

Problémy elektrické kompatibility kolejových obvodů

Klíčová slova: *kolejový obvod, ohrožující vliv, rušení, kompatibilita, hnací vozidla, trakce, ukolejnění.*

1. Úvod

Kolejnice železničního svršku jsou sdíleny řadou elektrických systémů - trakčním napájecím systémem, systémy elektrického vytápění osobních vozů vlakových souprav, systémy centrálního napájení vozů elektrickou energií, systémy kolejových obvodů atd. Jejich vzájemné ovlivňování plyne především z galvanického propojení zmíněných systémů. Nesouměřitelnost přenášených výkonů znevýhodňuje kolejové obvody. Obecně lze podle důsledku dělit vlivy na nebezpečné (při nichž vznikají napětí a proudy nebezpečné pro údržbu, popř. připojená zařízení), rušivé (jejichž účinkem vznikají napětí a proudy, které zhoršují jakost přenášených signálů) a ohrožující (které svými druhotnými účinky mohou způsobit stav ohrožení osob a zařízení). V případě kolejových obvodů jsou nejzávažnější ohrožující vlivy, které se, na rozdíl od vlivů rušivých, nemusí projevit znemožněním funkce navazujících systémů (určitou funkci – např. přenos signálu - naopak mohou podporovat) ale přitom znemožní bezpečné vyhodnocení šuntovaného stavu. Tyto vlivy jsou v provozu těžko identifikovatelné a proto je nutné jim předcházet.

S kolejnicemi, jako se zpětným vodičem trakčního systému, se z důvodu ochrany před nebezpečným dotykovým napětím nebo pro omezení negativních vlivů bludných proudů, spojují (tzv. ukolejňují) další zařízení či konstrukce. Veškerá tato připojení mohou být zdrojem dalších cizích elektrických galvanických vlivů. Pokud však tato připojení mají nízký odpor k zemi, mohou na kolejový obvod působit i pasivně - změnou impedančních poměrů v kolejovém obvodu či v celém systému kolejových obvodů. Právě tyto faktory ale rozhodujícím způsobem určují míru, s níž se cizí elektrické vlivy mohou v kolejovém obvodu uplatnit. Opět obecně lze tedy rozlišovat mechanismus vlivů aktivních a vlivů pasivních.

Kromě toho všechna vedení kolejového obvodu (vlastní kolejové vedení, vedení k napájecímu a přijímacímu konci kolejového obvodu, případné vedení mezi zdrojem referenčního napětí a fázově citlivým přijímačem) jsou vystavena indukčním vlivům elektromagnetických polí. Zde stojí za pozornost zejména veškerá s tratí více či méně souběžná elektroenergetická vedení, ale také elektromagnetická pole vznikající v blízkosti trakčních spotřebičů (zejména hnacích vozidel) a, při extrémní blízkosti a velkém výkonu,

Ing. Václav Chudáček, CSc., nar. 1943, absolvent VŠD 1965, obor bloky a spoje, pracovník oblasti sdělovací a zabezpečovací techniky VÚŽ.

Doc. Ing. Ivan Konečný, CSc., nar. 1942, absolvent VŠD 1965, obor bloky a spoje, vedoucí oblasti sdělovací a zabezpečovací techniky VÚŽ.

Ing. Karel Stoll, CSc., nar. 1933, absolvent ČVUT 1957, fakulta elektrotechnická, pracovník oblasti sdělovací a zabezpečovací techniky VÚŽ.

např. i rádiové vysílače. Aktivní vlivy lze tedy (opět obecně) dělit na vlivy galvanické, indukční a kapacitní. U vlastního kolejového vedení kolejových obvodů se kapacitní vlivy obvykle neuvažují vzhledem k malé vzdálenosti vedení od země, u ostatních vedení se neuvažují vzhledem k dnes výhradnímu používání kabelů.

2. Působení vlivů

Mechanismus, kterým cizí vlivy na kolejové obvody působí, se výrazně liší podle konfigurace a stavu kolejového obvodu a typu zdroje rušení.

2.1 Galvanický vliv trakčního proudu

2.1.1 Jednopásové obvody

Na obr.1 se trakční proud I_r , protékající kolejovým obvodem, rozdělí na část I_t (protékající trakční kolejnici) a část I_s (protékající signální kolejnici a také výstrojí napájecího konce N a přijímacího konce P kolejového obvodu). Velikost proudu I_s bude (se zanedbáním odporu šuntu)

$$I_s = I_t \frac{Z_t}{\Sigma Z},$$

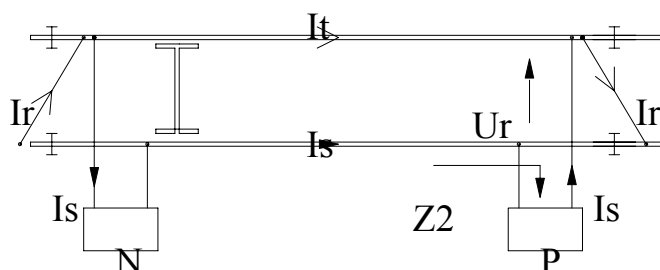
kde:

I_s je proud signální kolejnici a tím i přijímacím koncem kolejového obvodu [A],

I_t je proud trakční kolejnici [A],

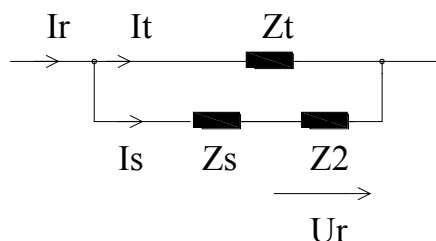
Z_t ... je podélná impedance zpětného trakčního vedení (trakční kolejnice) v délce kolejového obvodu, nebo, v případě šuntu, mezi přijímacím koncem a šuntem [Ω],

ΣZ ... je impedance obvodu tvořeného signální kolejnici a oběma zakončovacími impedancemi nebo, v případě šuntu, zakončovací impedancí reléového konce a podélnou impedancí signální kolejnice mezi přijímacím koncem a šuntem [Ω].



Obr. 1

Uvážíme-li zjednodušené náhradní schéma při šuntu na napájecím konci (obr. 2), kdy vliv bude v reálných případech největší, pak pro maximální napětí na přijímacím konci kolejového vedení, způsobené proudem I_r , můžeme psát



Obr. 2

$$U_{r\max} \cong I_r \cdot Z_2 \frac{z_t \cdot l}{|z_t \cdot l + z_s \cdot l + Z_2|},$$

kde:

$U_{r\max}$... je maximální vlivové napětí na kolejnicích na přijímacím konci kolejového obvodu [V]

I_r ... je celkový ovlivňující proud tekoucí kolejovým obvodem [A],

z_t ... představuje měrnou podélnou impedanci trakční kolejnice ($Z_t = z_t \cdot l$) [Ω/km],

z_s ... představuje měrnou podélnou impedanci signální kolejnice ($Z_s = z_s \cdot l$) [Ω/km],

l ... je délka kolejového obvodu nebo vzdálenost šuntu od přijímače [km],

Z_2 ... představuje impedanci přijímacího konce kolejového obvodu ze strany kolejnic [Ω].

Pokud

$$Z_2 \gg |z_t \cdot l + z_s \cdot l|,$$

což je u reálných obvodů často splněno díky vysokému tlumicímu odporu na přijímacím konci, pak

$$U_{r\max} \cong I_r \cdot z_t \cdot l.$$

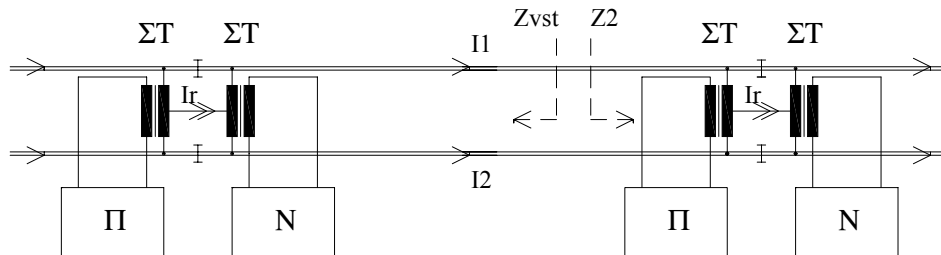
To odpovídá zjednodušenému pohledu, že u jednopásových kolejových obvodů je přijímací konec ovlivňován úbytkem napětí, vzniklým průtokem trakčního proudu trakční kolejnicí.

Při přerušení signální kolejnice lze vliv zanedbat, zatím co při přerušení trakční kolejnice by celý trakční proud protékal napájecí a přijímací výstrojí kolejového obvodu. U ČD je ale vyloučeno použití jednopásového kolejového obvodu v místech, kde by tvořil jedinou cestu pro průtok zpětného trakčního proudu - vždy je k dispozici alternativní cesta, např. dalším souběžným kolejovým obvodem. Pak stačí vzít v úvahu hodnotu z_t pro nejnepríznivější konfiguraci, což je ve většině případů právě podélná impedance jedné kolejnice v nejdelším možném kolejovém obvodu. Situaci při selhání (přerušení) i paralelních cest odvodu trakčního proudu řeší proudová ochrana výstroje - tedy pojistky v kolejovém obvodu, co nejbliže ke kolejím.

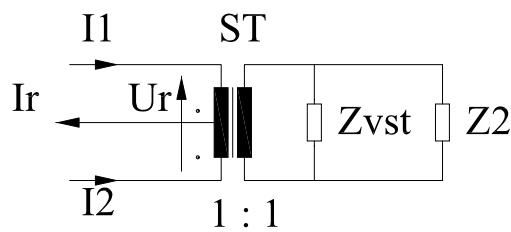
2.1.2 Dvoupásové obvody

U dvoupásového obvodu (obr. 3) ovlivňující trakční proud I_r přitéká do kolejového obvodu středem stykového transformátoru ST, na jehož sekundárním vinutí je připojena výstroj napájecího nebo přijímacího konce kolejového obvodu. Výstroj přijímacího konce

představuje impedanci Z_2 , impedance Z_{vst} představuje zpětnou impedanci kolejového obvodu (popř. včetně šuntu) ze strany přijímacího konce. Představíme-li si nyní stykový transformátor jako ideální transformátor s vyvedeným středem na primáru a převodem 1 : 1, zatímco vlastnosti skutečného stykového transformátoru (převod, magnetizační impedance, rozptyl) jsou zahrnuty do impedance přijímacího konce Z_2 , platí pro analýzu vlivů trakčního proudu v kolejovém obvodu náhradní schéma z obr. 4.



Obr. 3



Obr. 4

Ovlivňující proud vyvolá na přijímacím konci kolejového vedení ovlivňující napětí U_r , úměrné velikosti rozdílu proudů I_1 a I_2 , které ale protékají vždy jen jednou polovinou primárního vinutí, zatímco napětí U_r sledujeme na celém primáru. Tedy:

$$U_r = \frac{1}{2} \frac{Z_{vst} \cdot Z_2}{|Z_{vst} + Z_2|} (I_1 - I_2),$$

kde :

U_r .. je vlivové napětí na kolejničích na přijímacím konci kolejového obvodu [V]

I_1, I_2 .. jsou trakční proudy jednotlivých kolejnič [A],

Z_2 je zakončovací impedance kolejového vedení na přijímací straně [Ω],

Z_{vst} ... je zpětná impedance kolejového obvodu ze strany přijímacího konce [Ω].

Pro většinu dlouhých kolejových obvodů ČD je možné zpětnou impedanci Z_{vst} považovat za vlnovou impedanci kolejového vedení (i v případě šuntu na napájecím konci) a protože v řadě případů je (z jiných důvodů) impedance přijímacího konce také přibližně rovna vlnové impedanci kolejového vedení, lze pro ovlivňující napětí psát přibližný výraz

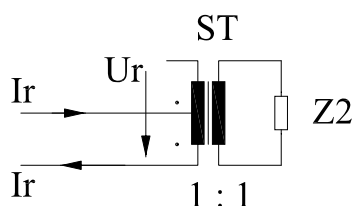
$$U_r \cong \frac{1}{4} Z_2 (I_1 - I_2),$$

Pokud proudy I_1 a I_2 budou stejně velké, na přijímači se žádné cizí napětí neobjeví. Za provozně dosažitelnou asymetrii dvoupásového kolejového obvodu, definovanou jako

$$a = \frac{|I_1 - I_2|}{I_1 + I_2} \cdot 100 \quad [\% ; A],$$

se považuje $a \leq 10\%$. K této hodnotě se obvykle přihlíží i při konstrukci obvodů, když se kontroluje, že i při této asymetrii bude zajištěna řádná funkce (např. při změně magnetizační impedance stykových transformátorů při přesycování). Ke zvýšení asymetrie dochází zejména přímým ukolejňováním konstrukcí s nízkým zemním odporem na jednotlivé kolejnicové pasy a závadami v podélné impedanci kolejnic (špatně vodivé propojky na nesvařených kolejnicových pasech, nedokonale vodivá připojení lan stykových transformátorů atd.).

Extrémním případem je pak přerušení propojovacího lana ke stykovému transformátoru nebo lom koleje v blízkosti přípojného lana stykového transformátoru na přijímacím konci, kdy celý ovlivňující proud protéká pouze jednou polovinou primárního vinutí stykového transformátoru (obr. 5). Na rozdíl od jednopásových obvodů (nebo i obvodů se stykovou tlumivkou) se přes stykový transformátor do výstroje přenese jen střídavá složka trakčního proudu a tak u stejnosměrné trakce nelze spoléhat na proudové ochrany výstroje. Na přijímacím konci kolejového vedení se v takovém případě může objevit, s jistým zjednodušením, bez ohledu na přítomnost či nepřítomnost šuntu ($Z_{vst} = \infty$), maximální napětí U_{rmax} dané proudem I_r :



Obr. 5

$$U_{rmax} \cong \frac{1}{2} Z_2 I_r,$$

kde :

U_{rmax} ..je maximální ovlivňující napětí mezi kolejnicemi na přijímacím konci kolejového obvodu [V],

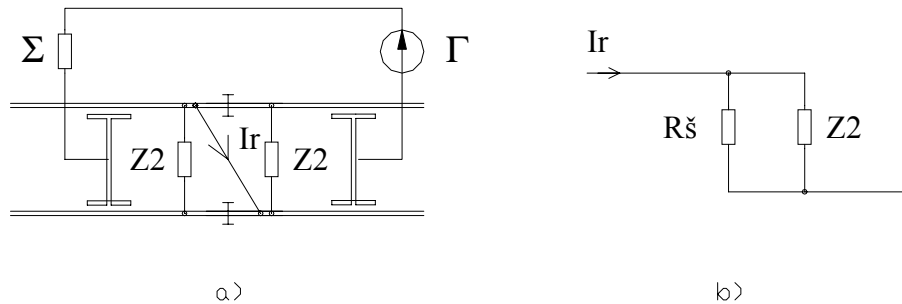
I_r je trakční proud [A],

Z_2 je zakončovací impedance kolejového vedení na přijímací straně [Ω].

2.2 Galvanický vliv topného proudu

U jednopásových kolejových obvodů při elektrickém topení není nutné uvažovat s úbytkem napětí na trakční kolejnici - je možné uvažovat s přítomností šuntu, ale nelze uvažovat propojení zpětného topného proudu přes kostry vozidel, protože to je nestabilní. Impedance přijímacího konce je tedy šuntována vlakovým šuntem (s hodnotou mezního

vlakového šuntu $R_{\text{š}} = 0,1 \Omega$. Za nejnepříznivějšího stavu, kdy celá hodnota šuntovacího odporu je soustředěna na jednom (nepříznivém - na obr.6 např. levém horním) přechodu kolo-kolejnice, ovlivňující napětí na přijímacím konci (na straně kolejnic) může dosáhnout maximálně hodnoty :



Obr. 6

$$U_{r \max} = \frac{Z_2 \cdot R_{\text{š}}}{Z_2 + R_{\text{š}}} I_r,$$

což za běžných okolností, kdy $Z_2 \gg R_{\text{š}} = 0,1 \Omega$ přejde na tvar

$$U_{r \max} \cong I_r \cdot R_{\text{š}} = 0,1 \cdot I_r.$$

Také v tomto případě lom "trakční" kolejnice u jednopásového obvodu nezpůsobí zvláštní ohrožující vliv, neboť lze spoléhat na proudovou ochranu (pojistky) ve výstroji kolejového obvodu.

V případě dvoupásového kolejového obvodu je nejhorší situace obdobná s případem 100% asymetrie při vedení trakčního proudu (odst. 2.1.2) - šunt rušivého proudu se pro přerušení lana stykového transformátoru také neuplatní.

2.3 Indukční vliv

Vliv ovlivňujícího vedení na vedení ovlivňované lze obecně popsat [1]:

$$\frac{d\mathbf{I}_x}{dx} = \mathbf{Y}_{12} \mathbf{U}_1 - \mathbf{y} \mathbf{U}_x$$

$$\frac{d\mathbf{U}_x}{dx} = -\mathbf{W}_{12} \mathbf{I}_1 - \mathbf{z} \mathbf{I}_x$$

kde :

$\mathbf{W}_{12} \dots$ je měrná vazební impedance mezi vedením ovlivňujícím a ovlivňovaným,

$\mathbf{Y}_{12} \dots$ je měrná vazební admitance mezi vedením ovlivňujícím a ovlivňovaným,

$z, y \dots$ je měrná podélná impedance a příčná admitance vedení ovlivňovaného (kolejového), $U_1, I_1 \dots$ je proud a napětí ovlivňujícího vedení v místě souběhu.

Tyto rovnice neuvažují zpětný vliv vedení ovlivňovaného na vedení ovlivňující, předpokládají homogenní vedení a konstantní napětí a proud v ovlivňujícím vedení v celém souběhu. Dále rovnice platí pro ustálený stav při napájení harmonickým střídavým proudem. Platí však pro libovolné uspořádání obou vedení (obvody jednovodičové i vícevodičové), uspořádání je respektováno příslušnými hodnotami vazební admitance a impedance a primárními parametry vedení.

Pro řešení vlivů na kolejové vedení je možné zanedbat elektrickou indukci (kapacitní vliv), protože kolejnice leží prakticky na zemi, tedy $Y_{12} = 0$. Úplným řešením soustavy diferenciálních rovnic je pak

$$U_x = c_1 \cdot e^{\gamma x} + c_2 \cdot e^{-\gamma x}$$

$$I_x = \frac{1}{Z} \left(-\frac{W_{12}}{\gamma} I_1 - c_1 \cdot e^{\gamma x} + c_2 \cdot e^{-\gamma x} \right).$$

Konstanty c_1 a c_2 lze určit z mezních podmínek na počátku a konci vedení.

Při detailním sledování vlivů na kolejové obvody bylo třeba zkoumat vliv na jednotlivá vedení, která kolejový obvod tvoří (tj. první kolejnice-zem, druhá kolejnice-zem, kolejnice-kolejnice) a to od všech složek proudu ovlivňujícího vedení (fázových a nulové). Rozbory ukázaly, že problémy lze očekávat zejména u trojfázových vedení s účinně uzemněným nulovým bodem (což jsou v našich podmínkách rozvody zvn, vvn a nn). Dále se ukázalo, že při největších vlivech, způsobovaných vedeními zvn a vvn, pro vzdálenost vedení od kolejí větší než 100 m, činí složka, vzniklá působením jednofázového zkratového proudu na smyčku tvořenou v celém mezistaničním úseku oběma kolejnicovými pasy a zemí, více než 90 % celkového vlivu. S výjimkou velmi těsných souběhů stačí tedy sledovat pouze její působení a ostatní složky je možné zanedbat. Takto indukovaný proud protéká pak soustavou kolejových obvodů stejně jako např. trakční proud a stejným mechanismem také působí problémy v nesymetrickém kolejovém obvodu. Lze odvodit, že ovlivňující napětí mezi kolejnicemi na přijímacím konci U_r pak bude

$$U_r = \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^m W_{1/2i} \cdot I_{ni} \cdot l_i \cdot r_{vi}$$

kde :

I_n je trojnásobná nulová složka proudu trojfázového vedení při jednofázovém zkratu,

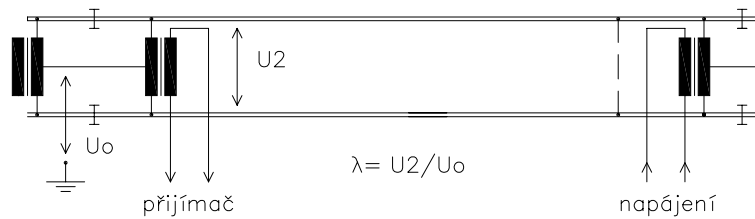
$W_{1/2}$ je vazební impedance mezi dvěma jednovodičovými vedeními,

l je délka souběhu,

i je index příslušného výpočetního úseku tak, jak jsou známy z výpočtů vlivů ve sdělovací technice,

r_v je výsledný redukční činitel,

λ je činitel citlivosti kolejových obvodů, tedy jakási napěťová obdoba dříve uvedeného proudového činitele asymetrie a (obr. 7).



Obr. 7

Vazební impedance musí být v uvedeném případě stanovena pro vazbu dvou jednovodičových vedení se zpětnou zemí. S využitím např. tzv. Haberlandova vztahu lze pak pro výpočet měrné vzájemné indukčnosti stanovit

$$L_{1/2} = 10^{-4} \cdot \ln \left(1 + \frac{6 \cdot 10^5}{a^2 \cdot \sigma \cdot f} \right) [\text{H/km}],$$

kde :

a .. je vzájemná vzdálenost obou vedení [m],

σ .. je měrná vodivost půdy [S/m],

f .. je kmitočet rušivého proudu [Hz].

Pro vazební impedanci pak samozřejmě platí, že $W_{1/2} = \omega \cdot L_{1/2}$.

Výpočty, potvrzené i měřeními na kolejových obvodech v reálných podmínkách (i s modelovanými zkratovými proudy) v 70tých letech v kooperaci ČD a energetického podniku ČEZ, prokázaly závažné problémy s kompatibilitou kolejových obvodů 50 Hz a energetických rozvodů (zejména zvn a vvn) i při souběžích se vzdáleností větší než 10 km. To vedlo nakonec k zákazu další výstavby kolejových obvodů 50 Hz i při stejnosměrné a nezávislé trakci.

Obdobné úvahy lze uvést i pro stanovení vzájemného ovlivnění souběžných kolejových obvodů. Vzájemnou indukčnost mezi dvěma symetrickými dvoudrátovými vedeními při uvažování vlivu země lze určit např. opět z Haberlandova vztahu jako

$$L_{12/34} = \frac{d^2 L_{1/2}}{da} \cdot a_{S1} \cdot a_{S2} = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot a_{S1} \cdot a_{S2}}{a^2} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot \sigma \cdot f \cdot 10^{-5}}{\left(1 + \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot \sigma \cdot f \cdot 10^{-5} \right)^2}$$

kde :

a_{S1}, a_{S2} jsou šířky smyčky dvojitých vedení [m],

a .. je vzájemná vzdálenost obou vedení [m],

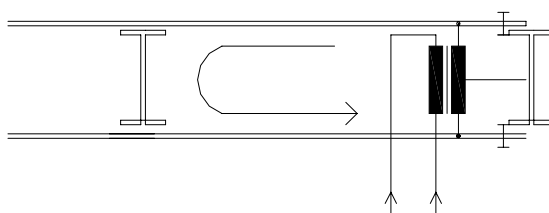
σ .. je měrná vodivost půdy [S/m],

f .. je kmitočet rušivého proudu [Hz].

S uvážením vzdálenosti středů kolejí cca 4 m, šířky kolejového vedení cca 1,5 m, vodivosti půdy 0,1 ÷ 0,001 S/m a frekvencí do 20 kHz lze pro kolejové obvody počítat s hodnotou vzájemné indukčnosti cca 0,03 mH/km. Tato vazba u kolejových obvodů v oblasti kHz již

nedovoluje pomíjet možnost vzájemného ovlivnění ani dokonale symetrických souběžných kolejových obvodů. Provoz souběžných traťových kolejových obvodů téhož kmitočtu je tím prakticky vyloučen.

V železniční praxi ČD se projevila i další druh indukčního vlivu - vliv na zabezpečovací zařízení na vozidle, způsobený trakčními zařízeními a silovými rozvody hnacích vozidel. Byl zaznamenán (přes obvyklé stínění) na vodičích mezi snímači a skříní vlakového zabezpečovače. Obdobný vliv však může působit i přímo na kolejové obvody (obr. 8). Tento vliv je velmi úzce spojen s konkrétní konfigurací trakčních obvodů (konkrétní uložení silových vodičů, motorů, měničů, stínění atd.) i konstrukcí kolejových obvodů (vedení přívodních lan, umístění stykových transformátorů atd.).



Obr. 8

2.4 Ukolejnění

Na elektrifikovaných tratích je z důvodu ochrany před nebezpečným dotykovým napětím nutné v prostoru ohrožení trakčním vedením vodivě spojovat s kolejemi všechny neživé části trakčního vedení a další nadzemní vodivé konstrukce. Dále se ke kolejím připojují úložná vodivá zařízení (kabely, potrubí, nosné podzemní nebo mostní konstrukce) při jejich protikorozní ochraně před bludnými proudy (elektrické drenáže). Všechna tato připojení ke kolejím - ukolejnění - mohou způsobit změnu vnějších podmínek činnosti kolejových obvodů. Ke změně může dojít pasivně - změnou struktury a velikosti impedancí kolejového vedení kolejových obvodů - a/nebo aktivně - přivedením cizích rušivých proudů do kolejových obvodů.

Pasivní působení je závislé na místě připojení ukolejnění, na velikosti odporu ukolejňovaného objektu vůči zemi či jinému místu a na konfiguraci ostatních ke kolejnicím připojených impedancí. Obecně lze říci jen to, že přímé připojení k jedné kolejnici dvoupásového obvodu způsobuje jeho nesymetrii a tedy zvětšuje jeho citlivost na jakékoliv případné zdroje aktivního rušení. Symetrické připojení ke středu stykového transformátoru znamená snížení impedance tohoto bodu vůči zemi. Oba způsoby ukolejnění mohou přispět k vytvoření obchozí cesty s nedostatečným útlumem. Také pro detekci havarijního stavu kolejového obvodu (detekci lomu kolejnice) je jedním z rozhodujících předpokladů dodržení určité velikosti impedance středu stykového transformátoru vůči zemi [1]. Pokud tato impedance bude nedostatečná (například vlivem přímého připojení konstrukcí s velmi nízkým odporem vůči zemi na středy stykových transformátorů na reléovém i napájecím konci), nebude obvod schopen identifikovat lom kolejnice. Důsledkem neidentifikace havarijního stavu kolejového obvodu může za určitých okolností být i ztráta schopnosti detekce šuntovaného stavu.

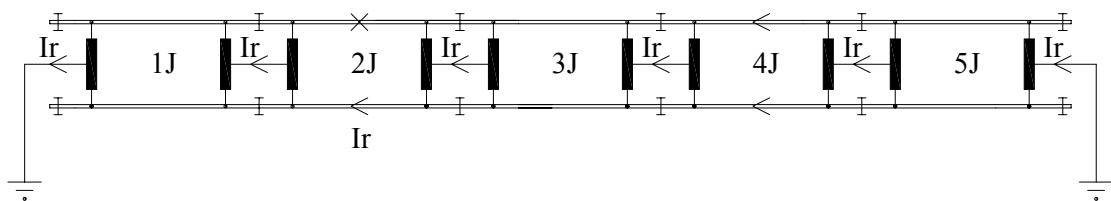
Potenciálními zdroji aktivního ovlivnění jsou veškerá připojovaná vodivá úložná zařízení, protože jejich prostřednictvím se mohou vyrovnávat zemní potenciály mezi

oblastmi, jimiž úložné zařízení probíhá a tak i do kolejí může být přiveden cizí proud. Obdobně, bude-li ukolejňovaná nadzemní vodivá konstrukce spojena s dalším elektrickým zařízením (jiné zařízení než části trakčního obvodu), může být tato konstrukce součástí onoho dalšího elektrického obvodu (nebo se jí stát vlivem poruchy) a být tak zdrojem aktivního ovlivnění. Takový případ by například nastal, když na připojované konstrukci bude upevněno jiné elektrické zařízení než části trakčního obvodu a jeho elektrické obvody budou s konstrukcí záměrně (např. nulování) či poruchou vodivě spojeny.

Dovolené způsoby ukolejnění jsou u ČD dány, v závislosti na velikosti jejich zemního odporu, možnosti aktivního působení a použitým typu kolejového obvodu v dané oblasti, normou ČSN 34 26 13.

2.5 Obchozí cesty

Pokud uvažujeme soustavu kolejových obvodů, např. v mezistaničním úseku podle obr. 9, je možné sledovat vzájemné galvanické ovlivňování i relativně vzdálených kolejových obvodů. Nesymetrií (způsobenou v tomto případě naznačeným lomem koleje) se kolejový



Obr. 9

obvod 2J stal zdrojem rušivého proudu I_r , který se v rámci celého mezistaničního systému (uvažujeme, v souladu se skutečností, že stanice představují díky svému rozvětvení relativně nízký odpor vůči zemi) vyrovnává tak, jako např. trakční proud. Ostatní kolejové obvody mohou být tímto proudem ohroženy v případě, že se také v nich vyskytuje nějaká nesymetrie. Nebude-li např. v obvodě 4J proud I_r rozdělen do obou kolejnic stejně, vznikne na jeho přijímači rušivé napětí úměrné rozdílu proudů v jednotlivých kolejnicích. Současně je obvod 4J také zdrojem rušení pro ostatní obvody a obvod 2J je extrémně citlivý na cizí rušivé proudy.

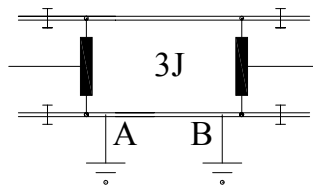
Cesty, v nichž se proud I_r může uzavřít, nazýváme obchozími cestami a jsou důsledkem skutečnosti, že vlastní kolejové vedení není dvojbranem s rozprostřenými parametry (jak je obvykle zjednodušeně uvažováno v teorii kolejových obvodů), ale je nutno brát v úvahu také vedení zemí [1]. Uvážíme-li možnost připojení různých konstrukcí přímo ke kolejnicovým pasům, mezikolejová trakční propojení atd., je zřejmé, že obchozí cesty obecně mohou mít různou, podstatně komplikovanější konfiguraci, než je konfigurace na obr. 9. Problémy lze očekávat vždy, když připojení ke kolejnicím jsou přímá (bez regenerovatelné průrazky), mají nízký odpor proti zemi, obchozí cesta má malý útlum a kolejové obvody jsou často, z různých důvodů a po dlouhou dobu, nesymetrické. Je evidentní, že proti takovým vlivům nejsou obvody chráněny běžně užívanými ochranami sousedních kolejových obvodů (fázová, frekvenční atd.).

Pozn.: V této souvislosti je třeba zmínit zvláště nepříjemný případ, který nastane při současném lomu koleje v sousedních kolejových obvodech. V závislosti na tom, které kolejnice se přeruší, může dojít (i přes správné vystřídání fáze v sousedních kolejových obvodech) ke sčítání vlastního (nyní nesymetrického) signálu se signálem sousedního obvodu (nyní také nesymetrickým a proto protékajícím středem stykového transformátoru do sousedního obvodu). V závislosti na konfiguraci celé situace (délce sousedících kolejových obvodů, rozmístění napájecích a přijímačových konců, nedostatečném útlumu celé obchozí cesty) může dojít ke stavu, kdy není zajištěn havarijní stav a, následně, ani šuntovaný stav postižených obvodů. Situace se může poněkud zlepšit změnou konfigurace napájecích a přijímačových konců (v závislosti na skutečné velikosti napětí a skutečném natočení fáze na styku kolejových vedení), ale toto opatření nemusí být za všech izolačních stavů a při různých délkách kolejových obvodů úspěšné. Z čistě zabezpečovacího hlediska by nebylo třeba popsany případ ošetřovat, protože představuje dvě nezávislé poruchy (dva různé lomy koleje), pokud po detekci první poruchy bude neprodleně zahájen opravný proces. Zabezpečovací fundamentalista ovšem může tvrdit, že tento případ může nastat i jednou příčinou – např. současným přerušením více lan vlečenou klanicí vypadlou z vlaku (popř. činností méně přizpůsobivých občanů) – a měl by pravdu, pokud by tak specifický jev (přeruší se pouze určitá lana a jiná ne) nebylo možné považovat za dostatečně nepravděpodobný, aby jej bylo možné zanedbat.¹

Technicky čistě řešení by spočívalo v kolejových obvodech, které samy svou funkcí dohlíží na to, že se v kolejovém obvodu nevyskytuje nadměrná asymetrie. Takové řešení je možné a dokonce je provozováno (např. u FS), ovšem za cenu podstatně zvýšených investičních nákladů a to nejen do kolejových obvodů, protože pak je třeba učinit i další technická opatření, která provozní symetrii kolejových obvodů za všech provozních stavů skutečně zajistí (např. ukolejňovací lana podél trati atd.).

Pokud takové řešení není k dispozici, musí ho nahradit odpovídající údržba. I tento případ dokumentuje důležitost udržování co nejlepší symetrie kolejových obvodů, odstraňování poruch v co nejkratší době, vyvarování se všeho, co by mohlo zbytečně snižovat impedanci případné obchozí cesty atd.

Obchozí cesty mohou vzniknout i ve vlastním kolejovém obvodu, jak je naznačeno na obr. 10. Budou-li např. v bodech A a B připojeny ke kolejnici dva objekty s nízkým izolačním odporem proti zemi, nebo mezi sebou navzájem, nebude část kolejnice mezi body A a B hlídána na lom koleje. Důsledkem bude, že při výskytu druhého lomu mezi body A a B nebude v úseku mezi oběma lomy zajištěno ani šuntování.



Obr. 10

¹ Za podrobné vyšetření takového konkrétního případu u Horní Lidče přísluší zvláštní uznání pracovníkům tamního údržovacího okrsku a pracovníkům SZL Olomouc a to včetně jejich nadřízených, kteří se postarali o to, aby zjištěný případ nebyl jako nepohodlný urychleně zameten pod koberec, ale naopak trvali na řádném vyšetření.

3. Charakteristika zdrojů cizích vlivů

Pro kolejové obvody mohou být v podmínkách ČD zdrojem rušení zejména :

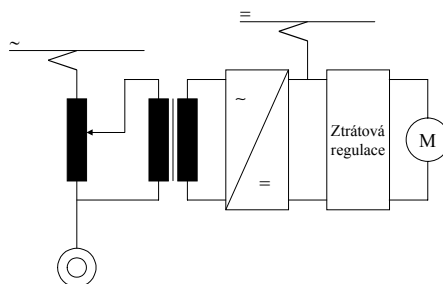
- trakční soustavy :
 - střídavá - 25 kV, 50 Hz,
 - stejnosměrná - 3 kV,
- elektrické topení,
- další zařízení připojená k trakčnímu nebo topnému vedení,
- ostatní elektroenergetická zařízení,
- ukolejnění,
- signální zdroje jiných kolejových obvodů:
 - sousední kolejové obvody,
 - souběžné kolejové obvody,
 - ostatní kolejové obvody, jejichž vliv může být zprostředkován tzv. obchozími cestami.

3.1 Trakce

3.1.1 Hnací vozidla

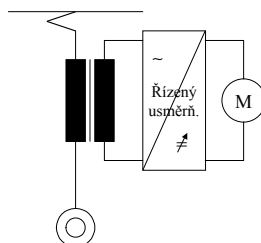
Dominantní je přímý galvanický vliv zpětného trakčního proudu protékajícího kolejnicemi od hnacího vozidla a ovlivňující kolejový obvod způsobem popsaným v části 2.1 a 2.2. Spektrum rušivých kmitočtových složek ve zpětném trakčním proudu je tak závislé jednak na napájecí soustavě a trakční napájecí stanici, jednak na hnacím vozidle, tj. typu trakčního motoru (stejnosměrný nebo střídavý asynchronní) a způsobu jeho regulace. Rychlý rozvoj výkonové elektroniky v posledním období vedl k několika odlišným principům regulace s výrazně odlišným spektrem rušivých vlivů. V následujících odstavcích je uveden jejich stručný přehled.

Klasická hnací vozidla (první generace) se vyznačují stejnosměrnými trakčními motory (pro stejnosměrnou i střídavou trakční soustavu) a regulací změnou napájecího napětí a změnou buzení (obr.11). Regulace na stejnosměrné trakci využívá rozjezdové odpory, přepínání buzení motorů a změnu řazení trakčních motorů do skupin. Na střídavé trakci je navíc použito přepínání odboček na trakčním transformátoru a následné usměrnění střídavého napětí diodovým můstkovým usměrňovačem. Rušivé proudy odpovídají v obou případech použitým neřízeným usměrňovacím členům - u stejnosměrné trakce usměrňovači v měničce, u střídavé trakce usměrňovači na vozidle.



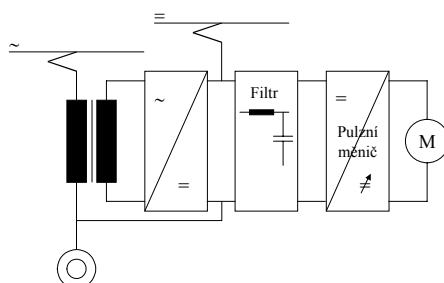
Obr. 11

Vývoj v hnacích vozidlech pak směřoval ke snižování ztrát při regulaci. K prvnímu uplatnění došlo u vozidel pro střídavou trakci, se stejnosměrnými trakčními motory s regulací napětí řízeným tyristorovým usměrňovacím můstkem (lze označit jako vozidla druhé generace, obr.12). Při tomto způsobu regulace napětí dochází k silnému tvarovému zkreslení odebíraného trakčního proudu, v závislosti na úhlu otevření tyristorů v usměrňovacím můstku. V rušivém spektru jsou vlivem řízených tyristorových usměrňovačů zvýrazněny zejména všechny liché harmonické složky základního kmitočtu, při nesymetrii vyniknou i sudé složky.



Obr. 12

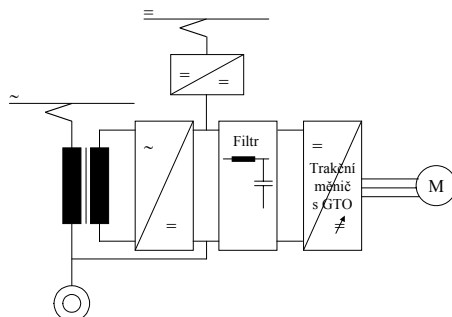
Další vývoj směřoval k trakčním měničům pro nízkoztrátovou regulaci hnacích vozidel se stejnosměrnými trakčními motory a to jak pro stejnosměrnou, tak střídavou trakční soustavu (třetí generace vozidel, obr.13). Tyto měniče využívají impulsní šířkovou modulaci (PWM), tj. pracují s proměnnou šířkou impulsu na jednom nebo více nosných kmitočtech. Mimo oblast ČD byly použity i měniče s tzv. dvouhodnotovým řízením, které generují plynule proměnné nosné kmitočty. Rušivé spektrum zpětných trakčních proudů pak obsahuje kmitočtové složky rovnající se řídicímu (nosnému) kmitočtu pulzního měniče a jejich násobkům. Pro jejich snížení je na vstupu zařazen LC filtr.



Obr. 13

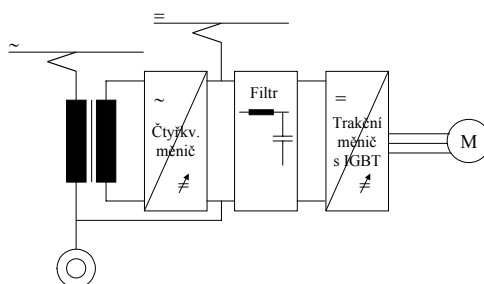
Další vývoj byl pak zaměřen na využití třífázových asynchronních trakčních motorů v hnacích vozidlech (vozidla třípůlté generace, obr. 14). Tyto motory byly zpočátku řízeny s pomocí proudových střídačů, v současné době jsou regulovány a napájeny měniči s plynule proměnným napětím a frekvencí. Typické je zde použití výkonových tyristorů GTO a nosný kmitočet měniče řádově ve stovkách Hz. Před vlastní trakční frekvenční měnič se na stejnosměrné trakci předřazuje pomocný měnič (snižující) na stejnosměrné mezinapětí, kterým je pak napájen vlastní trakční měnič. Při střídavé trakci zajišťuje stejnosměrné mezinapětí diodový můstek. Pro regulaci trakčního měniče je opět využito modulace PWM. Modulaci lze uskutečnit dvěma způsoby : buď se při konstantním nosném kmitočtu mění plnění periody (poměr impuls/mezera), nebo se při konstantní šířce impulsu mění perioda nosného kmitočtu. V reálných trakčních měničích se pak využívá kombinace obou způsobů. Lze tak minimalizovat dynamické (spínací) ztráty na výkonových spínačích a optimalizovat rychlost odezvy při změnách. Pro snížení vstupní impedance a rušivých

kmitočtů je na stejnosměrném mezinapětí zařazen LC filtr typu dolní propust, s mezním kmitočtem cca 20 Hz. Spektrum rušivých kmitočtů je zde závislé na kmitočtu trakčního měniče a způsobu jeho regulace (sinusová modulace, obdélníkové řízení). Tyto rušivé kmitočty jsou na stejnosměrné trakci pak částečně filtrovány (resp. konvertovány) do jiné kmitočtové polohy pomocným měničem a LC filtrem.



Obr. 14

Nejnoveji jsou používány v trakčních měničích hnacích vozidlech s třífázovými asynchronními trakčními motory výkonové spínací tranzistory IGBT (vozidla čtvrté generace, obr. 15). Kaskádním řazením výkonových měničů (pro snížení jejich svorkových napětí) je zpravidla vypuštěn na stejnosměrné trakci snižující pomocný měnič a výkonové trakční měniče jsou připojeny přes filtr LC přímo na trakční vedení. Na střídavé trakci se využívá pro získání stejnosměrného mezinapětí pomocných tzv. pulzních usměrňovačů (čtyřkvadrantových měničů). Vlastní trakční měniče pracují s nosnými kmitočty řádově v jednotkách kHz a algoritmy jejich řízení (spolu s vlastnostmi pulzních usměrňovačů) umožňují i rekuperaci při brzdění. Pulzní usměrňovač umožňuje aktivní filtraci odebíraného trakčního proudu, takže průběh proudu je blízký sinusovému a ve fázi s napětím ($\cos \varphi \approx 1$). Teoreticky by tedy obsah rušivých signálů měl být (v provozním stavu) zejména na střídavé trakci minimální.



Obr. 15

Z uvedeného přehledu je patrné, jak významně se na potlačení rušivých kmitočtů podílí filtrační členy. Ty jsou ve všech případech konstruovány jako jednoduchý (ale výkonový) pasivní LC filtr typu dolní propust. Jeho případné poruchy (zejména odpojení části baterie kondenzátorů) mohou způsobit celkové zvýšení úrovně rušení nebo zvýraznění určité části rušivého spektra. Problematické jsou z hlediska zabezpečovací techniky nejen poruchové stavy, ale i další vlivy, které na kvalitu filtru působí, jako např. impedance napájecí soustavy, možnost nežádoucích rezonančních jevů (společně s napájecím vedením) atd.

Totéž co platí pro vlivy trakčních částí hnacích vozidel, ovšem v míře odpovídající výkonu, platí i pro vlivy ostatních, tzv. pomocných pohonů na hnacích vozidlech.

Kromě galvanického vlivu působí trakční soustava indukčními vlivy na veškerá vedení v souběhu s tratí, tj. zejména na slaboproudé rozvody železniční sdělovací a zabezpečovací techniky. Zvýšené rušivé proudy vyšších kmitočtů pak mohou mít vliv na kvalitu zejména sdělovacích kanálů doposud provozovaných po metalických vedeních, a proto je nutné uvažovat i psfometricky vážené komplexní vlivy. Teoreticky je možné uvažovat i o přímém indukčním vlivu elektromagnetického pole, vznikajícím v blízkosti trakčních obvodů na hnacích vozidlech, na výstroj kolejového obvodu či jiných částí zabezpečovacích zařízení (viz část 2.6). U ČD významný přímý vliv na kolejové obvody z tohoto titulu sice nebyl zaznamenán, ale ani se po něm nepátralo.

Kompatibilitu trakce a kolejových obvodů nelze vyřešit žádným jednorázovým opatřením. Vyžaduje trvalou pozornost a interdisciplinární přístup při každém novém potenciálním zdroji ovlivnění.

3.1.2 Další spotřebiče připojené k trakčnímu vedení

Z trakčního vedení jsou kromě hnacích vozidel prostřednictvím různých transformátorů nebo měničů napájena i některá železniční stacionární zařízení. Tak např. pro elektrický ohřev výhybek v zimním období se v současné době používá napájení odporových topnic napětím z trakčního vedení. Na střídavé trakci se napětí trakční sítě 25 kV/50 Hz transformuje na napětí 400 V (230 V) pomocí transformátorů, které jsou obvykle umístěny na sloupech trakčního vedení. "Neživý" konec primárního vinutí transformátoru se ukolejňuje na trakční kolejnici jednopásového kolejového obvodu nebo se připojuje na střed stykových transformátorů (dvoupásové kolejové obvody) v místech tzv. neomezeného připojení (ČSN 34 2613).

Na stejnosměrné trakční soustavě se k tomuto účelu využívají měniče ze stejnosměrného trakčního napětí 3 kV na střídavé napětí 50 Hz, 400 V (230 V). Výstupní napětí je zpravidla filtrováno a je sinusového tvaru. Měnič napětí je řešen s využitím tranzistorů IGBT ve výkonovém obvodu, pracuje s řízením PWM na konstantním nosném kmitočtu v kmitočtovém pásmu cca jednotek kHz. Obdobně jako u trakčních měničů je i v těchto případech třeba před jejich zavedením ověřit, že nebudou nepříjemně ovlivňovat kolejové obvody.

3.1.3 Střídavá trakční soustava 25 kV, 50 Hz

Ve zpětném trakčním proudu se vyskytují všechny složky, které jsou obsaženy již v primární napájecí soustavě, tedy kromě základního kmitočtu 50 Hz i jeho vyšší harmonické, ale také další jako např. signály hromadného dálkového ovládání (HDO), které jsou do napájecí soustavy injektovány k řídicím účelům. V rozvodech ČR se dnes k tomuto účelu nejčastěji používá signál o kmitočtu 216 Hz, klíčovaný sériovým kódem a může dosahovat až 5ti % napětíové úrovně příslušné sítě, ale nově jsou normovány i další kmitočty.

Hnací vozidla pak přispívají rušivými vlivy danými typy trakčních motorů a způsobem jejich regulace, jak je uvedeno pro jednotlivé typy v odstavci 3.1.1. Dále se ve spektru zpětných trakčních proudů mohou objevit interferenční kmitočty odvozené z rozdílů kmitočtů jednotlivých pulzních měničů v témže napájecím úseku (včetně kmitočtů harmonických).

Ochranná opatření proti vlivům střídavé trakce jsou komplikována nejvíce ohledem na nutnost dodržet maximální normou dovolenou úroveň nebezpečných dotykových napětí neživých vodivých částí, nacházejících se v blízkosti trakčního vedení.

3.1.4 Stejnoseměrná trakční soustava 3 kV

Ve zpětném trakčním proudu se vyskytuje zbytkové zvlnění, pocházející z trakčních usměrňovačů v měničce. U ČD se používají dvanáctipulzní trakční usměrňovače a tedy typický je výskyt složky 600 Hz a všech jejich vyšších lichých násobků (v menší míře i sudých). Metro obvykle využívá šestipulzních usměrňovačů s typickým výskytem složky 300 Hz. Filtrační obvody instalované v měnicích pro jejich potlačení mají (obdobně jako na vozidlech) omezenou účinnost. Starší pokusy o zvýšení jejich účinnosti narazily na problémy s rezonancemi vznikajícími v součinnosti s proměnnou charakteristikou trakčních vedení. Problematické jsou také poruchové stavy usměrňovačů, kdy např. při neplnofázovém provozu usměrňovačů se mohou vyskytovat prakticky všechny harmonické složky napájecího kmitočtu 50 Hz včetně základní. Tato okolnost vylučuje setrvání u kolejových obvodů 50 Hz bez specifických ochranných opatření i na stejnosměrné trakci.

Přiměřeně se uplatní také všechny další proudové složky, které se vyskytují v napájecí síti, tedy např. proudy HDO. Zajímavostí je jejich frekvenční transformace vlivem trakčních usměrňovačů v měničce. Obecně dochází k posunu původní frekvence rušivého signálu o $\pm n \cdot 50$ Hz, protože v závislosti na konstrukci a počtu fází usměrňovače (n) dochází při usměrňování síťového proudu vlastně k jejich amplitudovému nebo frekvenčnímu klíčování právě síťovou frekvencí.

Při využívání trakčních měničů na hnacích vozidlech platí obdobné závěry jako na střídavé trakci.

Díky zvýrazněným spektrálním složkám trakčního proudu je nutné kontrolovat i indukční vlivy stejnosměrné trakční soustavy na souběžná vedení, protože ta, s ohledem na bludné proudy, nemohou využívat stínících efektů uzemněných vodičů či pláště.

Ochranná opatření proti vlivům stejnosměrné trakce jsou obecně komplikována nejvíce ohledem na bludné proudy, které velmi nepříznivě působí na veškerá úložná zařízení. Je nutné se vyhnout opatřením, která by bludné proudy enormně zvyšovala.

3.2 Elektrické topení

Při elektrické trakci je topení v osobních vozech napájeno prostřednictvím průběžného topného kabelu z hnacího vozidla. Na stejnosměrné trakci je kabel napájen přímo trakčním stejnosměrným napětím 3 kV, na střídavé trakci střídavým napětím 3 kV/1,5 kV z odbočky trakčního transformátoru. Zpět ke zdroji se topný proud vrací kolejnicemi.

I na hnacím vozidle nezávislé trakce může být pro elektrické topení a centrální napájení vozů elektrickou energií instalován topný alternátor, poháněný trakčním spalovacím motorem. V podmínkách ČD je použit alternátor s můstkovým usměrňovačem. Musí být proveden tak, aby základní harmonická složka topného proudu při normálním provozním stavu (plnofázový chod alternátoru i usměrňovače) byla větší než 300 Hz. Toho je třeba dosáhnout i při minimálních možných otáčkách, daných volnoběžnými otáčkami spalovacího motoru. Za jízdy se pak agregát točí rychleji a tedy střídavé složky proudu jsou nad frekvencemi provozovaných kolejových obvodů. Problémem je, obdobně jako u stejnosměrné trakce, poruchový stav, kdy se ve výstupním proudu mohou vyskytnout harmonické složky

základního kmitočtu alternátoru. Pokud by takový stav mohl nastat a vlivy by přesahovaly únosnou mez, musí být na plnofázový provoz alternátoru bezpečně dohlíženo.

Ústřední zásobování osobních vozů elektrickou energií je odvozeno ze stejného zdroje jako vlakové topení.

Při hodnocení vlivu topení je možné vzít v úvahu, že vliv je za normálních okolností, v porovnání např. s vlivy trakce, omezený prostorově (délkou vlaku) i časově (dobou průjezdu vlaku) - viz odst. 2.3.

3.3 Výkonové měniče v osobních vozech

Pro napájení osvětlení, klimatizace a ostatních elektrických zařízení v moderních osobních železničních vozech se používají měniče napětí se shodným obvodovým řešením a vlastnostmi, jako jsou měniče využívané pro elektrický ohřev výhybek. Měníče jsou napájeny z průběžného topného kabelu stejnosměrným, nebo na vstupu měniče usměrněným střídavým napětím (měniče jsou obvykle vybaveny automatickým přepnutím vstupního napájecího napětí podle druhu trakce).

3.4 Ostatní elektroenergetická zařízení

Obecně mohou být zdroji ovlivnění veškeré procesy výroby a rozvodu elektrické energie. V elektroenergetické soustavě jsou v ČR v úrovni zvn a vvn provozovány třífázové rozvody s účinně uzemněným nulovým bodem, v úrovni vn s izolovaným středem a v úrovni nn opět s uzemněným středem. Tyto rozvody působí na veškerá elektrická vedení, tedy i na vedení kolejové, zejména indukčním vlivem (kapacitní vliv lze obvykle opět s ohledem na stínění kabelů a malou výšku kolejového vedení nad zemí zanedbat). V blízkosti velkých zemních sítí (elektrárny, rozvodny) se mohou vyskytovat i galvanické vlivy na vedení. Jak indukčním, tak galvanickým vlivem se do kolejového obvodu mohou dostat rušivé proudy síťového kmitočtu 50 Hz a jeho vyšších harmonických složek, případně i další složky obsažené v rozvodech (např. opět HDO).

Méně často se lze (zejména v městských a průmyslových aglomeracích) setkat s vlivy jiných systémů, provozovaných městskou hromadnou dopravou (stejnoseměrné systémy) nebo velkými podniky - doly, válcovny (výkonové měniče s proměnným kmitočtem, často v oblasti pod kmitočtem sítě).

3.5 Ukolejnění

Podle charakteru ukolejňeného objektu je třeba posuzovat nebezpečí aktivního působení a odhadovat kvalitu možných rušivých proudů. Většinou lze předpokládat, že aktivní ovlivnění bude mít charakter síťového proudu (50 Hz včetně vyšších harmonických složek) a/nebo stejnosměrného proudu (přičemž potenciál proti kolejnici se může měnit). V některých případech však může být přiveden i proud jiných kmitočtů. To je třeba ověřit zejména v případech ukolejňování nestandardních zařízení a v případech, kdy připojovaná konstrukce může být záměrně či poruchou součástí jiného elektrického zdroje.

Kolejové obvody, provozované u ČD na vyhrazených frekvencích 75 Hz a 275 Hz, mají dostatečnou ochranu před cizími vlivy mimo oblast těchto vyhrazených frekvencí a proto není třeba se ve standardních případech možností aktivního ovlivnění v praxi zabývat. To

však neplatí pro starší kolejové obvody 50 Hz, dosud provozované na některých úsecích se stejnosměrnou trakční soustavou nebo nezávislou trakcí. Ohrožený přitom může být nejen kolejový obvod v místě připojení, ale i obvody do jisté vzdálenosti od místa připojení, protože ovlivňující proud I_r se může kolejemi šířit obdobně jako proud trakční.

3.6 Signální zdroje jiných kolejových obvodů

V závislosti na použité struktuře kolejových obvodů a charakteru obchozí cesty se tyto zdroje nemusí od vlastního signálního zdroje nijak lišit ani frekvencí, ani fází, ani případným kódováním a tedy se jim nelze účinně bránit, pokud proniknou až na přijímací konec kolejového obvodu.

Ochranným opatřením proti tomuto druhu rušení je zatím nejen u ČD pouze pořádek a pečlivost údržby. V udržování pořádku v tomto směru napomáhá koordinační plán ukolejnění, který obsahuje všechny relevantní objekty v dané oblasti, předepisuje způsob jejich propojení s kolejnicemi a je vytvořen společně silnoproudými a zabezpečovacími odborníky tak, aby vyhovoval oběma odvětvím. Řádná údržba pak musí zajistit trvalý soulad mezi plánem a realitou. Dále musí údržba zajistit, že případné poruchou vzniklé závady v symetrii kolejového obvodu nezůstanou dlouho neodhaleny a neopraveny. K tomu slouží i periodická měření a prohlídky.

4. Mezní hodnoty vlivů na přijímačích

Cizí vlivy, v závislosti na své povaze a velikosti, mohou na kolejové obvody působit rušivě, tj. nepříznivě ovlivňovat jejich spolehlivou funkci, nebo dokonce způsobit ohrožení bezpečnosti dopravy tím, že by např. paralelní kolejové obvody falešně hlásily volnost obsazeného kolejového úseku.

Podle doby trvání vlivu může být vliv trvalý, dlouhodobý nebo krátkodobý, přičemž za trvalý vliv se považuje vliv způsobený provozním stavem ovlivňujícího zařízení, za dlouhodobý se považuje vliv vyvolaný takovou poruchou ovlivňujícího zařízení, která může trvat řádově v minutách až hodinách a za krátkodobý se považuje vliv vyvolaný takovou poruchou ovlivňujícího zařízení, která může trvat řádově v sekundách. Tato obecná terminologie je převzata z oblasti ochran sdělovacích vedení před nebezpečnými vlivy elektroenergetických vedení a zařízení pro usnadnění komunikace s jinými odvětvími. Z hlediska hodnocení vlivu na kolejové obvody nemá význam oddělovat trvalé a dlouhodobé vlivy; krátkodobé vlivy lze pak odlišně posuzovat (viz dále) jen v případě, že trvají kratší dobu než je reakční doba přijímačů kolejových obvodů, protože je třeba brát v úvahu možnou sekvenční činnost navazujících logických obvodů.

Při ovlivnění je třeba počítat s tím, že se k vlastnímu napětí v kolejovém obvodu superponuje napětí cizího vlivu. Důsledky budou různé podle velikosti, frekvence a fáze ovlivňujícího napětí a podle typu přijímače, popřípadě i podle druhu kódování signálu. V úvahu je třeba brát, tak, jak je v zabezpečovací technice obvyklé, nejnepříznivější případ. To je obvykle (v případě, že rušení je jevem nezávislým na vlastním kolejovém obvodu) prostá adice účinných složek za nejnepříznivější konfigurace.

4.1 Trvalé nebo dlouhodobé ohrožující vlivy

Aby nedošlo k ohrožujícímu vlivu na staticky pracující kolejový obvod, nesmí velikost vlivu U_v v okamžiku, kdy vozidlo obsazuje kolejový obvod, překročit hodnotu danou rozdílem napětí odpadu U_o a nejvyššího možného napětí U_s , vyskytujícího se na přijímači v šuntovaném stavu v době, kdy přijímač není ovlivňován cizím vlivem, tedy (viz obr. 11) :

$$U_v < U_o - U_s .$$

Aby nedošlo k ohrožujícímu vlivu na staticky pracující kolejový obvod v době, kdy je kolejový obvod již obsazen (tj. kolejové relé je odpadlé vlivem přítomného vlaku nebo poruchou obvodu), nesmí velikost vlivu U_v překročit hodnotu danou rozdílem napětí nepřítahu U_{np} a nejvyššího možného napětí vyskytujícího se na přijímači při šuntu U_s (resp. v havarijním stavu U_h - hodnoty U_h i U_s jsou ale obvykle velmi blízké), tedy :

$$U_v < U_{np} - U_s ,$$

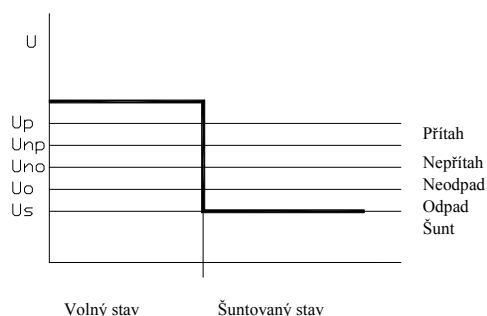
Pro impulsně pracující kolejový obvod obdobně platí (v obou případech stejně), že velikost vlivu U_v nesmí překročit hodnotu danou rozdílem napětí nepřítahu U_{np} a nejvyššího možného napětí vyskytujícího se na přijímači při šuntu U_s , tedy :

$$U_v < U_{np} - U_s ,$$

ale pokud cizí vliv stoupne tak, že

$$U_v - U_s > U_{no} ,$$

nedojde při šuntu k odpadu přijímače, příslušný dekodér vyhodnotí situaci bezpečně a ohrožující vliv nevznikne. Existuje tedy i u impulsních kolejových obvodů oblast velikosti vlivu, kdy neimpulsní rušivé napětí ohrozí šuntovou citlivost obvodů. Situace bude (na první pohled paradoxně) tím příznivější, čím menší bude koeficient vypnutí přijímače.



Obr. 16

4.2 Krátkodobé ohrožující vlivy

Z pouhé okolnosti, že vliv není trvalý, neplynou ani u staticky ani u impulsně pracujících obvodů žádné úlevy proti vlivům trvalým, pokud „krátkodobý“ vliv není kratší

než doba reakce kolejového přijímače resp. navazujícího zařízení. Pro nejběžněji u ČD používané přijímače typu DSS je pro tento účel obecně možné uvažovat s dobou reakce maximálně 100 ms. Pro vlivy kratší než 0,1 s lze pak uvažovat s limitní hodnotou krátkodobého rušivého napětí U_{vk}

$$U_{vk} = \frac{U_v}{10 \cdot t_k},$$

kde t_k ... je doba trvání krátkodobého vlivu $t_k < 0,1$ [s].

V časové oblasti je nutné uvažovat ještě další okolnosti. První je skutečnost, že doposud byla uvažována pouze selektivita přijímačů za podmínek ustáleného stavu rušivého vlivu. Jakýkoliv přechodový jev ale vyvolává celé spektrum rušivých kmitočtů, které nesouvisí s kmitočtem rušivého vlivu za ustáleného stavu a tedy může způsobit i vliv na přijímače kolejových obvodů pracující při vyhrazeném kmitočtu. Trvání takového vlivu (např. rozkmitání filtru) je pak závislé na konkrétní konstrukci jak ovlivňujícího, tak ovlivněného zařízení, přičemž rozhodující je dodaná energie do kolejového přijímače. Navíc je nutné omezit četnost výskytu takových krátkodobých rušivých proudů (např. ohled na LVZ nás nutí k opatrnosti vždy, kdy by se mohly vyskytovat přechodové jevy s četností vyšší než 1 Hz). Pokud tedy vzniknou z konfigurace obvodů pochybnosti v těchto směrech, je nutné vždy přinejmenším aplikovat limitní hodnoty U_v pro vlivy trvalé.

4.3 Rušivé vlivy

Aby se na kolejovém obvodu neprojevil rušivý vliv, tj. aby volný kolejový obvod nebyl hlášen jako obsazený, nesmí velikost vlivu U_v překročit rezervu napětí na přijímači od hodnoty přitahu (je nutno brát v úvahu přitah po předchozím šuntu), tedy

$$U_v < U_{pr} - U_p,$$

kde

U_{pr} ... je nejmenší napětí vyskytující se na neovlivněném kolejovém přijímači při volném stavu,

U_p ... je napětí přitahu přijímače.

5. Hodnocení vlivů

Při hodnocení vlivů je třeba obecně brát v úvahu řadu ne zcela souměřitelných faktorů:

- energii dodanou v jednotlivých stavech vlastním napájením kolejového obvodu,
- energii dodanou v jednotlivých stavech cizím vlivem,
- současnost jejich působení,
- limit dovoleného ohrožujícího vlivu,
- limit dovoleného rušivého vlivu,
- důsledky vlivů na bezpečnost a spolehlivost celého systému – vzhledem k tomu, že kolejový obvod je primárním prvkem informace ve všech sofistikovanějších zabezpečovacích systémech, není rozumné zde dělat nějaké kompromisy a to ani z hlediska bezpečnosti, ani z hlediska spolehlivosti,

- možné současné působení více různých vlivů - zdrojem rušení může být například více hnacích vozidel v jednom trakčním úseku, mohou se kombinovat cizí indukční vlivy s vlivy galvanickými atd.

a to při uvažování všech stavů kolejového obvodu i ovlivňujícího zařízení (včetně poruchových).

Jak patrně z předchozích částí, stanovení mezí, při nichž k ohrožujícímu resp. rušivému vlivu ještě nedojde, znamená nejprve stanovit, s jakou rezervou splňuje kolejový obvod normovanou šuntovou citlivost, citlivost k lomu koleje a případně i další zaručované parametry kolejového obvodu (např. ve vztahu k zařízení VZ). Přitom je nutno uvažovat všechny typy kolejových obvodů, které mohou být vlivem postiženy, všechny jejich konstrukční délky, poruchové stavy atd. Z takto rozsáhlého rozboru je nutné vybrat nejnejpříznivější případ.

Dále je patrné, že při určování nejdůležitější dovolené meze ovlivnění, tj. ohrožujícího ovlivnění z hlediska šuntové citlivosti, se vyskytují dvě hodnoty charakterizující rezervu v šuntové citlivosti (resp. v havarijním stavu) – jednou vůči hodnotě odpadu přijímače, podruhé vůči hodnotě zaručeného nepřítahu přijímače.

První případ odpovídá situaci, kdy dvoupásový kolejový obvod (doposud hlášen jako volný) je za působení rušivého vlivu obsazován vlakem a přitom má dojít ke změně na stav "obsazen". Jen v případě vyloučení situace, kdy současně dojde k rušení, obsazení kolejového obvodu a lomu koleje, bylo by možné uvažovat rušivý proud v dvoupásovém kolejovém obvodu s normální, tj. provozní asymetrií. Pokud tento stav nelze vyloučit (a v podmínkách ČD se skutečně nevylučuje, protože lom bývá spojen právě s jízdou vlaku), je nutné počítat se 100% nesymetrickým rušivým proudem. Druhý případ odpovídá situaci, kdy kolejový obvod je pro poruchu (lom koleje nebo přerušení přípojných lan) ve stavu "obsazen" a vlivem rušení by mohl být hlášen jako "volný" (třeba i při obsazení vlakem). I v tomto případě je třeba uvažovat 100% nesymetrický rušivý proud.

Pro jednotlivé případy rušení je pak nutné aplikovat vždy příslušnou hodnotu. Uvedme ještě, že hodnota zaručeného nepřítahu přijímačů indukčního typu je jen o málo vyšší než hodnota odpadu a je velmi vzdálená od hodnoty přítahu. Obdobný závěr platí i pro fázové detektory.

V podmínkách ČD se na základě analýz všech standardně používaných dvoupásových kolejových obvodů za přijatelnou hodnotu ohrožujícího i rušivého vlivu považuje jednotně 5 % napětí přítahu staticky pracujícího kolejového přijímače (měřeno na přijímači). Tuto hodnotu není v žádném případě možno považovat za příliš úzkoprsou. U většiny používaných kolejových obvodů navržených pro šuntovou citlivost $0,1 \Omega$ a zaručujících detekci lomu koleje znamená přípuštění takto velkého ovlivnění snížení šuntové citlivosti až k původní, doposud u ČD normované hodnotě $0,06 \Omega$, aniž by se uvažoval synergický efekt více zdrojů ovlivnění, tolerancí výstroje atd. Je třeba konstatovat, že návrh „lepšího“ kolejového obvodu při současné technické délce ($1,5 \div 2,0$ km), maximálním dovoleném svodu ($y = 1,0$ S/km), zajištění detekce lomu koleje a se stávajícími reléovými přijímači (koeficient vypnutí 0,5) je mimo technické možnosti. Zlepšení by bylo možné očekávat teprve při hromadném nasazení kolejových obvodů s elektronickými přijímači s podstatně vyšším koeficientem vypnutí nebo při opuštění podmínky zaručené detekce lomu koleje. Obojí je v současné době u ČD nereálné – první s ohledem na ekonomické náklady, druhé s ohledem na statistiku lomů koleje.

S jistým zjednodušením lze limitní hodnotu pro všechny dvoupásové kolejové obvody u ČD interpretovat jako limitní hodnotu 50 mV (měřeno mezi kolejnicemi na přijímačovém konci kolejového vedení) nebo jako hodnotu asymetrického rušivého proudu trakce ve

vyhrazených pásmech 0,167 A. Pro jednopásové obvody lze obdobně jako limitní tolerovatelnou hodnotu rušivého proudu trakce stanovit hodnotu 0,7 A.

Tyto hodnoty ovšem představují celkový rušivý proud v kolejovém obvodu, na kterém se podílí všechna vozidla na napájecím rameni, ale který je na druhé straně redukován rozdělením zpětného proudu do jednotlivých kolejí (např. na dvoukolejné trati, staničních kolejí atd.) a rozdělením zpětného proudu mezi koleje a zem. Uvážíme-li tedy ještě alespoň druhé hnací vozidlo srovnatelného výkonu a předpokládáme-li, že toto druhé hnací vozidlo je zdrojem nekorelovaného rušivého napětí stejné velikosti, bude hodnota dovoleného rušivého proudu, příslušná jednomu hnacímu vozidlu (soupravě), zaokrouhlená (vzhledem k rozptylu charakteristických impedancí atp.)

$$I_{r1} = I_r \frac{\sqrt{2}}{2},$$

tedy 0,1 A pro dvoupásový obvod a 0,5 A pro jednopásový obvod. Pokud je vozidlo určeno pro provoz v úseku, kde jsou provozovány jak jednopásové, tak dvoupásové obvody, platí pochopitelně nižší hodnota z obou, tj. 0,1 A.

Samozřejmě všechny výše uváděné hodnoty je třeba posuzovat vždy ve vztahu k selektivitě přijímačů - týkají se pouze té části kmitočtového (popř. fázového) spektra, na níž je přijímač citlivý. Je-li selektivita přijímače upravována filtrací, je třeba uvážit reálné (neideální) charakteristiky filtrů (včetně reakce na skokové změny a velmi krátké impulsy vysoké úrovně) a navíc pak i možné poruchové stavy tak, jak je obvyklé v zabezpečovací technice. Je-li selektivita dosažena fázovými detektory nebo indukčními relé, je třeba do úvah zahrnout čistotu a frekvenční (popř. fázovou) stabilitu referenčního signálu, posoudit chování přijímače při blízkých frekvencích a zahrnout i reálnou odezvu jeho výstupu. V podmínkách ČD to například znamená považovat pro standardní dvoupásové kolejové obvody s indukčními relé za citlivou oblast ± 4 Hz od frekvence referenčního signálu. Tuto oblast je nutné dále rozšířit o možné kolísání frekvence napájecích zdrojů pro kolejové obvody, které je výrazné zejména u starších, rotačních, zdrojů. Výsledkem je, že u ČD pro kolejové obvody 75 Hz je nutné za citlivou oblast považovat pásmo $64 \div 86$ Hz, pro kolejové obvody 275 Hz pásmo $257 \div 282$ Hz. Zúžení těchto pásem přichází v úvahu teprve po úplné záměně rotačních zdrojů za zdroje statické, kdy bude možné uvažovat s pásmy $75\text{Hz} \pm 6$ Hz a $275\text{Hz} \pm 6$ Hz.

Pro jednopásové obvody 50 Hz s filtrem se limit rušivých trakčních proudů 0,5 A vztahuje na kmitočtovou oblast $0,1 \div 300$ Hz. Pokud je v této oblasti zjištěn současný výskyt různých rušivých složek, je celkový vliv uvažován obvyklým vztahem

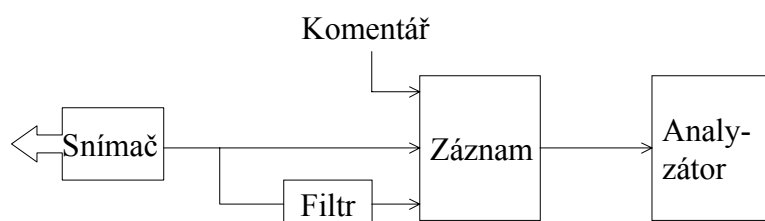
$$I_c = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_i^2}.$$

Na střídavé trakci používané starší impulsní dvoupásové a jednopásové kolejové obvody RC 25 a RC 75 s fázově necitlivým přijímačem (IRV a pod.) mají před relé předřazeny podstatně kvalitnější pasivní článkové filtry, ale není známa jejich zaručovaná frekvenční charakteristika. Vzhledem k jejich malému počtu a tomu, že se již řadu let nově nezřizují, se jeví účelné aplikovat pro ně též limit jako pro obvody 50 Hz, ale neuvažovat přitom rušivou složku 50 Hz (je dostatečně potlačena až do velikosti trakčních proudů).

6. Ověřování vlivů

Ověřování vlivů lze v různých fázích života zařízení provádět teoreticky nebo praktickými zkouškami. V etapě návrhu se vychází z teoretických rozborů, provedených na základě podrobné znalosti elektrické výzbroje hnacího vozidla popř. jiných silových obvodů. Teoretické rozborů musí být v rámci typové zkoušky (vozidla, trakčního zařízení atd.) vždy doplněny praktickými zkouškami na hotovém zařízení. Smyslem těchto zkoušek je při různých stavech ovlivňujícího zařízení zaznamenat ovlivňující proud, analyzovat ho (tj. oddělit z něj složku nebo složky, které mohou mít negativní vliv na činnost kolejových obvodů) a porovnat velikost ovlivňujících složek s dovolenými limity ovlivnění. Problémem při analýze signálu je skutečnost, že se ve většině případů nejedná o jevy stacionární, ale jevy výrazně proměnné s časem, momentálním stavem ovlivňujícího zařízení a případně dalších prvků.

Měřicí aparatura musí všechny tyto okolnosti reflektovat. Na obr. 12 je blokové schéma vhodného zařízení. Snímač musí snímat proudy, tekoucí ovlivňovaným zařízením. V případě, že je vyšetřován galvanický vliv jediného hnacího vozidla není nezbytné, aby snímáný proud byl proud tekoucí kolejovým obvodem. Je možné snímat proud v odpovídajícím místě na hnacím vozidle, popř. proud vracející se do napájecí stanice, tak jak je to praktické právě s ohledem na proměnnost měřených hodnot. Pokud ovšem má být vyšetřen celkový vliv vozidla (včetně případného vlivu magnetického pole vozidla), nezbyvá než uskutečnit alespoň část měření na trati s modelovým kolejovým obvodem a výsledky porovnat s hodnotami naměřenými na vozidle nebo v trakční napájecí stanici.



Obr. 17

Snímač musí být volen tak, aby zachytil s dostatečnou přesností celé zájmové frekvenční spektrum s ohledem na dynamiku signálu. Je vhodné aby sejmutý signál byl uložen ve dvou úrovních - poprvé jako celkový snímáný signál, podruhé jako signál bez dominantní složky (na stejnosměrné trakci složka stejnosměrná - snadno proveditelné, na střídavé trakci složka 50 Hz - obtížně proveditelné). Filtrace, jejímž účelem je zlepšení dynamických poměrů pro uložení i analýzu té části spektra, která je předmětem zájmu, nesmí ovšem nepříznivě ovlivnit věrohodnost výsledků. Je vhodné, aby záznamové médium umožňovalo současně se signály uložit i komentář, popisující všechny rozhodné okolnosti, za nichž jsou data získána. Před měřením je nezbytná kalibrace celého měřicího řetězce (nejlépe injektováním kalibračního signálu v oblasti dominantní složky i v oblasti zájmových kmitočtů) a zjištění rušivého pozadí.

Analýza se provádí obvykle ve dvou etapách - poprvé jako orientační během vlastního měření a snímání hodnot, podruhé jako detailní analýza záznamů po skončeném měření. Zvláštní pozornost zaslouží již zmíněná proměnlivost měřených hodnot. Řešením je taková

analýza, která umožní prohlédnout a vyhodnotit celý záznam souvisle, bez vynechaných míst, ale přitom natolik váženě, aby byly vyloučeny krátkodobé jevy (včetně odezev na ně, způsobených měřicím řetězcem), které nejsou schopny nepříznivě ovlivnit kolejový obvod. V současné době se vyhodnocení provádí selektivním voltmetrem postupně nastavovaným na jednotlivé zájmové frekvence (tj. pracovní frekvence kolejových obvodů) a celé záznamy se opakovaně projíždí a časový snímek je dokumentován na grafu v souřadnicích I_r a t , s parametrem kmitočtu (kmitočtové pásmo) a stav hnacího vozidla, při kterém byl snímek pořízen.

Nově se připravuje metoda s využitím real-time analyzátorů a wavelet analýzy, zatím co automatické digitální analýzy na vybraných vzorcích ze záznamu byly odmítnuty pro nebezpečí, že i při značném množství vzorků může být pominuto něco důležitého.

Přitom dosavadní zkušenosti ukazují, že při praktických zkouškách je třeba věnovat zvláštní pozornost následujícím stavům :

a) vozidla :

- vlivu kmitočtu pulzního měniče v závislosti na rychlosti a proudovém odběru vozidla,
- vlivu různých stupňů poměrného tahu ,
- vlivu stavu hnacího vozidla (normální chod pulzních měničů, poruchový chod pulzních měničů, vyřazení jednoho podvozku, nesymetrie usměrňovacího můstku, filtr, atd.),
- kombinaci více vozidel v napájecím úseku,

b) napájecí stanice :

- tolerance, symetrie a čistota napájecí sítě,
- vliv poruch usměrňovacího můstku (u ss trakce),
- vliv filtru a jeho poruch (u ss trakce).

7. Závěr

Včasnou dohodou mezi výrobcí hnacích vozidel a zabezpečovacími techniky se ČD podařilo zvládnout nástup vozidel druhé a třetí generace a zavedení topných agregátů do motorové trakce tak, že z tohoto titulu nevznikly prakticky žádné provozní problémy s kompatibilitou hnacích vozidel a kolejových obvodů. K tomu nepochybně přispěla skutečnost, že těmto otázkám se trvale a ve spolupráci věnovali pracovníci obou odvětví. Po dohodě výrobců lokomotiv a ČD byly do provozu připuštěny pouze pulzní měniče s pevnými řídicími kmitočty 33,3 Hz, 100 Hz a 300 Hz, které samy, ani jejich harmonické složky, neleží v oblastech kmitočtů vyhrazených u ČD pro kolejové obvody. Impulsní měniče s plynule řízeným kmitočtem nebyly u ČD připuštěny k provozu.

Při zavádění nových hnacích vozidel s asynchronními motory se jen s obtížemi daří udržet rušení na vyhrazených pásmech 75 Hz a 275 Hz v dovolených limitech, přičemž v některých případech je vliv v ostatních vyhrazených (dnes nevyužívaných) pásmech překračován. Problematická je také dlouhodobá účinnost filtračních obvodů, jejichž doladěním bylo při typových zkouškách zajištěno dodržení limitních hodnot. Není také známo, jak se tyto hodnoty daří dodržet u dalších sériových výrobků. Těmto a řadě dalších otázkám z oblasti kompatibility je třeba se trvale věnovat. Nyní se tak neděje.

8. Literatura:

- [1] Detekce kolejových vozidel v železniční zabezpečovací technice. ČD-VÚŽ, Praha 1997
- [2] prEN 50238 (2002) Railway applications - Compatibility between rolling stock and train detection systems
- [3] Zpráva VÚŽ "Mezní hodnoty rušivých vlivů na kolejové obvody". Praha 1997

V Praze, březen 2002

Lektoroval: Ing. Vladislav Kyjovský