

# Fyzika na železnici

Tomáš Kekule

Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

Abstrakt

*Praktickou fyziku je vhodné nejen demonstrovat školními experimenty, ale také ukazovat na přírodě i technice okolo nás. Příspěvek stručně přibližuje některá technická zařízení, která mohou studenti pozorovat při cestování vlakem nebo při procházce kolem železniční tratě a jejichž fyzikální základ je obsahem středoškolské výuky.*

## Úvod

Každý učitel fyziky se jistě nejednou setkal s otázkami „k čemu je to dobré“, či „kde se to používá, kde se s tím mohu setkat“. Přesvědčivé odpovědi na tyto typy otázek dokážou (alespoň někdy a u některých) překonat nechuť ke studiu právě tím, že vidí praktické využití jevů nebo použití zařízení, o kterých ve škole slyší. Příspěvek popisuje některá zařízení používaná na elektrifikovaných železničních tratích, které lze vidět z veřejně přístupných míst. (Nejen) student dojíždějící do školy vlakem (po elektrifikované trati) si může cestou připomínat mnoho fyzikálních jevů z (nejen) elektřiny a magnetismu pozorováním technických zařízení kolem kolejí.

## Pozorujeme na nádraží nebo u trati

### Elektrické napětí

Základní pojem, u kterého studentům zdůrazňujeme, že je vždy mezi dvěma místy. V případě napájení železničních vozidel je to mezi trolejovým drátem a kolejnici. V troleji je kladný pól (resp. trolej je fázový vodič), kolejnice je uzemněna. Ač se toto zdá být triviální, mnoha studentům to jasné není a nezdá se jim, že i kolejnice jsou součástí „obvodu“, kudy protéká proud. Zde je dobré srovnat trolejové vedení kolejových vozidel a trolejbusů.

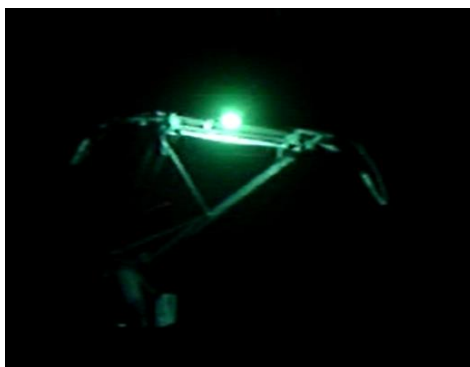


Obr. 1. Jednovodičové napájecí vedení nad železniční tratí a dvouvodičové trolejbusové vedení.

Zatímco železniční (tramvajová) trolej je tvořena jen jedním vodičem (sběrač proudu vozidla se dotýká jen jednoho vodiče), trolejbusovou trolej tvoří vodiče dva a trolejbus má dva samostatné (tyčové) sběrače, které se smýkají každý po jednom vodiči, mezi kterými je napětí (Obr. 1). Trolejbus totiž není uzemněn.

### **Elektrický výboj**

To, že mezi kolejnicemi a trolejí skutečně je napětí, je možné i pozorovat při zdvihání sběračů – před dotykem sběrače a troleje je slyšet prasknutí, někdy (především, je-li vlhko) je vidět i obloukový výboj – to v okamžiku, kdy už je (uzemněný) sběrač tak blízko troleje, že dojde k elektrickému průrazu vzduchu. Velmi intenzivní výboje lze pozorovat nad projíždějícím vlakem v brzkém mrazivém ránu (Obr. 2). Mrazivém proto, že sběrač se nemůže dotknout troleje kvůli námraze, ta je navíc v různých místech trolejového drátu různě silná, takže při jízdě vlaku dochází k odsakování sběrače od troleje. A po ránu proto, že s přibývajícím počtem projíždějících vlaků námraza na troleji mizí – jak teplem, tak mechanickým třením (obrušováním).



Obr. 2. Výboj mezi namrzlou trolejí a sběračem lokomotivy.

Na mnoha místech můžeme vidět na stožáru růžkové bleskojistky (Obr. 3). Přímo na bleskojistce asi výboj nevidíme, ale můžeme si všimnout, že jeden růžek je vodivě spojen



Obr. 3. Bleskojistka na stožáru nesoucím trolejové vedení. Levý růžek je uzemněn, vodič uchycený na pravý růžek vede k troleji. Oba růžky jsou odděleny izolátorem.

s trolejí a druhý se zemí. Bleskojistka slouží k ochraně vedení před náhlou napětovou špičkou vzniklou typicky úderem blesku. Výboj vznikne v místě, kde jsou růžky nejbližší a postupuje nahoru až zhasne.

A jaké je vůbec napětí mezi trolejí a kolejnicemi? V České republice a na Slovensku se používá stejnosměrné napětí 3 kV v severní části země a střídavé napětí o efektivní hodnotě 25 kV a frekvenci 50 Hz v jižní části. Dielektrická pevnost vzduchu je asi 3 kV/mm, v případě suchého vzduchu bychom tedy mohli výboj pozorovat u stejnosměrného systému při vzdálenosti 1 mm, u střídavého asi 12 mm (špičková hodnota střídavého napětí je přibližně 35 kV). Vzduch však není nikdy suchý, vlhkost tuto vzdálenost pochopitelně zvyšuje.

### Izolování prvků pod napětím

Protože mezi trolejí a zemí je (poměrně vysoké) napětí, musí být trolej izolována od nosných stožárů. Keramické nebo plastové izolátory jsou obvykle vloženy mezi konstrukci nesoucí trolej a samotný stožár (Obr. 4).



Obr. 4. Izolátory na stožáru nesoucím trolej. Samotná trolej je vodivě propojena s nosným lanem i tzv. výložníkem (trubková konstrukce, ke které jsou nosné lano a trolej upevněny). Výložník je k nosnému stožáru upevněn pomocí izolátorů. Na vršku stožáru je na izolátoru zavěšeno přidavné vedení.

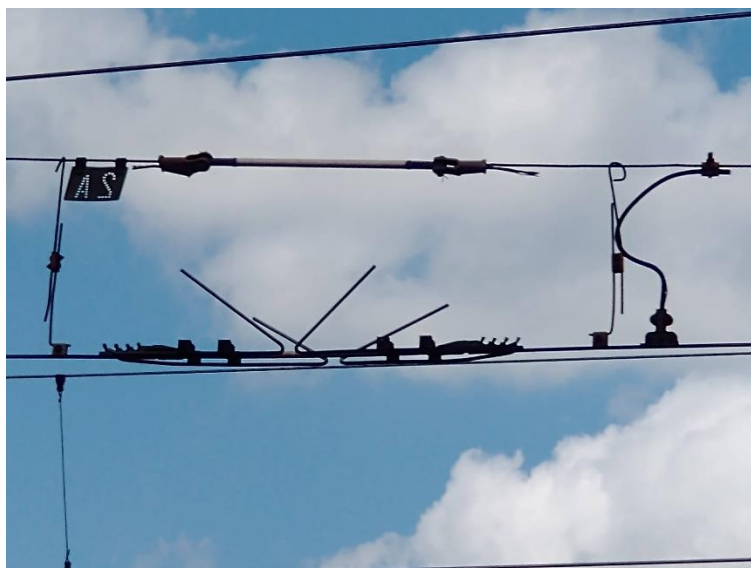
### Spád potenciálu, ztráty ve vedení

Probíráme-li se studenty základy energetiky, přicházejí úvahy o tom, proč se elektrická energie rozvádí při vysokých napětích, zmiňujeme ztráty ve vedení a spád potenciálu podél vedení, když se vzdalujeme od zdroje. Toto samozřejmě platí i pro napájení železničních tratí. Celá železniční síť není napájena jedním zdrojem, ale podél tratí jsou rozmístěny tzv. trakční měnirny (na stejnosměrném systému) a trakční transformovny (na střídavém systému). Ty jsou připojeny ke státní distribuční soustavě (zpravidla 110 kV). V měnirně dochází k transformaci dolů a následnému usměrnění, v transformovně se pouze snižuje napětí na zmíněných cca 25 kV. Obvyklé řešení je takové, že každá měnirna

napájí dva přilehlé traťové úseky, které jsou od sebe odděleny, tzn. každý úsek je napájen na obou koncích. Protože stejnosměrné napětí je nižší než střídavé, stejnosměrnou trolejí protékají větší proudy a měnírny jsou potřeba po kratších vzdálenostech, obvykle do 20 km. Střídavě elektrifikované tratě jsou napájeny po 40–60 km, a to jeden úsek jednou transformovnou. Zhruba v těchto vzdálenostech můžeme měnírny či transformovny vidět podél trati (Obr. 5). Jednotlivé úseky jsou od sebe izolovány tzv. úsekovými děliči. (Obr. 6).



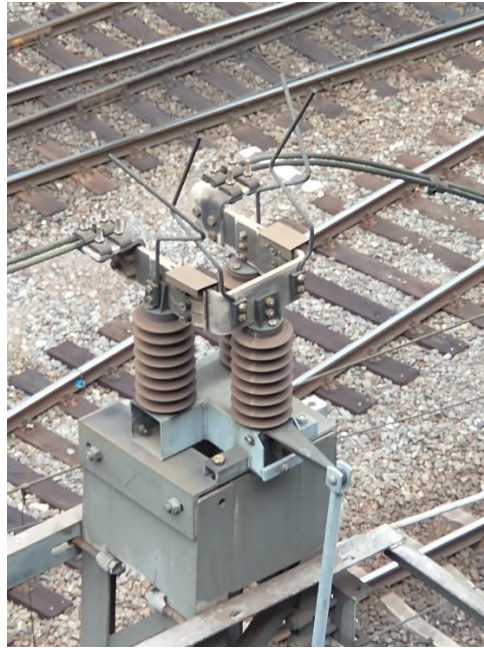
Obr. 5. Trakční měnírna (převzato z [1]).



Obr. 6. Úsekový dělič. Trolejový drát je přerušen izolační tyčí, po které lze smýkat sběrač. Nosné lano (které je na stejném potenciálu jako trolej) je také přerušeno izolantem. Na obrázku je vidět, že trolejový drát je přerušen po obou stranách izolační tyče v různých místech. Tak je zajištěno, že vozidlo je stále napájeno. Případný elektrický oblouk je zhasen na růžcích.



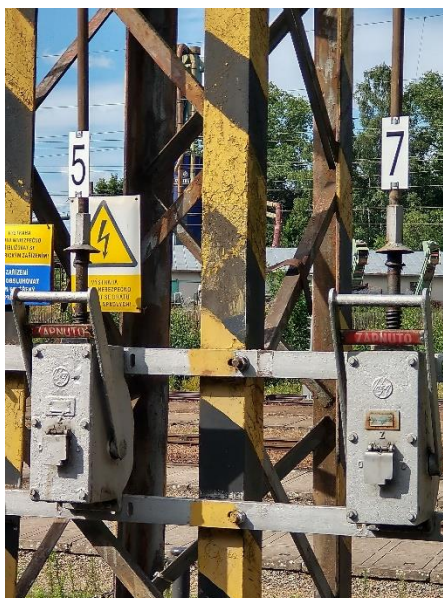
Ony cca 20 km (resp. 40–60 km) úseky však také netvoří vodivě nepřerušitelný úsek. Z důvodu údržby, poruch apod. je úsek rozdělen na mnohem kratší části – typicky úseky mezi dvěma stanicemi, jednotlivé koleje nebo skupiny kolejí v jedné stanici, atd. Tyto části jsou opět v úrovni troleje odděleny úsekovými děliči, ale v normálním stavu propojeny tzv. úsekovými odpojovači (obr. 7, 8). Úsekové děliče (a odpojovače) lze tedy vidět nejen kolem měníren, ale prakticky v každé stanici. Odpojovač se ovládá pomocí páky s táhlem upevněné na stožár s odpojovačem (Obr. 9), v poslední době v modernizovaných úsecích se používají i dálkově ovládané odpojovače. Na dvoukolejných tratích jsou taktéž od sebe izolovány obě traťové koleje. Na obr. 10 je schéma uspořádání trolejí nad stanicí na dvoukolejně trati.



Obr. 7. Úsekový odpojovač v sepnutém stavu. Vodič zleva je propojen s vodičem vpravo přes spínač, jehož pohyblivá část je umístěna na izolátoru vpravo vpředu. Po zatažení za tyč vedoucí od izolátoru dolů dojde k odklopení izolátoru s vodivým můstkem a rozpojení obou vodičů. Elektrický oblouk je zhášen na růžcích.

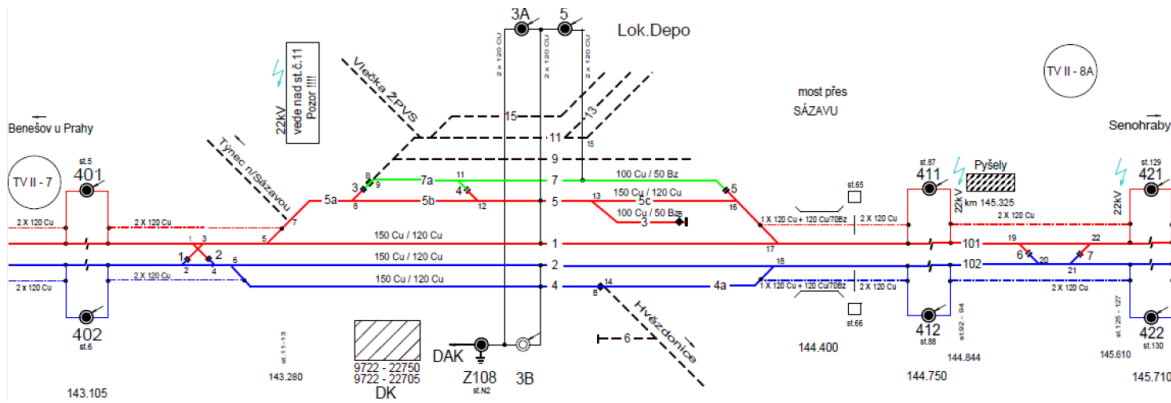


Obr. 8. Tři odpojovače na jednom stožáru. Pravý je rozepnut, levé dva jsou sepnuty.



Obr. 9. Ovládání odpojovačů ze země pomocí páky a táhla.

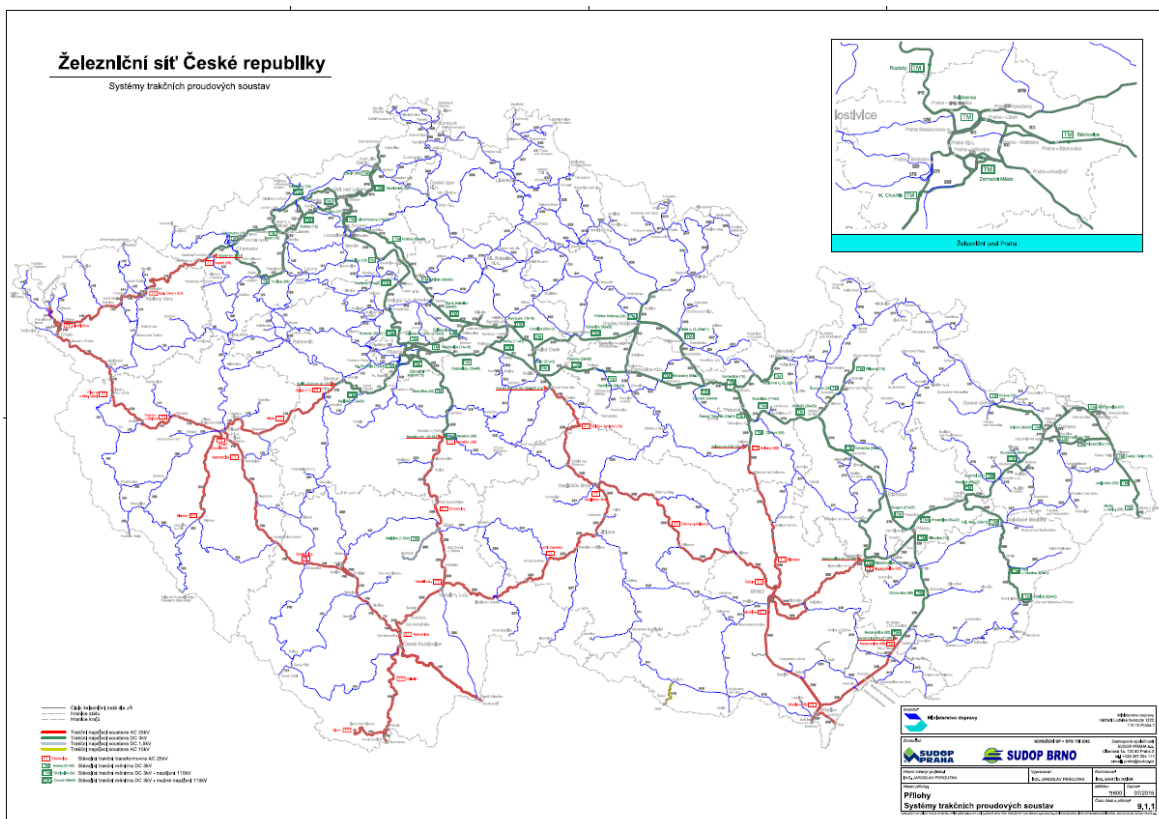
Studenty učíme, že odpor vodiče (a tedy i ztráty ve vedení) závisí také na jeho fyzických parametrech – délce a průřezu. Odpor klesá s rostoucím průřezem, bylo by tedy žádoucí dělat trolejové dráty silnější. Avšak čím silnější drát, tím větší hmotnost a tím obtížnější by bylo zavěsit drát tak, aby se jen minimálně prohýbal. Proto můžeme nad tratí často spatřit nejen trolejové vedení, ale i přídatné vedení, které je umístěné na samostatných izolátorech a v pravidelných vzdálenostech vodivě propojené s trolejí. Tím se vlastně docílí většího průřezu vodiče (Obr. 11).



Obr. 10. Schéma zatrolejování železniční stanice Čerčany, převzato z [2]. Modře a červeně jsou znázorněny navzájem izolované části trolejí. Nad kolejovými spojkami mezi oběma traťovými kolejemi (v levé a pravé části obrázku) jsou děliče, které se pojíždí se staženým sběračem. Spínače označené 401, 402, 411, 412, 421, 422 jsou odpojovače, v normálním stavu sepnuté.



Obr. 11. Přídavné vedení je umístěné na izolátorech na vodorovném břevnu nad každou z obou kolejí. Vlevo a uprostřed snímku je patrné propojení přídavného vedení s trolejí. Přídavné vedení je vidět i na Obr. 4.



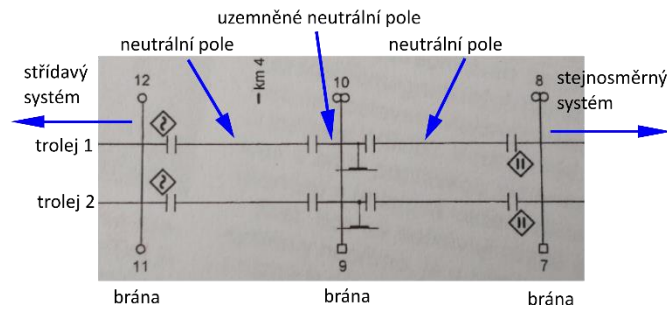
Obr. 12: Elektrifikované tratě v ČR a styková místa mezi napěťovými soustavami. Zeleně stejnosměrné napětí 3 kV, červeně střídavé 25 kV, 50 Hz. Jsou vyznačeny trakční měnirny (TM) a trakční transformovny (TT). Kromě hlavních napájecích systémů jsou na krátkých úsecích použita i jiná napětí – 1,5 kV DC na trati Tábor – Bechyně a 15 kV, 16,7 Hz na trati Znojmo – Šatov st. hr. Převzato z [3].

### Styková místa různých napěťových systémů

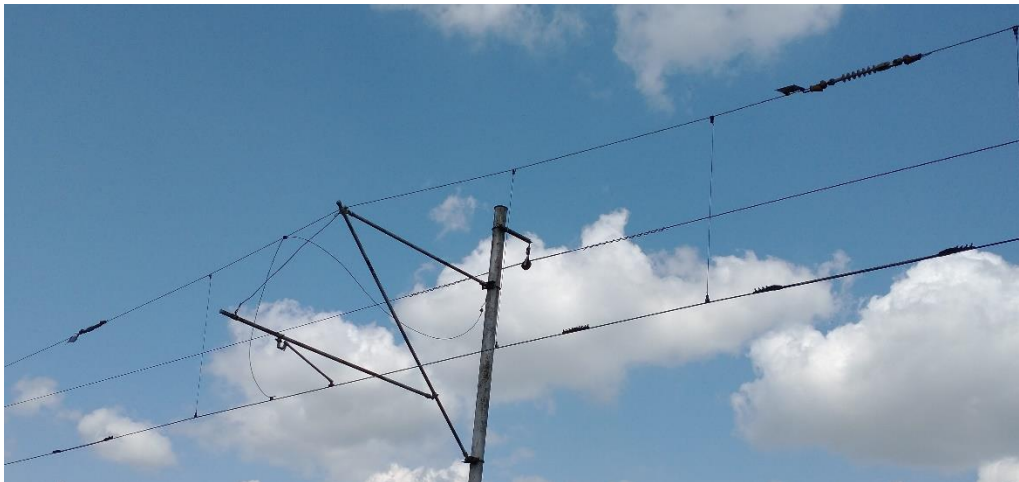
Protože v ČR existuje více napájecích systémů, je potřeba řešit styková místa mezi nimi. I řešení tohoto problému si lze prohlédnout z veřejně přístupných míst – přímo ve stanici to lze v Kutné Hoře hl. n. a v Nedakonicích (na trati Břeclav – Přerov). V těchto stanicích se nachází styk obou napěťových soustav u osobních nástupišť. Styk proudových soustav lze pozorovat nejen ve výše uvedených dvou stanicích, ale na dalších 5 místech v ČR (Obr. 12), kde však jsou tyto styky na širé trati.

Technické provedení není všude úplně stejné, ale většinou vypadá tak, jak je znázorněno na Obr. 13. Lze si všimnout, že mezi trolejovými dráty připojenými ke stejnosměrnému a střídavému napětí jsou tři úseky neutrálního drátu, z nichž prostřední je uzemněn. Každé dva úseky jsou od sebe vodivě odděleny.





Obr. 13. Schéma styku stejnosměrné a střídavé soustavy (převzato z [4]).





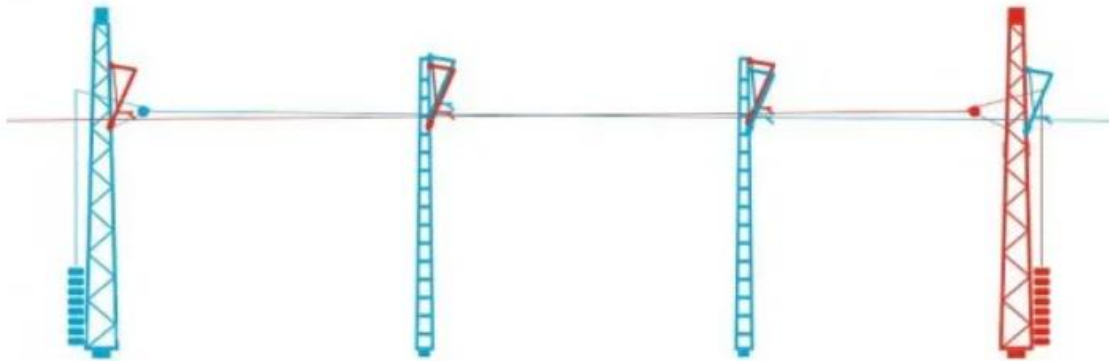
Obr. 14. Styk stejnosměrné a střídavé soustavy ve stanici Kutná Hora hl. n. Horní obr.: Stejnoseměrná trolej zleva je spojena s neutrálním polem izolační tyčí, nosné lano izolátorem. V levé části snímku je patrná bleskojistka, jeden růžek připojen k troleji, druhý uzemněn. Prostřední obr.: Neutrální a uzemněná část troleje je oddělena od obou okolních neutrálních polí izolačními tyčemi (v levé a pravé části snímku). Je patrné, že výložník nesoucí trolej je upevněn na stožár bez izolátorů. Je vidět i uzemňovací vodič spojující trolejový drát se stožárem (a po něm se zemí). Dolní obr.: Vlevo izolační tyč, doprava pokračuje střídavá trolej. Na stožáru patrná bleskojistka s výrazně vzdálenějšími růžky. Špičkové napětí mezi trolejí a zemí je zde cca 12 krát větší než na stejnosměrném systému.



Obr. 15. Napínání troleje pomocí kladek nebo navijáku. V případě navijáku je trolej (resp. nosné lano) navinuta na menším kole navijáku, lano nesoucí závaží na větším kole. Větší kolo je navíc opatřeno zuby, které zapadnou do západky v případě, že by došlo k náhlému odlehčení lana (např. při prasknutí). V takovém případě je zabráněno pádu závaží.

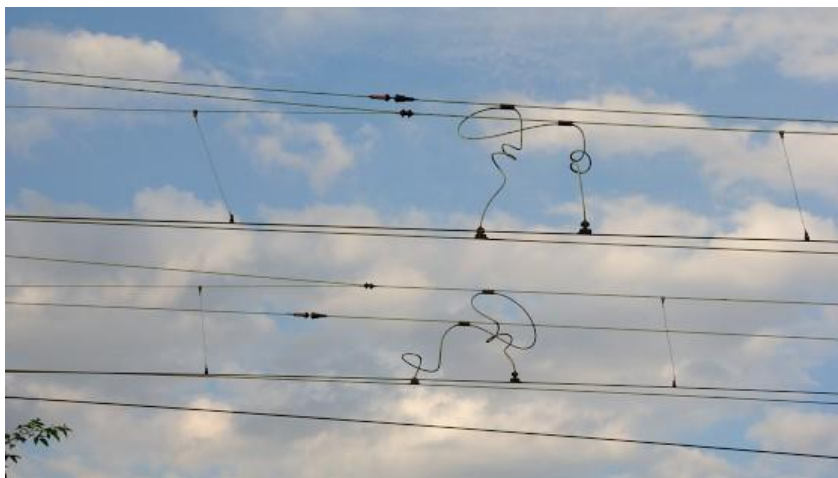
## Teplotní roztažnost

Na tramvajové trati ve městě je obvykle trolejový drát zavěšen tzv. prostě, pro relativně nízkou rychlost tramvají toto řešení postačuje. Trolej je samozřejmě mezi stožáry prověšena, velikost prověšení závisí i na teplotě. Pro vyšší rychlosti na železnici by toto řešení nebylo vhodné, docházelo by k odskakování sběrače od troleje. Proto se používá tzv. řetězovkové vedení, kdy je trolejový drát zavěšen pomocí laníček na nosném laně (patrně na předcházejících obrázcích). Aby byla zajištěna co nejvíce konstantní vzdálenost troleje od kolejí za různých teplot, jsou troleje i nosná lana napínána pomocí kladek. Obvyklé řešení je takové, že trolejový drát (do délky kolem 1500 m) je na obou koncích přes kladky zatížen závažími a uprostřed úseku je ukotven (tj. pevně připevněn), aby nemohlo dojít k posunu celého drátu na jednu nebo druhou stranu. U kratších úseků (např. ve stanicích) bývá na jednom konci lano uchyceno napevno. Napínání nosného i trolejové lana je tak k vidění na mnoha místech na trati a ve všech stanicích s kolejovým rozvětvením (Obr. 15).



Obr. 16. Schéma přechodu z jednoho trolejového drátu na druhý. Červeně označené konstrukce nesou drát vedoucí zleva a končící vpravo, modře značené konstrukce nesou drát začínající vlevo a vedoucí doprava. Mezi dvěma prostředními stožáry, které nesou oba dráty, se dráty výškově překříží a zde sběrač plynule přejíždí z jednoho na druhý.

U tohoto místa jsou dráty vodivě propojeny. Převzato z [5].



Obr. 17. Vodivé propojení na sebe navazujících úseků. Převzato z [5].

## Závěr

Nastínili jsme jen několik příkladů, kde můžeme na elektrifikované železnici vidět uplatnění fyzikálních poznatků, které předkládáme studentům. Problematika napájení železnic je samozřejmě mnohem složitější, ale tato složitost patří do odborných tematických publikací a její postihnutí nebylo ambicí tohoto článku. Tou bylo ukázat další z mnoha příkladů toho, čeho si mohou studenti všimnout v běžném životě (třeba cestou do a ze školy) a na čem je vidět využití fyziky v praxi.

## Literatura

- [1] K-report, český dopravní server, online <https://www.k-report.net/>, [cit. 20. 6. 2021].
- [2] Czagan J.: *Analýza jevů ovlivňujících napětí na úsekových děličích na soustavě 3 kV DC. Diplomová práce.* DFJP Univerzita Pardubice 2018.
- [3] Ministerstvo dopravy ČR, dostupné online [https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n/mapa\\_system.pdf.aspx](https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n/mapa_system.pdf.aspx) [cit. 20. 7. 2021].
- [4] Šrámek M.: *Střední Evropa a trakční proudové soustavy.* Dráha 7/99, s. 10 – 16.
- [5] <https://www.mojett.cz/>, [cit. 20. 7. 2021].