicích; současné zaměření: EMC, výkonová elektronika, trakční systémy, elektrické pohony; pracoviště: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, Studentská 95, 532 10 Pardubice, e-mail: radovan.dolecek@upce.cz

Uvažujeme-li nejčastější řešení pomocí symetrických autotransformátorů, je napětí mezi trolejovým vedením a negativním napáječem 50 kV. Mezi trolejovým vedením a kolejnicemi je napětí poloviční, tedy 25 kV, napětí mezi kolejnicemi a negativním napáječem je pak -25 kV. Záporné znaménko vyjadřuje vzájemný fázový posuv mezi oběma napětími, který je 180° . Jedná se proto o dvojfázový napájecí systém.



Obr. 1. Sestava autotransformátorového systému. Legenda: TNS – trakční napájecí stanice; AT1, AT2 – autotransformátory, TV – trolejové vedení; NP – negativní napáječ; K – kolejnice.

1.1 Hlavní výhody systému

Vzhledem k přenášenému napětí 50 kV mezi trolejovým vedením a negativním napáječem lze výhody spatřovat zejména v menších ztrátách energie při přenosu a menších úbytcích napětí na vedení. Je nutné si uvědomit, že dvojnásobné napětí 50 kV znamená poloviční proud v trakčním vedení a oproti systému jednofázovému tedy teoreticky čtvrtinový úbytek na vedení. Z těchto důvodů proto systém umožňuje přenášet větší výkony při stejné vzdálenosti napájecích stanic či naopak možnost překlenutí delšího úseku bez napájecích stanic při stejném výkonu. Z logiky uspořádání vyplývá, že napájecí napětí pro hnací vozidla zůstává 25 kV.

Přítomnost negativního napáječe pak vede ke značnému snížení zpětných proudů vedených kolejnicemi a zemí, a tím k redukci dotykového napětí, což je významný bezpečnostní faktor. Situace, kdy je negativní napáječ veden na trakčních podpěrách, má též za následek uzavírání magnetického pole okolo trolejového vedení a negativního napáječe. Nikoliv tedy okolo trolejového vedení a kolejnic, jako je tomu u „klasických“ jednofázových střídavých systémů. Tato vlastnost spolu s omezením zpětných proudů kolejnicemi pozitivně přispívá ke snížení vlivu na komunikační zařízení a tvorbu indukovaných napětí.

1.2 Hlavní nevýhody systému

Mezi nevýhody systému zajisté patří poněkud složitější nároky na trakční napájecí stanici – dvojnásobné výstupní napětí a nerovnoměrnost zatížení. Dále je

zde nutná instalace autotransfómátorů a zřícení negativního napáječe³. Z hlediska prostorového uspořádaní je zde navíc nutné dodržet dvojnásobnou izolační pevnost mezi trolejovým vedením a negativním napáječem. Protože AT systém vyžaduje důsledné zemnění středů autotransfómátorů z důvodu dodržení velikosti dotykových napětí, je nutno řešit také vztah k drážní zabezpečovací technice, a to zejména při využití kolejových obvodů.

Uvedené faktory jistě navyšují investice. Nelze však striktně prohlásit, že elektrizace AT systémem znamená vždy vyšší náklady oproti klasickému systému, záleží na konkrétní realizaci.

2 Model AT systému

Střídavá trakční napájecí soustava 2 AC 25 kV 50 Hz je AT systém, který dosud nebyl pro podmínky českých železnic využit, přestože je, jak již bylo uvedeno, využíván mnoha železničními správami. Pokusme se však alespoň teoreticky aplikovat AT systém na některou z tuzemských tratí provedením série výpočtů a simulací.

Aplikujme výpočetní model systému na trať č. 199 z Českých Budějovic do Českých Velenic (50 km), na kterou navazuje část železniční tratě č. 226 z Českých Velenic do Třeboně (34 km). Celkově se tedy požaduje elektrizace AT systémem v délce 84 km. U zbývající části tratě č. 226, tj. z Třeboně do Veselí nad Lužnicí (21 km), předpokládejme realizaci jednofázového střídavého systému 25 kV, 50 Hz v návaznosti na stávající elektrizaci v regionu.

2.1 Obecné zadání problému

Železniční trať č. 199 byla relativně nedávno elektrizována jednofázovým střídavým systémem 25 kV, 50 Hz, který logicky navazuje na elektrizaci jiných železničních tratí v daném regionu. Železniční trať č. 226 dosud elektrizována nebyla, jeví se však zajímavá jako budoucí přímý tah do sousedního Rakouska. V obou případech se jedná o jednokolejnou trať.

Důvod, proč elektrizovat uvedené úseky AT systémem, lze spatřovat v problematičnosti připojení k distribuční síti 110 kV pro zřícení TNS v Českých Velenicích. Rolí zde jistě hraje také ekologické hledisko, neboť se jedná o region s chráněnou krajinnou oblastí. AT systém by mohl prodloužit vzdálenosti mezi jednotlivými TNS a vyhnout se tak nutnosti zřícování TNS v Českých Velenicích.

Napájení celého AT systémem elektrizovaného úseku, tedy zřícení TNS pro AT systém, předpokládejme v Českých Budějovicích. AT systém má být realizován jako symetrický. Vzhledem k délce celého úseku, která činí 84 km, předpokládejme stavbu pěti autotransfómátorů dle tabulky 1.

³ V České republice se zpravidla neinstaluje na střídavých trakčních soustavách zesilovací vedení. V případě rekonstrukce jednofázového systému na AT systém by tento vodič mohl posloužit jako negativní napáječ.

Tab. 1. Umístění autotransformátorů v uvažovaném AT systému.

Označení úsekového AT	Název úsekového AT	Vzdálenost od TNS	Vzdálenost od předchozího AT
AT1	Borovany	21 km	×
AT2	Nové Hrady	37 km	16 km
AT3	České Velenice	50 km	13 km
AT4	Suchdol nad Lužnicí	66 km	16 km
AT5	Třeboň	84 km	18 km

2.2 Úsekové autotransformátory, transformátor TNS

Tabulka 1 předepisuje realizaci pěti úsekových autotransformátorů. Při návrhu parametrů autotransformátorů je nutno vycházet z výkonových požadavků, ale také z předpokladu nižší ekonomické náročnosti při použití autotransformátorů o nižším výkonu. Z hlediska výkonového zatížení proto zvolme při návrhu cestu vyšších výkonů u autotransformátorů krajních (AT1 a AT5) a nižších výkonů u autotransformátorů vnitřních (AT2 až AT4). Předpokládejme totiž, že krajní autotransformátory přebírají značnou část proudových toků v případě, že se hnací vozidlo nachází v jejich blízkosti, zatímco v případě vnitřních autotransformátorů se tyto proudové toky lépe rozloží mezi všechny prvky obvodu.

Pro transformátor TNS v Českých Budějovicích předpokládejme, že bude výrobcem zadán požadavek na dodávku speciálního napájecího transformátoru s vyvedeným středem sekundárního vinutí. Nutný je požadavek nerovnoměrné zátěže mezi středem transformátoru a oběma krajními vývody. Napájení TNS bude realizováno z distribuční sítě 110 kV.

Navrhované parametry transformátoru TNS a úsekových autotransformátorů uvádí tabulka 2.

Tab. 2. Parametry transformátorů v uvažovaném AT systému.

Transformátor	TNS	AT1, AT5	AT2, AT3, AT4
Frekvence	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Převod	110 kV / (2×27,5 kV)	55 kV / (2×27,5 kV)	55 kV / (2×27,5 kV)
S	2×12,5 MVA	2×2,5 MVA	2×1,5 MVA
ΔP_{Cu}	2×53 kW	2×20 kW	2×12 kW
u_k	12,5 %	2 %	1,2 %

2.3 Trakční vedení

Předpokládejme realizaci plně kompenzovaného řetězovkového vedení, které může být doplněno o pomocné nosné lano. Negativní napáječ lze zřídit např. zavěšením na vnější straně trolejových podpěr. Jak bylo zmíněno, trať č. 196 je již elektrizována, tento 50 km dlouhý úsek by tak bylo nutné doplnit pravděpodobně pouze o vodič negativního napáječe. Zbývající úsek musí být elektrizován.

2.4 Výpočty a simulace v trakčním obvodu

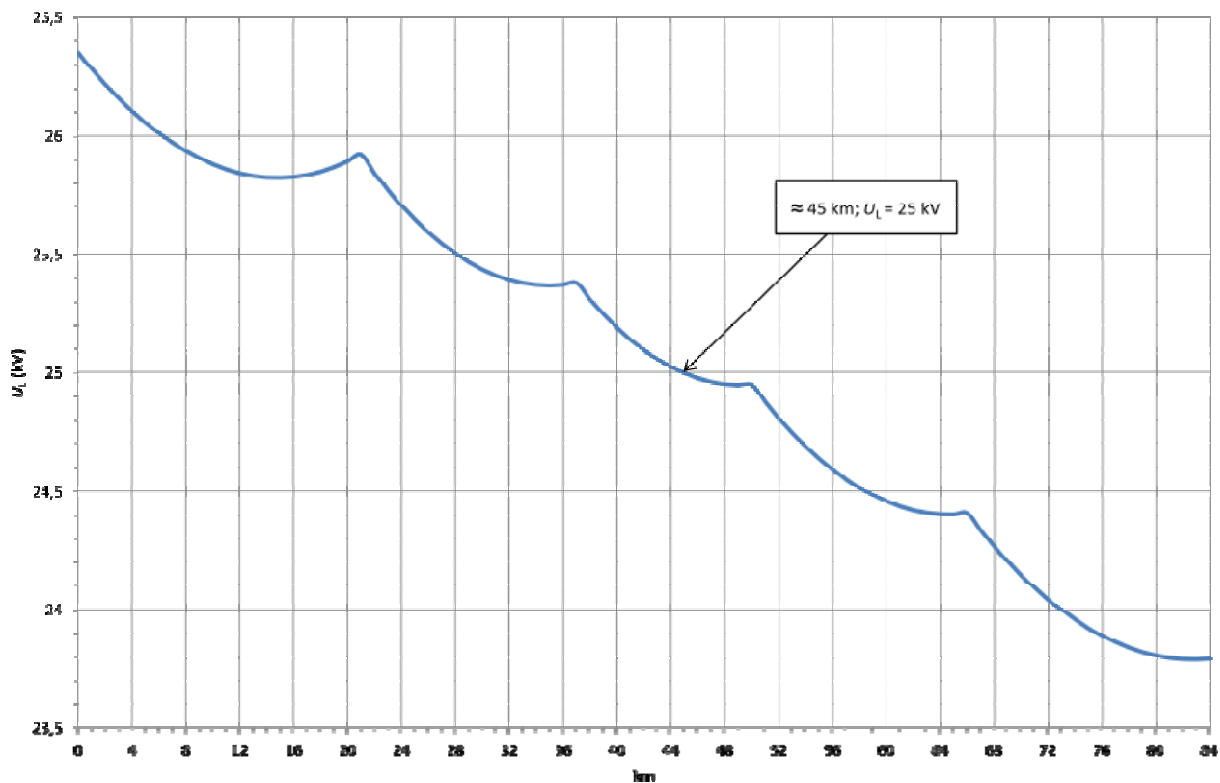
Zaměříme se nyní na praktické výpočty v trakčním obvodu AT systému a nalezení charakteristik uvažovaného obvodu. K výpočtům a simulacím byl použit program PSpice 9.1. Podrobný rozbor metodiky výpočtů (zejména impedančních

charakteristik) a simulací programem PSpice 9.1 zdaleka přesahuje rozsah článku, čtenář ho však v plném rozsahu nalezne v autorově práci [1].

Předpokládejme pohyb referenčního vozidla od 0. kilometru (od TNS) k 84. kilometru (AT5 – krajní autotransformátor). Pro jednoduchost uvažujme hnací vozidlo, které během jízdy nemění svoje impedanční parametry, a které má při napájecím napětí 25 kV a účinníku 0,84 výkon 6 MW (tento uvažovaný výkon je poněkud větší z důvodu většího zatížení soustavy pro účely simulace).

2.4.1 Napětí na hnacím vozidle

S narůstající vzdáleností hnacího vozidla od TNS dochází vlivem úbytku na vedení k postupnému poklesu napájecího napětí. Závislost napájecího napětí pro referenční hnací vozidlo v závislosti na vzdálenosti od TNS vyjadřuje graf na obrázku 2.



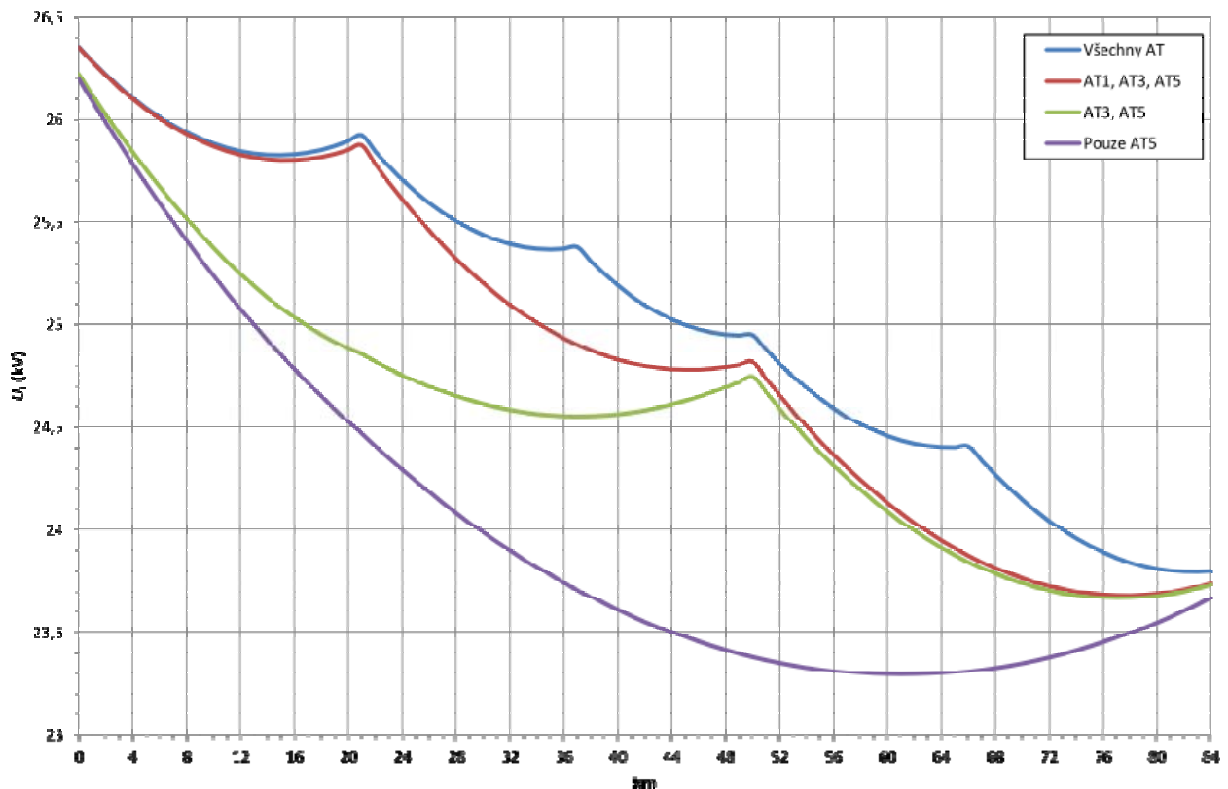
Obr. 2. Závislost napájecího napětí pro referenční hnací vozidlo v závislosti na vzdálenosti od TNS.

K poklesu na jmenovitou hodnotu 25 kV napájecího napětí dochází přibližně na 45. kilometru, na koncovém 84. kilometru je hodnota napájecího napětí 23,8 kV. To je o 4,8 kV více, než je minimální dovolená hodnota trvalého napětí, daná normou [5]. Z grafu jsou též patrné prakticky parabolické závislosti napěťového poklesu v jednotlivých úsecích, mající asymetrický charakter, daný jednostranným napájením AT systému.

2.4.2 Odpojení autotransformátorů

Pro studium napěťových závislostí AT systému nyní uvažujme záměrné odpojení (či náhlý výpadek) několika autotransformátorů. Pro tento účel byly simulacemi získány grafy na obrázku 3.

Z grafů je patrné, že čím větší je počet autotransformátorů, tím se závislost napájecího napětí na vzdálenosti od TNS v celkovém pohledu postupně linearizuje. Zajímavé je také to, že při odpojení více autotransformátorů není pokles napájecího napětí nikterak velký. Prakticky však v takové situaci dochází k většímu zatížení autotransformátorů. Ze simulací vyplynulo, že vzhledem ke krajnímu návrhu výkonových parametrů dochází při výpadku již jednoho z autotransformátorů k proudovému přetížení autotransformátorů ostatních.

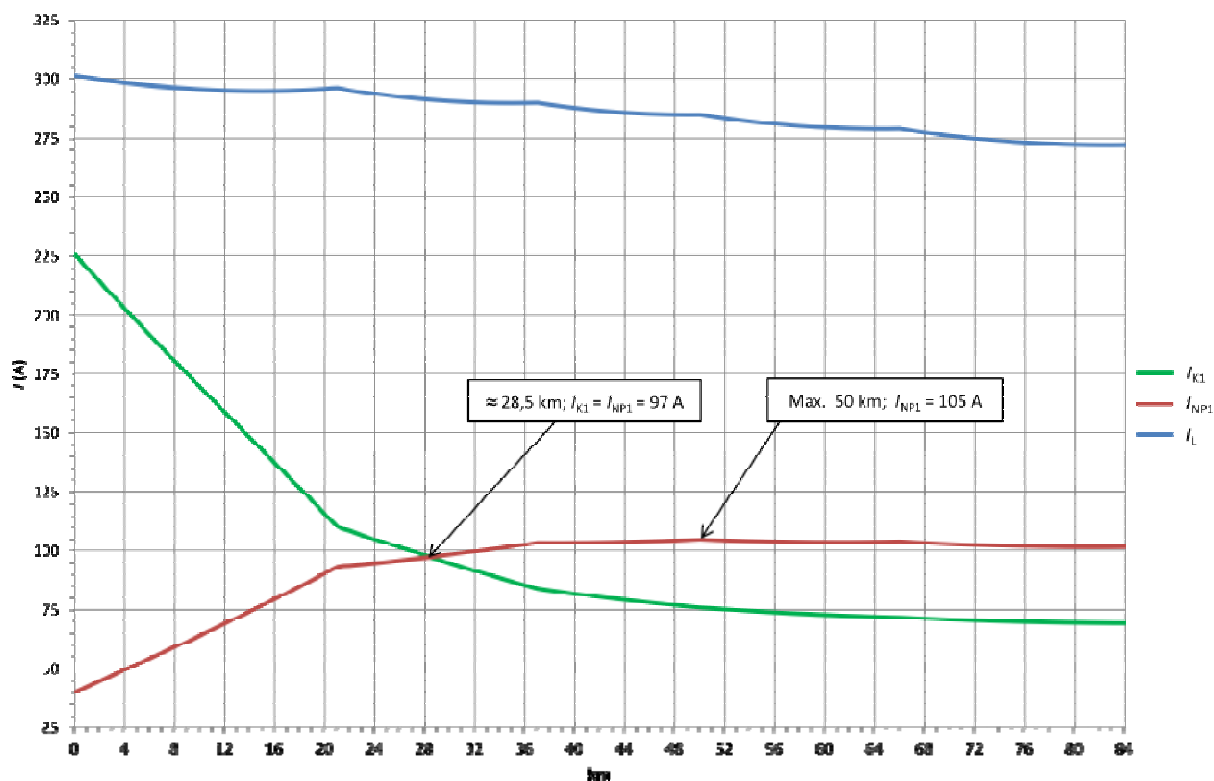


Obr. 3. Závislost napájecího napětí pro referenční hnací vozidlo v závislosti na vzdálenosti od TNS při odpojení některých autotransformátorů. Legenda grafu uvádí připojené autotransformátory.

2.4.3 Tok zpětných proudů do TNS

Jak již víme, zpětné proudy do TNS vstupují dvěma cestami – kolejnicemi K (proud I_{K1}) a negativním napáječem NP (proud I_{NP1}). Ideální situace by nastala, kdyby tok proudu do TNS kolejnicemi byl nulový. V praxi taková situace pochopitelně nenastane, je však snahou se tomu stavu přiblížit. Pro zjištění reálného stavu je proto nutné simulacemi zjistit skutečné velikosti zpětných proudů v závislosti na jízdě referenčního hnacího vozidla.

Z grafu na obrázku 4 vyplývá, že při jízdě v 1. úseku mezi TNS a AT1 přebírají větší část zpětných proudů kolejnice. Postupným vzdalováním se hnacího vozidla od TNS však dochází k poměrně velkému poklesu tohoto proudu ve prospěch negativního napáječe. Na konci 1. úseku (21. kilometr) je rozdíl mezi proudy I_{K1} a I_{NP1} již velmi malý. Větší část zpětných proudů přebírá negativní napáječ až v 2. úseku cca na 28,5 kilometru, kdy se oba proudy vyrovnávají. Počínaje 3. úsekem (37 kilometr) jsou již změny velmi nepatrné a nastává prakticky konstantní rozdíl mezi I_{K1} a I_{NP1} . Maximum proudu negativním napáječem do TNS však není na koncovém 84. kilometru, jak by se dalo teoreticky očekávat, ale na 50. kilometru u AT3, kdy je hodnota $I_{NP1}=105$ A.



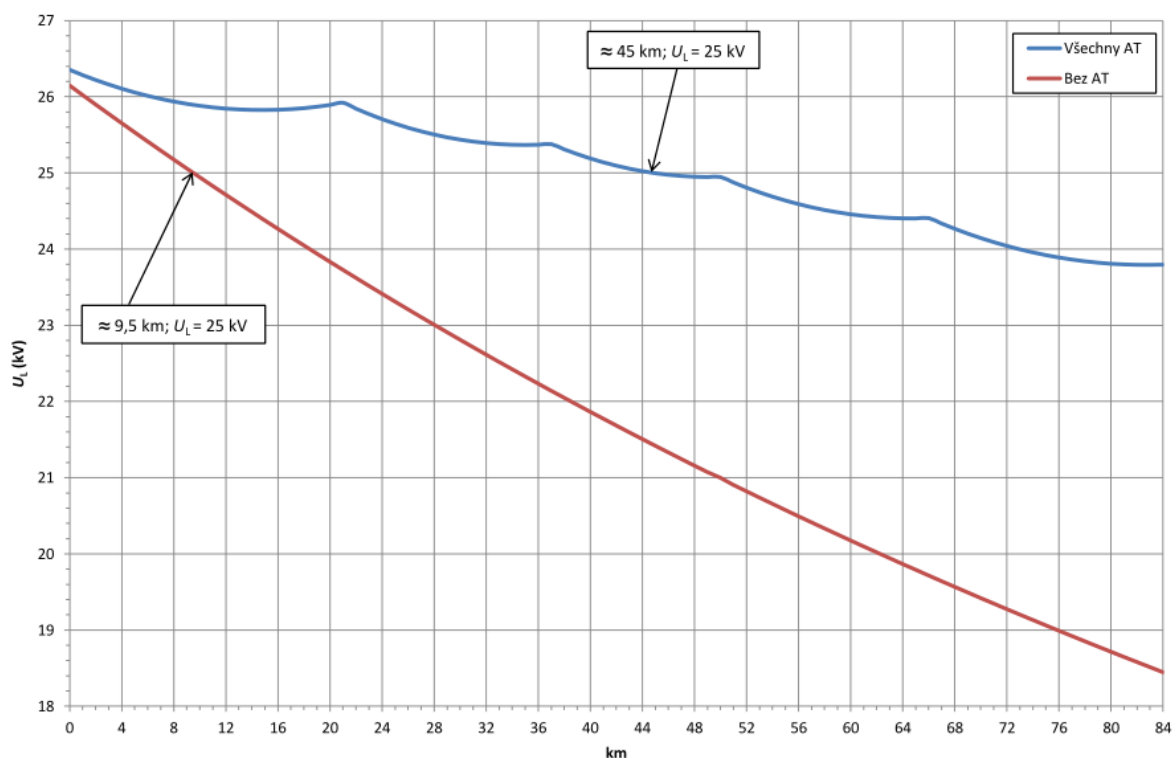
Obr. 4. Závislost zpětných proudů do TNS a proudu hnacím vozidlem v závislosti na jeho vzdálenosti od TNS.

Zde je nutné konstatovat, že bylo očekáváno poněkud lepší dělení zpětných proudů ve prospěch negativního napáječe. Tento stav je důsledkem faktu, že rozptylové impedance autotransfómátorů jsou větší než impedance trakčních smyček. Byla provedena celá řada simulací s různými obměnami parametrů autotransfómátorů v reálných mezích, nicméně výsledek byl vždy prakticky totožný. Nejedná se však o neúspěch. Pro porovnání je v grafu na vynesena též křivka proudu I_L tekoucího hnacím vozidlem v závislosti na jeho vzdálenosti od TNS. Porovnáme-li proudy I_L a I_{K1} na koncovém 84. kilometru, kdy je I_{K1} minimální, pak zpětný proud kolejnicemi do TNS tvoří cca 25 % velikosti proudu hnacím vozidlem.

2.4.4 Porovnání navrženého AT systému s jednofázovým systémem

Uvažujme teoretickou situaci, kdy celý 84 kilometrů dlouhý úsek bude elektrizován klasickým jednofázovým systémem 25 kV, 50 Hz s jedinou TNS na 0. kilometru.

Významným faktorem pro porovnání obou systémů je napájecí napětí na vozidle. Pokud porovnáme napěťovou křivku z obrázku 2 s napěťovou křivkou při elektrizaci jednofázovým systémem, získáme grafy na obrázku 5. Pro jednofázový systém (křivka bez AT) je znatelný významný pokles napájecího napětí, který se dostává pod hranici minimální trvalé hodnoty dané normou [5]. Z grafu vyplývá, že není možné realizovat pouhé prodloužení stávající elektrizace bez nutnosti vybudování další TNS.



Obr. 5. Závislost napájecího napětí pro referenční hnací vozidlo v závislosti na vzdálenosti od TNS pro AT systém a běžný jednofázový systém 25 kV, 50 Hz. Ten prakticky vznikne odpojením všech autotransformátorů.

V úvodních odstavcích bylo jako zásadní výhoda AT systému uvedeno snižování zpětných proudů v kolejnicích. Tento předpoklad fakticky potvrzují grafy na obrázku 4. Vzhledem k tomu, že klasický jednofázový střídavý systém je tvořen pouze jednou smyčkou se sériovými impedančními prvky, protéká hnacím vozidlem a kolejnicemi proud o stejné velikosti. Ten odpovídá právě proudu I_L hnacím vozidlem. Z grafu na obrázku 4 je patrné, že zpětné proudy kolejnicemi do TNS v AT systému jsou až o 75 % nižší.

3 Závěr

Výsledky výpočtů a simulací ukazují, že autotransformátorový napájecí systém 2 AC 25 kV 50 Hz přináší pozitiva z hlediska úbytku napájecího napětí. Umožňuje proto realizaci od sebe více vzdálených trakčních napájecích stanic, než je tomu u běžného jednofázového střídavé systému, a to při zachování stávajících dopravních výkonů. Dále dochází k výraznému snížení zpětných proudů kolejnicemi.

Přestože se v současnosti neuvažuje o budování samostatné vysokorychlostní železnice na našem území, jsou výše uvedené vlastnosti využitelné např. na našich nově elektrizovaných tratích, případně tam, kde se uvažuje o náhradě stejnosměrného napájecího systému.

Literatura

- [1] LACKO, Richard. *Návrh trakčního systému 2×25 kV, 50 Hz*. Pardubice, 2013. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [2] LIPPMANN, Gerd a Jindřich KAŠPAR. Vedení zpětného trakčního proudu, část II.: Používání autotransformátorového systému napájení elektrizovaných tratí v podmínkách České republiky. *Nová železniční technika*. 2010, č. 5.
- [3] VÝKRUTA, Vladivoj. Vedení zpětného trakčního proudu, část I. *Nová železniční technika*. 2010, č. 1.
- [4] HAYASHI, Masami a Tsugio IWASHITA. *Teoretická studie AT napájecího systému – výpočetní vzorce pro energetické charakteristiky: Překlad z japonské Quarterly reports railway technical research institute no. 4*. 1971.
- [5] ČSN EN 50163 ed. 2. *Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

Praha, září 2013

Lektorovali: doc. Ing. Karel Hlava, CSc. (nezávislý odborník)
Ing. Vladivoj Výkruta, CSc. (VUZ, a.s.)