

8 POŽADAVKY NA NAPÁJENÍ 25kV

8.1 Obsah

8	POŽADAVKY NA NAPÁJENÍ 25kV	1
8.1	Obsah	1
8.2	Všeobecně.....	2
8.3	Výkonnost	2
8.4	Kvalita napájení.....	2
8.5	Spojitosť napájení.....	3
8.6	Provoz při poruchách N-1, N-2	3
8.7	Stará vozidla	4
8.8	Nová vozidla	5
8.9	Rekuperace	5
8.10	Rozmrazování.....	6
8.11	Přílohy ke kapitole 8.....	7

8.2 Všeobecně

Česká železnice je na vzestupu, od roku 2009 soustavně rostou její přepravní výkony v osobní i nákladní dopravě. Díky nesporným energetickým, klimatickým i environmentálním přednostem železnice v elektrické vozbě je ze strany EU i ČR požadováno, aby přepravní výkony železnice výrazně rostly i v následujících létech:

- převedení 30 % nákladní dopravy ze silnic na železnice do roku 2030 pro omezení produkce zdraví škodlivých látek nákladními automobily, tak jak jej na základě Národního plánu snižování emisí, předloženého Ministerstvem životního, prostředí uložila vláda ČR Ministerstvu dopravy ČR v usnesení č. 978/2015,
- náhrada spotřeby ropných paliv v dopravě v objemu 9 miliard kWh/rok zvýšenou spotřebou elektrické energie o 1,9 miliard kWh/rok do roku 2030, tak jak jej na základě Státní energetické koncepce, předloženého Ministerstvem průmyslu a obchodu, uložila vláda ČR Ministerstvu dopravy ČR v usnesení č. 362/2015.

Závaznost obou výše uvedených usnesení vlády pro dimenzování technických parametrů železniční dopravní cesty byla zástupci GŘ potvrzena na schůzce v Praze dne 18.7.2017. Jak ukazuje srovnání s vývojem v Rakousku (**viz obr. 8.1 a 8.2**) nejde o nereálné cíle.

Kontinuálně je investováno do rozvoje subsystému infrastruktury (INS) včetně výstavby druhých traťových kolejí. Nově budou na RFC koridorech upravovány železniční stanice pro provoz vlaků délky až 740 m (tedy o hmotnosti zátěže až cca 3 600 t: lokomotiva délky 20 m a 40 vozů délky 18 m o hmotnosti 90 t). V oblasti subsystému CCS probíhá ve velmi pokročilé fázi budování digitálního rádiového spojení EIRENE (aktuálně s technologií GSM-R) a intenzivně je zřizován jednotný evropský vlakový zabezpečovač ETCS Level 2 na tratích a vozidlech, který má v sobě potenciál umožnit jízdu vlaků v těsnějším sledu. Intenzivně je rozvíjen i strukturální subsystém RST - dopravci investují do nákupu či pronájmu nových vysoce výkonných vozidel (zejména interoperabilních lokomotiv 6 400 kW, 300 kN, 200 km/h).

Strukturální subsystém energie ENE, tedy pevná trakční zařízení, nečiní v investičních ani provozních nákladech železnice dominantní položku. Proto je nemyslitelné, aby svojí nízkou výkonností limitoval dopravní provoz, tedy aby bránil dlouhými elektrickými následnými mezidobími jízdy vlakům v těsném sledu umožněném parametry subsystémů INS a CCS. Není přípustné, aby nízká výkonnost subsystému ENE nedovolovala naplno využít instalovaný výkon vozidel a tím i rychlost jízdy vlaků, či aby neumožňoval splnit jízdním řádem stanovené jízdní doby, což by vedlo ke zpoždění vlaků. Podle Věstníku dopravy č. 11/2013 je životnost pevných trakčních zařízení 30 let. Proto je potřebné je dimenzovat nejen na současný provoz, ale tak, aby dokázala plnit svojí roli i v průběhu dalších 30 let.

8.3 Výkonnost

Základním cílem je, aby subsystém ENE zajistil svojí výkonností kvalitní a spolehlivé napájení, zabezpečující plné využití parametrů tratí (subsystémy INS a CCS) i vozidel (subsystém RST). A to nejen v úrovni roku 2017, ale i v předpokládané úrovni roku 2050 a to i po uskutečnění plánovaných rozvojových investic v oblasti železniční dopravní cesty (typicky: náhrada jednokolejné tratě s traťovou rychlostí 100 km/h Brno - Přerov dvoukolejnou tratí s traťovou rychlostí 200 km/h, instalace ETCS, generační obnova praku vozidel, ...).

8.4 Kvalita napájení

TSI ENE se odkazuje na ČSN EN 50 338, která v článku 7.2 uvádí:

„Pro usnadnění stabilního provozu ve *slabých* napájecích sítích nebo při mimořádných provozních podmínkách musí být vlaky vybaveny automatickým zařízením, které přizpůsobuje úroveň maximální spotřeby energie v závislosti na napětí v trakčním vedení v ustáleném stavu.“

Z toho lze logicky odvodit, že v sítích, které nejsou slabé a za situací, které nejsou mimořádné, by zařízení, které přizpůsobuje úroveň maximální spotřeby energie v závislosti na napětí v trakčním vedení v ustáleném stavu, nemělo být aktivováno. Tedy by v sítích, které nejsou slabé a za situací, které nejsou mimořádné, nemělo napětí klesat pod 90 % jmenovité hodnoty.

Avšak nejen s ohledem na zákonná ustanovení TSI ENE, ale především z věcných důvodů, aby nedocházelo ke znehodnocování investic vložených dopravci do pořízení nových vozidel, k neplnění jízdního řádu a ke vzniku zpoždění vlaků je nezbytné řešit napájení tak, aby v běžných provozních situacích nedocházelo k poklesu napětí na sběrači vozidel pod hodnotu na úrovni 90 % jmenovitého napětí, tedy aby neklesalo pod 22 500 V. Jakkoliv tato podmínka snižuje dosud využívaný úbytek napětí ($27\,500\text{ V} - 17\,500\text{ V} = 10\,000\text{ V}$) na polovinu ($27\,500\text{ V} - 22\,500\text{ V} = 5\,000\text{ V}$), je při současném stavu techniky splnitelná:

- přechodem z tradiční technologie jednofázových transformátorů na soudobou technologii kaskády dvojice měničů lze zcela eliminovat úbytek napětí na impedanci trakční napájecí stanice,
- náhradou jednostranného napájení dvoustranným napájením lze rozdělit proud mezi sousední napájecí stanice a tím snížit úbytek napětí na trakčním vedení,
- zavedením nejen podílného, ale i příčného spínání uprostřed napájeného úseku lze dále snížit úbytek napětí na trakčním vedení,
- umožněním rekuperačního brzdění dojde k dalšímu zlepšení napěťových poměrů v trakčním vedení,
- aplikace zemního lana vede ke snížení impedance trakčního vedení a tedy ke snížení úbytků napětí na trakčním vedení,
- aplikace napájecího vedení (též pro zajištění spolehlivého napájení odbočných tratí nezávisle na stavu trakčního vedení na hlavní trati) vede ke snížení impedance trakčního vedení a tedy ke snížení úbytků napětí na trakčním vedení.

8.5 Spojitost napájení

Spojité napájení, již léta úspěšné zavedené a používané na tratích SŽDC napájených napětím 3 kV je rozumné zavést i na tratích napájených napětím 25 kV, v opačném případě by byla konverze ze systému 3 kV na 25 kV z tohoto hlediska hodnocena jako krok zpět.

Technické prostředky k tomu existují a přínosy spojitého dvoustranného napájení jsou nesporné:

- vyšší přenosová schopnost trakčního vedení,
- nižší ztráty energie,
- vyšší střední napětí na sběrači vozidla,
- vyšší pravděpodobnost předání rekuperovaného výkonu mezi vozidly s minimem zpětných toků výkonu do distribuční soustavy,
- příznivější zatížení trakčních napájecích stanic (nižší poměr $P_{\max}/P_{\text{stř}}$),
- příznivější zatížení distribuční soustavy (nižší poměr $P_{\max}/P_{\text{stř}}$),
- nižší cena elektrické energie (nižší poměr $P_{\max}/P_{\text{stř}}$),
- spojitá jízda bez přerušování trakčního výkonu,
- spojité rekuperační brzdění,
- spojité napájení palubních sítí a zdrojů stlačeného vzduchu,
- spojitá činnost zařízení pro aktivní naklápění vozových skříní a tím i plné využití traťových rychlostí těmito vozidly,
- spojitá činnost ventilace, vytápění, klimatizace, cateringu a dalších zařízení zajišťujících pohodlí cestujících,
- nižší opotřebení kontaktních přístrojů,

- neodpoutávání pozornosti strojvedoucího od sledování tretě a od řízení jízdy vlaku,
- minimalizace rizik poškození vozidla i pevných trakčních zařízení při přehlédnutí či nerespektování návěsti k vypnutí proudu či stažení sběrače.

8.6 Provoz při poruchách N-1, N-2

Řešené tratě patří v ČR k nedůležitějším (1. a 2. Národní tranzitní železniční koridor) a mají i zásadní význam v evropské železniční dopravě (evropské nákladní železniční koridory RFC) a v regionální dopravě. To klade vysoké nároky na spolehlivost pevných akčních zařízení.

Logicky je proto respektována zásada N – 1, tedy princip, že subsystém ENE je schopen zajistit plnohodnotné napájení i při nefunkčnosti jedné ze svých základních částí (porucha a následná korektivní údržba, respektive preventivní údržba nebo revize). Tento princip se týká jak drážních zařízení (trakčních napájecích stanic), tak i jejich připojení k distribuční soustavě 3 x 110 kV 50 Hz.

Systém tedy musí být redundantní. V případě trakčních napájecích stanic může jít jak o redundanci vnitřní (trakční napájecí stanice obsahuje dva navzájem nezávislé funkční celky a každý z nich je sám schopen zajistit plnohodnotný provoz), tak i o redundanci vnější (sousední trakční napájecí stanice jsou díky své výkonové rezervě schopné převzít funkci vyloučené trakční napájecí stanice.

V průběhu zásadnějších oprav či revizí trakčních napájecích stanic, které mohou trvat delší dobu, může s určitou pravděpodobností dojít k poruše záložního řešení. S ohledem na vysokou důležitost napájených tratí je na místě řešit i stav N – 2, tedy dvojnásobnou poruchu. Za této situace již není (s ohledem na nižší pravděpodobnost výskytu) cílem plnohodnotné napájení vlaků, ale udržení provozu. Za této situace je předpokládáno samočinné zavedení elektrických následných mezidobí na principu využití zařízení pro snížení trakčního výkonu vozidel podle TSI LOC&PAS respektive ČSN EN 50 388 (viz kapitola 4.9.).

8.7 Stará vozidla

Obnova či nové zřizování pevných trakčních zařízení jednoznačně směřují k tomu, aby subsystém ENE bezchybně sloužil novým moderním vozidlům, aby umožnil naplno využít jejich přednosti a parametry ku prospěchu železniční dopravy. Avšak v první části své existence a exploatace budou i nově budovaná pevná trakční zařízení napájet nejen nová, ale i starší vozidla. I napájení starších vozidel musí být schopny bezchybně naplnit.

Charakteristickým rysem starších vozidel je skutečnost, že vznikla ještě před obdobím pokročilé aplikace spínaných polovodičových měničů, tedy v době diodové a tyristorové techniky, v éře používání stejnosměrných trakčních motorů.

Používají proto vstupní diodové (u některých vozidel i tyristorové) usměrňovače, které napájejí stejnosměrné trakční motory (**viz obr. 8.3**).

Důsledkem je, že starší vozidla neodebírají z trakčního vedení (tak jak v současnosti vyžadují distributoři elektrické energie a tak jak ukládá TSI LOC&PAS) sinusový proud (bez vyšších harmonických složek) a ve fázi s napětím (s účínkem $\cos \phi$ větším než 0,95). Z trakčního vedení odebírají proud přibližně obdélníkového tvaru (s velkým obsahem lichých vyšších harmonických složek) a fázově posunutý (u vozidel s diodovými usměrňovači s účínkem cca 0,8, u vozidel s fázově řízenými tyristorovými usměrňovači s účínkem cca 0,7).

Z distribuční soustavy není dovoleno odebírat tak výrazně nesinusový a fázově posunutý proud, mělo by to negativní zpětné účinky na distribuční síť. Proto byly trakční napájecí stanice (trakční transformovny 1 x 110 kV 50 Hz / 1 x 25 kV 50 Hz) dodatečně vybaveny aktivně řízenými filtračně kompenzačními zařízeními (FKZ). Tato zařízení filtrují laděnými LC obvody liché harmonické složky proudu s cílem, aby tyto nepronikaly z trakční do distribuční sítě. Zároveň tato zařízení

kompenzují jalovou induktivní složku trakčního odběru, aby jí nebyla zatěžována distribuční síť. V zásadě jde o to, aby byl z distribuční sítě odebírán jen činný příkon, nikoliv jalový a deformační příkon.

Napájení starších vozidel umí zajistit i nové technologie trakčních napájecích stanic:

- aktivní balancery aktivně kompenzují jalový výkon, k eliminaci vyšších harmonických složek proudu je lze opatřit LC filtry,
- stejnosměrný meziobvod kaskády měničů 3 AC/ DC plus DC / 1 AC přenáší mezi trakční a distribuční sítí jen činný výkon, jalový ani deformační výkon přes stejnosměrný obvod z trakční do distribuční sítě neprojdou.

8.8 Nová vozidla

Nová trakční vozidla jsou v současnosti prakticky výhradně řešena se střídavými frekvenčně řízenými trakčními pohony a se vstupními čtyřkvadrantovými měniči (**viz obr. 8.4**). Proto nezatěžují ani železniční pevná trakční zařízení (trakční vedení a trakční napájecí stanice), ani distribuční energetickou soustavu, odběrem jalového či deformačního výkonu. Odebírají z trakční i distribuční sítě jen činný příkon, respektive do nich při rekuperačním brzdění navracejí činný výkon.

Poněkud nečekaně nastal problém kompatibility s některými řadami nových vozidel, vybavených technikou vstupními čtyřkvadrantových měničů, s filtračně kompenzačními zařízeními instalovanými v trakčních napájecích stanicích. Tato zařízení, jak je v předchozím bodě uvedeno, byla do trakčních napájecích stanic (do trakčních transformoven) doplněna z důvodu umožnění nekonfliktního provozu starších vozidel.

Ačkoliv nová vozidla, vybavená vstupními čtyřkvadrantovými měniči, žádná filtračně kompenzační zařízení v trakčních napájecích stanicích z principu nepotřebují (odebírají ze sítě jen činnou složku proudu a to sinusového tvaru) dochází za provozu některých řad vozidel, vybavených vstupními čtyřkvadrantovými měniči, k nežádoucím interakcím s filtračně kompenzačními zařízeními v trakčních napájecích stanicích a ke vzniku rezonačních jevů, které mohou vést k vážnému poškození filtračně kompenzačními zařízení (průrazy izolace). Řešení této problematiky není snadné, neboť filtračně kompenzační zařízení byla v minulosti navrhována, zkoušena a schvalována při výhradním provozu starších vozidel s toliko diodovými či tyristorovými usměrňovači. Jejich kompatibilita s vozidly opatřenými vstupními čtyřkvadrantovými měniči nebyla vyžadována ani prokazována.

8.9 Rekuperace

Řešení pevných trakčních zařízení systému 25 kV 50 Hz tak, aby umožňovala rekuperační brzdění s předáváním energie mezi vozidly, tak i nezávisle na předáváním energie mezi vozidly je povinností jasně deklarovanou v TSI ENE (viz kapitola 5.2 této zprávy) pro střídavé napájecí systémy. U stejnosměrných systému je podmínka TSI méně striktní, postačuje rekuperační brzdění s předáváním energie mezi vozidly, což odpovídá všeobecně zavedeným trakčním napájecím stanicím (měničům) s diodovými usměrňovači, které umožňují jen tok energie z distribuční sítě do trakční sítě, nikoliv naopak.

Povinnost zjistit na systému 25 kV rekuperační brzdění i nezávisle na předáváním energie mezi vozidly má v zásadě dvě možná technická řešení:

- využít schopnost transformátoru přenášet elektrickou energii oběma směry a předávat vozidly nespotřebované přebytky energie z trakční do distribuční sítě,
- vybudovat v rámci pevných zařízení (například v trakčních napájecích stanicích) úložiště (zásobníky) elektrické energie, například elektrochemické akumulátory.

Zřízení zásobníků energie (o výkonu v řadu MW), tedy transformátoru, obousměrného měniče a akumulátorů, by bylo velmi drahé, proto je racionální využít již zmíněnou schopnost transformátoru přenášet energii oběma směry a dodávat vozidly nespotřebované elektrické energie zpět do distribuční soustavy. To však znamená splnit podmínky pro tuto činnost stanovené provozovatelem distribuční soustavy.

Cílem pochopitelně není jen formální splnění požadavku TSI (a tedy i zákona o dráhách), ale především docílení podstatných úspor energie, které rekuperační brzdění přináší, jakožto i dalších souvisejících efektů (snížení opotřebení třecí brzd, funkčnost a bezpečnost dvou navzájem nezávislých brzdových systémů, stabilizace napěťových poměrů v trakčním vedení, výkonové odlehčení trakčních napájecích stanic, výkonové odlehčení distribuční soustavy, ...).

K naplnění požadavku na nepřerušované rekuperační brzdění je ze strany pevných trakčních důležitým faktorem spojitost napájení trakčního vedení. Moderní trakční vozidla již totiž nejsou vybavována brzdovými odporníky, funkčnost jejich elektrodynamické brzdy je podmíněna předáváním rekuperovaného výkonu do trakčního vedení – při jeho nespojitosti přechází brzdění do režimu pneumaticky ovládané třecí brzdy, ve kterém zůstává až do konce brzdění. Třecí brzdění představuje ekonomickou ztrátu (zmařená energie, opotřebení brzdových obložení a brzdových kotoučů). Spojité napájení, které je podmínkou 100% účinnosti rekuperačního brzdění, je řešitelné jen při aplikaci měničové technologie v napájecích stanicích.

V případě, že je mezi vlaky TNS, se rekuperovaný výkon rozdělí mezi TNS (jednalo by se o dodávku do distribuční sítě) a druhý vlak. Výkon se rozdělí ve stejném poměru jako je poměr impedance trakčního vedení od TNS po druhý vlak k impedanci samotné TNS. Transformátor v TNS má impedanci asi jako 17 km trakčního vedení, takže pokud bude druhý vlak od TNS vzdálen 17 km, měla by se rekuperovaná energie rozdělit mezi TNS a druhý vlak v poměru 1:1. V dopravní špičce bude využití rekuperované energie vyšší, protože jsou vlaky k sobě blíže. Také platí, že při spojitém napájení bez neutrálních polí se může rekuperovaná energie dostat i za TNS, a to v poměru, který je uveden výše. Ze srovnání simulovaných variant vyplývá, že při umístění neutrálních polí mezi TNS bude do distribuční sítě dodána energie 14,3 MW/2h. Pokud by u TNS bylo také neutrální pole a TNS by měla v provozu oba transformátory zapojené do „V“, tak by dodaná energie byla ještě vyšší. Když se v simulaci s frekvenčními měniči neutrální pole odstranila, dodaná energie do distribuční sítě klesla na 0,7 MW/2h a došlo tak k výrazné úspoře. Měniče navíc mohou kromě napětí měnit i úhel. Tímto by se mohl značně omezit přetok do nadřazené soustavy. Software řízení měniče umožňuje řízení odběrů při napájení proti sobě. V simulaci se s touto možností zatím nepočítá.

Druhou podmínkou rekuperačního brzdění je dohoda provozovatele dráhy s provozovatelem distribuční sítě o předávání ostatními vozidly nespotřebovaných přebytků rekuperovaného výkonu do distribuční soustavy. Nástroji k tomuto konsenzu jsou minimalizace přebytků rekuperovaného výkonu jeho prioritním využitím v co nejrozhlednějších napájených trakčních sítích a symetrizace výkonových přebytků, předávaných do distribučního systému, do všech tří fází. I tyto podmínky splňuje aplikace měničové technologie v napájecích stanicích.

8.10 Rozmrazování

Zejména v souvislosti se silicím podílem železnice na přepravních výkonech osobní i nákladní dopravy roste závažnost tématu zajištění provozuschopnosti železnice v extrémních klimatických podmínkách. Konkrétně jde o to, aby byla minimalizována pravděpodobnost přerušení provozu železnice v důsledku selhání funkce elektrického napájení vozidel při námraze (na chladném trakčním vedení namrzá vzdušná vlhkost) a při ledovce (na chladném trakčním vedení namrzají kapky padajícího deště).

Cílem je zajistit provozuschopnost při námraze i ledovce bez poškozování sběrače rozmrazováním trakčního vedení. Jde jak o zabránění kalamiťným stavům při ledovce (viz ochromení provozu elektrické vozby v ČR dne 1.12.2014, zejména na DC části sítě), tak i o zajištění provozuschopnosti vozidel při méně extrémních situacích (námraza).

TSI LOC & PAS předepisuje trakčním vozidlům použití uhlíkových lišť sběračů proudu. Ty jsou pro svůj nízký abrazivní účinek výhodné pro nízké opotřebení trolejového drátu, avšak z hlediska svého opotřebení se uhlíkové lišty sběračů staly, zejména v zimním období, limitujícím faktorem preventivní údržby vozidel. Proto je žádoucí nenapalovat při námraze lišty sběračů a trolejový drát obloukem a mechanicky nepoškozovat lištu sběrače.

Technické řešení existuje a to v podobě řízených vyrovnávacích jalových proudů vyvolaných záměrně rozdílným napětím na výstupu sousedních napájecích stanic. Tyto vyrovnávací proudy svým tepelným účinkem ($\Delta P = R \cdot I^2$) ohřívají vodiče trakčního vedení nad bod mrazu a tím způsobí roztávání námrazy či ledovky. Díky tomu je zajištěn dobrý kontakt mezi sběračem a trolejovým drátem, nedochází k napalování ani trolejového drátu, ani lišty sběrače, provoz není narušen. Tento princip je úspěšně využíván na vysokorychlostních tratích, kde je aplikován zejména časně ráno před zahájením provozu vlaků v pravidelném intervalu. S ohledem na krátkou časovou konstantu trolejového drátu (jednotky minut) postačuje využívat ohřev jen krátce, jeho energetická náročnost proto není velká.

Při použití měničové technologie lze pomocí SW (nastavení velikosti a úhlu napětí) řídit velikost ohřívacích vyrovnávacích proudů velmi jemně (viz obr. 8.5). Nedochází k přetokům činného výkonu do distribuční soustavy, jalový výkon přes měniče neprojde a z distribuční soustavy je odebrána jen činná energie pro vytvoření tepla.

8.11 Přílohy ke kapitole 8

Příloha 8.1

Modální podíl železnice na přepravních výkonech nákladní dopravy

Příloha 8.2

Podíl železnice na přepravních výkonech

Příloha 8.3

Provedení vozidel – staré vozidlo s diodovým usměrňovačem

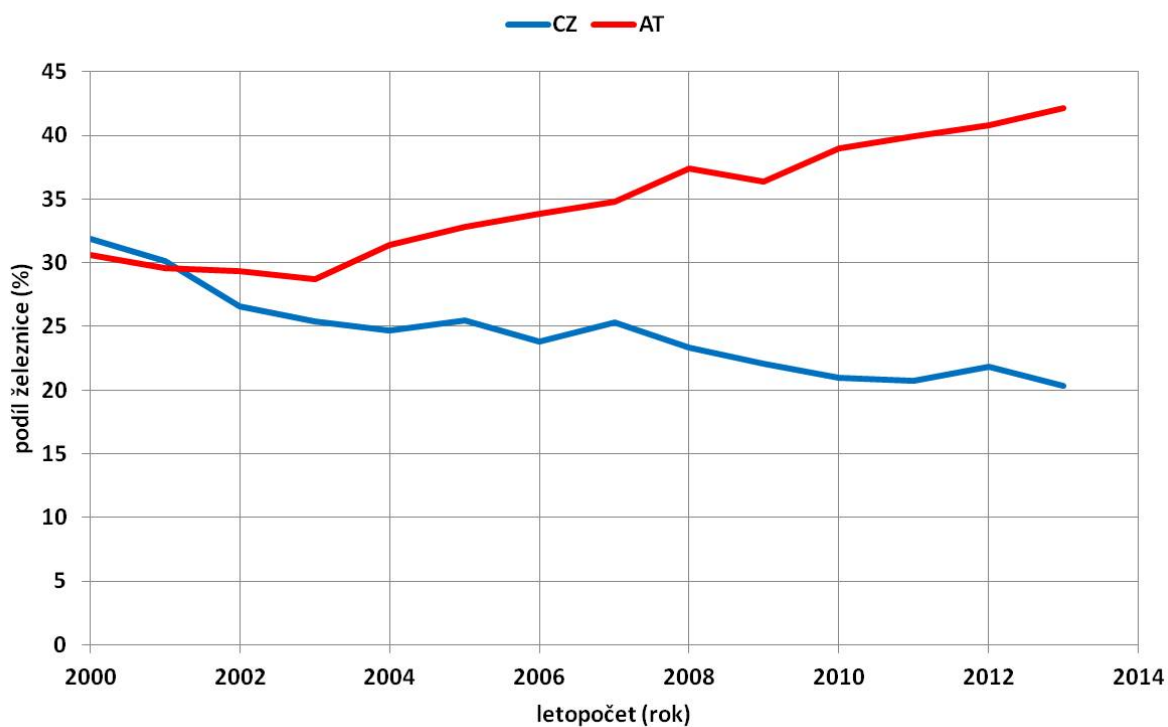
Příloha 8.4

Provedení vozidel – moderní vozidlo se vstupním 4Q měničem

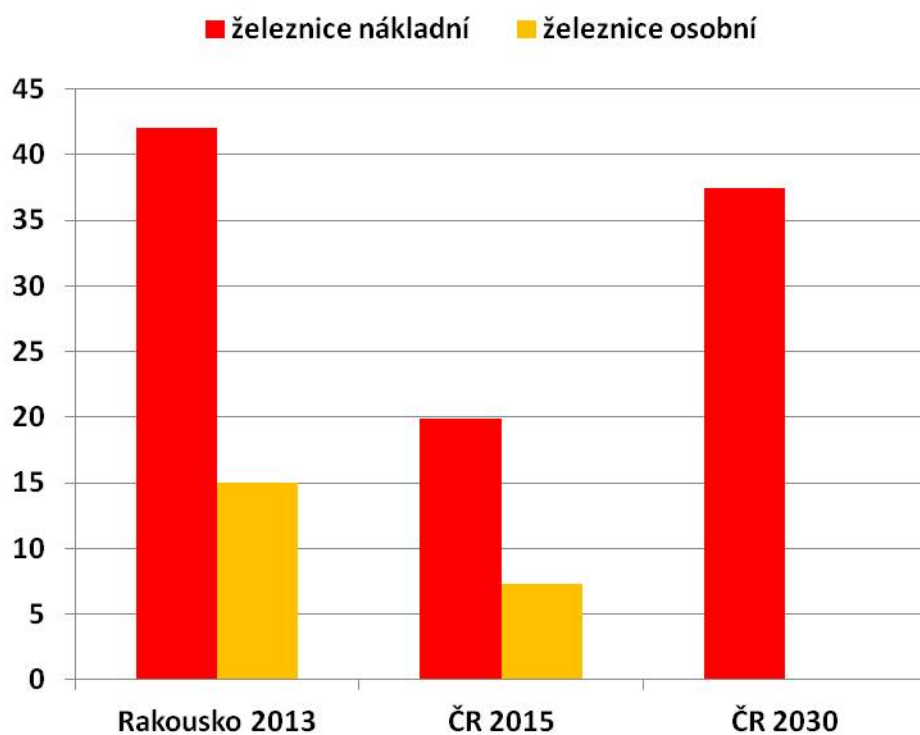
Příloha 8.5

Rozmrazování trakčního vedení

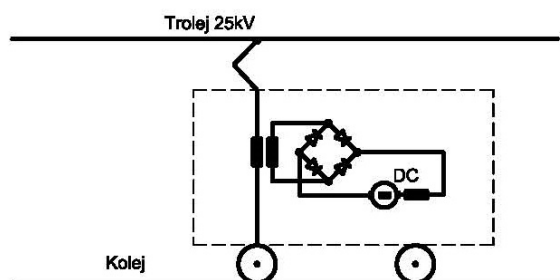
Příloha 8.1 Modální podíl železnice na přepravních výkonech nákladní dopravy



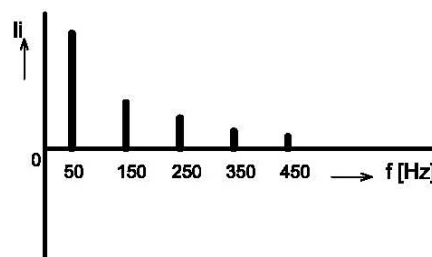
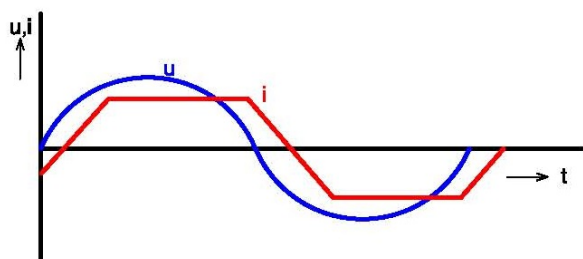
Příloha 8.2 Podíl železnice na přepravních výkonech



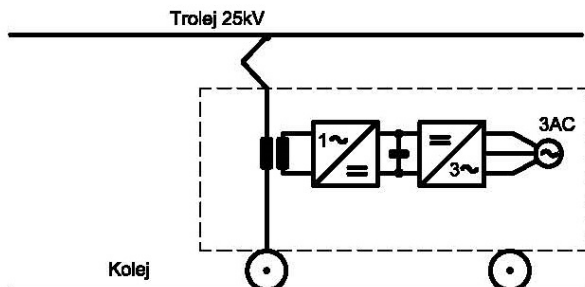
Příloha 8.3 Provedení vozidel – staré vozidlo s diodovým usměrňovačem



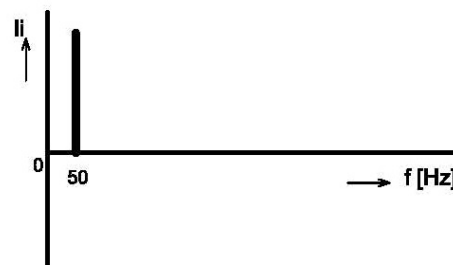
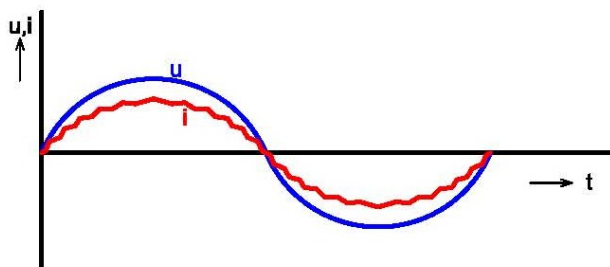
$$\cos \phi \doteq 0,8$$



Příloha 8.4 Provedení vozidel – moderní vozidlo se vstupním 4Q měničem



$$\cos \phi \doteq 1$$



Příloha 8.5 Rozmrazování trakčního vedení

