



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Adam Růžička

### **Železnice ve výuce fyziky**

Kabinet výuky obecné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Kekule, Ph.D.

Studijní program: Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání se sdruženým studiem  
Matematika se zaměřením na vzdělávání

Praha 2023

Děkuji RNDr. Tomáši Kekule, Ph.D. za jeho přednášku, která vedla ke vzniku této práce. Děkuji mu také za jeho neskutečnou trpělivost při práci se mnou a za jeho cenné komentáře a připomínky, které práci zlepšovaly.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Soběslavi dne 19. července 2023

Adam Růžička

Název práce: Železnice ve výuce fyziky

Autor: Adam Růžička

Katedra / Ústav: Kabinet výuky obecné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Tomáš Kekule, Ph.D., Kabinet výuky obecné fyziky

Abstrakt: Bakalářská práce přibližuje železniční jevy a technická uplatnění středoškolskou fyzikou. Základem jsou fyzikální principy snadno viditelné běžným pohledem při cestování vlakem. Tyto jevy pak můžeme rozdělit na mechanické, včetně tepelných jevů, a elektrické. Práce je psána jako příručka pro učitele do hodin fyziky, respektive jakási zásoba poznatků, na něž se dá odkazovat jako na příklady z praxe. Zároveň je práce koncipována i pro studenta, který si text může přečíst sám, nebo pro méně poučené zájemce o danou problematiku.

Klíčová slova: Železnice, výuka fyziky, fyzikální principy

Title: Railway in physics education

Author: Adam Růžička

Department: Laboratory of General Physics Education

Supervisor: RNDr. Tomáš Kekule, Ph.D., Laboratory of General Physics Education

Abstract: The bachelor thesis presents railway phenomena and technical applications through grammar school physics. The underlying physical principles are easily visible to the ordinary eye when travelling by train. These phenomena can then be divided into mechanical, including thermal phenomena, and electrical. The work is written as a teacher's guide for physics classes, or rather a sort of stock of knowledge that can be referred to as practical examples. At the same time, the work is also designed for students who can read the text on his own, or for the less instructed interested in the subject.

Keywords: Railway, physics education, physical principles

# Obsah

Úvod.....	1
1 Mechanika a tepelné jevy na železnici.....	4
1.1 Kolejové lože .....	4
1.2 Pražce .....	5
1.3 Kolejnice .....	7
1.3.1 Upevnění kolejnic .....	8
1.3.2 Spojování a roztažnost kolejnic .....	10
1.4 Mosty .....	15
1.5 Průjezd obloukem.....	16
1.6 Trolejové vedení.....	21
1.6.1 Zavěšení trolejového vedení .....	21
1.6.2 Napínání a roztažnost trolejí .....	24
1.6.3 Klikatost .....	28
2 Elektřina a magnetismus na železnici .....	31
2.1 Elektrické napětí.....	31
2.2 Napájení elektrizovaných tratí .....	34
2.2.1 Stejnoseměrný systém 3 kV.....	34
2.2.2 Střídavý systém 25 kV, 50 Hz .....	37
2.3 Izolování a ochrana před napětím .....	41
2.4 Trolejové vedení.....	42
2.5 Traťové úseky .....	44
2.5.1 Úsekové děliče .....	44
2.5.2 Úsekové odpojovače .....	46
2.5.3 Neutrální pole.....	47
Závěr .....	49
Seznam použité literatury.....	50
Seznam obrázků .....	53
Seznam použitých zkratk.....	55

## Úvod

Kohokoli, kdo jel někdy vlakem, mohla napadnout řada otázek typu: proč se používá to či ono, k čemu je dobré toto zařízení a vůbec, jak to celé funguje nebo jaké principy byly využity k tomu, aby to fungovalo. Prostředí železnice v sobě „skrývá“ širokou paletu použití fyzikálních principů od těch jednoduchých až po velmi komplikované. Použití uvozovek u slovesa skrývá je zde záměrné v tomto smyslu, že na rozdíl od mnoha jiných technických či industriálních prostředí zde mnoho zajímavých zařízení a technických řešení není skryto očím běžného cestujícího, který si je může prohlédnout z veřejně přístupných míst. Možná, že se i pro člověka, který není technický nadšencem, může jednat o překvapivě zajímavou ukázkou použití toho, co se učil ve škole.

Každý učitel (nejen) fyziky se jistě mnohokrát setkal s dotazy a poznámkami jako: k čemu je to dobré, vždyť je to jen teorie, má to vůbec nějaký praktický význam apod. A spousta studentů, kteří to sice nevyslovili nahlas, si jistě mnohokrát podobné otázky kladli pro sebe. Dobrý učitel má určitě v zásobě ke každému tématu množství příkladů a ukázek použití probíraného v praxi. Příkladů však není nikdy dost a tato práce jich přináší několik právě z prostředí železnice.

Cílem práce je ukázat na vytipovaných technických řešeních použitých v různých oblastech železniční dopravy, že i pomocí středoškolské fyziky lze alespoň základně odpovědět na mnoho otázek „proč“ a „jak“ v prostředí železnice. Práce tak může sloužit středoškolskému učiteli fyziky jako jedna ze seznamu nápadů, jak ukázat použití probíraného učiva v praxi. Může ji však samostatně použít i (nejen) student, kterého bude zajímat aplikace vybraných fyzikálních zákonitostí právě v tomto prostředí. Úroveň i s členěním textu je tomu přizpůsobena – v základním textu je popis vybraného tématu a jeho vysvětlení na středoškolské úrovni. Formou poznámek pod čarou jsou pak připomenuty vzorce, vztahy, definice apod., které by poučeného čtenáře (učitele) v textu zbytečně zatěžovaly, ale student je mohl zapomenout. Text však nemá ambici být učebnicí, nota bene zájemci si mohou učebnici s danou látkou při čtení tohoto textu otevřít.

Práce pochopitelně obsahuje pouze malý zlomek toho, co by bylo možné popsat jako použití fyziky na železnici. Popsány jsou zde jevy a technické záležitosti, které můžeme na železnici snadno spatřit. Ty pak mohou být využity ve výuce fyziky jako příklad z praxe a může na ně být odkazováno při probírání daného tématu

způsobem: až pojedete vlakem ze školy, všimněte si, že .... Důkazem jsou obrázky pořízené při běžném provozu, ať už z vlaku, podél trati nebo například na nádraží.

Celá práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část se věnuje mechanice a tepelným jevům na železnici. Kapitoly 1.1 – 1.3 se zabývají železničním svrškem – od důvodu použití stěrku coby nosného podkladu pro železniční trať, přes výhody a nevýhody použití různých typů pražců až po způsoby upevnění samotných kolejnic tak, aby zajištěn jejich žádoucí a vyloučen jejich nežádoucí pohyb. Kapitola 1.4 popisuje řešení konstrukce mostů a přechodu kolejí na mosty s ohledem na teplotní roztažnost. Problematice průjezdu vlaku obloukem a silovému působení vlaku na koleje se věnuje kapitola 1.5. Dále je zde v kapitole 1.6 popsána mechanika trolejového vedení elektrizovaných tratí, řešení jejich teplotní roztažnosti a důvody klikatosti troleje.

Druhá část pak popisuje fungování elektrizovaných tratí z elektrického hlediska. Úvodní kapitola 2.1 se zabývá napětím a ochranou trolejového vedení před nechtěnými napěťovými špičkami. Kapitola 2.2 pojednává o způsobech napájení elektrizovaných tratí a fyzikálních důvodech výhod a nevýhod obou hlavních napájecích systémů u nás. Kapitoly 2.3 a 2.4 popisují izolaci a konstrukci trolejového vedení s ohledem na vedení proudu. Problematikou stykových míst různě napájených úseků troleje se zabývá závěrečná kapitola 2.5.

Na závěr některých kapitol je vložen ilustrativní výpočetní příklad. Příklady jsou koncipovány tak, aby co nejvíce odpovídaly skutečnosti, a čtenář si tak mohl o některých jevech udělat i kvantitativní představu.

Pro použití ve výuce je níže přehledově uvedeno učivo dle Rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia [1], ke kterému lze z dané kapitoly čerpat praktický příklad.

Kapitoly 1.1 – 1.3: *tlaková síla, tlak; třecí síla, normálové napětí, Hookův zákon, součinitel teplotní roztažnosti pevných látek*

Kapitola 1.4: *součinitel teplotní roztažnosti pevných látek*

Kapitola 1.5: *poloha a změna polohy tělesa, jeho rychlost a zrychlení; hmotnost a síla; druhý pohybový zákon; tlaková síla, tlak; třecí síla; gravitační a tíhová síla;*

Kapitola 1.6: *hmotnost a síla; tlaková síla, tlak; gravitační a tíhová síla; moment síly; kmitání harmonického oscilátoru; vnitřní energie a její změna; součinitel teplotní roztažnosti*

Kapitola 2.1: *elektrické napětí; proud jako veličina; harmonické střídavé napětí a proud, jejich frekvence*

Kapitoly 2.2 – 2.3: *elektrické napětí; proud jako veličina; Ohmův zákon pro část obvodu; elektrický odpor; elektrická energie a výkon stejnosměrného proudu; polovodičová dioda; harmonické střídavé napětí a proud, jejich frekvence; výkon střídavého proudu; transformátor*

Kapitoly 2.4 – 2.6: *elektrický odpor, proud jako veličina, elektrické napětí, harmonické střídavé napětí a proud*



# 1 Mechanika a tepelné jevy na železnici

Začneme u toho, po čem vlaky vůbec jezdí. Na začátku této kapitoly se budeme zabývat tzv. železničním svrškem. Pokud začneme odspodu, je železniční nebo také kolejový svršek tvořen kolejovým ložem (šterkem), na něm jsou položeny pražce, ke kterým jsou uchyceny kolejnice. Nutnou součástí svršku jsou různá upevňovací prvky, která jsou při konstrukci použita, výhybky, výkolejky apod. Cesta, po které se vlaky pohybují, může být ukázkou použití mnoha fyzikálních poznatků z mechaniky a termiky v praxi.

## 1.1 Kolejové lože

Jak již bylo zmíněno, podstatnou součástí železničního svršku je veliké množství kamení. Tato část se nazývá kolejové lože a plní na železnici zcela zásadní funkci. Běžný cestující si možná pomyslí, že na kamení nemůže být nic tak zásadního a že jsou na něm položeny koleje zkrátka jen tak. Opak je ale pravdou. Pokud se na kolejové lože podíváme detailněji, všimneme si, že kameny mají poměrně ostré tvary a podobné rozměry.



*Obrázek 1: Kolejové lože.*

Na tuto část svršku se používá šterk (může se jednat o přírodní drcené kamenivo nebo recyklované) s hustotou  $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a frakcí 31,5/63 [2]. Jedná se tedy o kameny, které mají „hranu“ dlouhou 31,5 až 63 mm. Kvůli pevnosti

železničního svršku jsou tyto kameny ostré a nepravidelně tvarované. Zapadnou do sebe a utvoří tím pevný podklad pro pražce. Kolejové lože je zachyceno na obrázku 1.

V následující kapitole je zmínka o pražcích, ke kterým jsou připevněny kolejnice. Díky kolejovému loži, na kterém jsou pražce položeny, drží právě tyto pražce pevně na svém místě. Štěrka je nejen pod, ale i mezi nimi, a brání tak jejich náhlému pohybu. Pražce jsou zasypány štěrskem po svůj horní okraj, tloušťka této vrstvy, ve které pražce drží, se pohybuje od 250 mm do 350 mm v závislosti na typu pražců [2].

A proč je kolejové lože, tedy podklad pod pražci s kolejemi, vlastně tvořeno právě štěrskem? Proč neleží koleje na zhutněné zemině nebo betonové vrstvě? Důležitou vlastností podkladové vrstvy je dobrá propustnost vody. Je nutné, aby voda po napršení na koleje rychle odtékla a kolejnice nestály ve vodě. To je nejen z důvodu rychlé koroze, ale i kvůli elektrické vodivosti kolejnic – jak je uvedeno dále, kolejnice jsou zpětným vodičem na elektrizovaných tratích, kolejnice také tvoří vodiče pro různá zabezpečovací zařízení. Kamenivo také trochu přispívá k pohlcování vibrací, a tedy hluku od jízdy vlaku. Po kolejích jezdí těžké vlaky působící na koleje velkými silami. Kvůli tomuto štěrkovému podloží jsou síly dostatečně rovnoměrně rozkládány a přenášeny po kamenech. Díky tomu se koleje do štěrku po přejetí vlaku nepropadnou.

## 1.2 Pražce

Jak již bylo zmíněno, na štěrkovém kolejovém loži jsou položeny pražce, na nichž se nacházejí kolejnice. Díky upevnění k pražcům jsou kolejnice od sebe stále ve stejné, pevně dané vzdálenosti. Vzdálenosti mezi vnitřními hranami kolejnic říkáme rozchod kolejí. V České republice je standardizován tzv. normální rozchod 1435 mm. Existuje však několik výjimek, které tento rozchod nemají. Z veřejných železnic to jsou úzkorozchodné tratě z Třemešné ve Slezsku do Osoblahy a v okolí Jindřichova Hradce, které mají rozchod 760 mm. (Normální rozchod má pro představu také tramvajová doprava v ČR (výjimkou je momentálně přestavovaná tramvajová trať z Liberce do Jablonce nad Nisou) anebo pražské metro.)

Dnešní cestující si pod kolejnicemi všimne obvykle betonových pražců. Pokud bychom se ale vrátili v čase (a nemusíme daleko) například do dob Československa, na tratích bychom našli pražce většinou dřevěné. Takovéto pražce se používaly při stavbě železnic od počátku její existence. Na některých lokálních tratích tyto pražce

však nejdeme i dnes. Dřevěné pražce se vyráběly (a vyrábí) z dobře naimpregnovaného tvrdého dřeva. Používalo se tedy zejména dubové a bukové dřevo, které v dřívější době bez problému uneslo provoz parních lokomotiv. Důvodem, proč se i dnes na některých místech používají dřevěné pražce, je jejich pružnost ve srovnání s ostatními materiály – betonem nebo ocelí. Můžeme si povšimnout, že i na nově rekonstruovaných tratích jsou dřevěné pražce na ocelových mostech, které nemají šterkové lože. Tyto pražce zde tlumí nárazy na mostní konstrukci vznikající při jízdě vlaku. Nevýhodou dřevěných pražců je jejich poměrně nízká životnost. I když tuto životnost prodlužuje zmiňovaná impregnace, pohybuje se stále kolem 30 let. Snižuje ji nejen hniloba, ale také dřevokazný hmyz.

Dalším materiálem používaným při výrobě pražců byla ocel. Díky nižší hmotnosti těchto pražců se s nimi lépe manipuluje. Nevýhodou je však jejich elektrická vodivost, která dělá problémy například u zabezpečovacích zařízení, které využívají elektrických kolejových obvodů. Můžeme je najít na některých vedlejších tratích nebo vlečkách.

Ve druhé polovině 20. století se zdokonalila výroba železobetonu a začaly se prosazovat pražce právě z tohoto materiálu. Oproti předchozím jsou těžší, nejsou elektricky vodivé a ani náchylné například na hnilobu. Zvýšila se tak markantně jejich životnost.



*Obrázek 2: Betonové pražce.*

Oproti tomu dřevěnému však hůře odolávají právě příčným silám, tudíž musí být do šterku pevněji položen (šterk musí být dobře zhutněn). Do dřevěných pražců

se při jízdě vlaku šterk zesponu vmáčkne, čímž vznikne větší tření a k příčnému pohybu se musí vynaložit větší síla.

Na dnešních tratích, kde jsou položeny pražce betonové (obrázek 2), můžeme nalézt dřevěné pražce kromě mostů také zpravidla také pod výhybkami (obrázek 3), kde je každý pražec jiný a je technicky náročnější zde zajistit betonové. Na nově zmodernizovaných hlavních tratích však betonové najdeme už i pod výhybkami.



*Obrázek 3: Dřevěné pražce pod výhybkou. Na bližší koleji je zleva vidět část výhybky – tato část koleje je upevněna na dřevěných pražcích (tmavší barvy). Směrem doprava pokračují pražce betonové (světlejší barvy). Na vzdálenější koleji jsou jen dřevěné pražce.*

### 1.3 Kolejnice

Nejdůležitějším prvkem železničního svršku jsou kolejnice. V páru tvoří koleje, které vlaku umožňují hladkou a plynulou jízdu.

Na české železniční síti se používají tzv. širokopatní kolejnice, jejichž profil ukazuje obrázek 4. Spodní a nejširší část kolejnice se nazývá pata, horní pak hlava. Mezi nimi je úzká část, ve kterou obě části plynule přecházejí nazývající se stojina. Pata kolejnice je nejširší nejen kvůli lepší možnosti uchycení, ale také kvůli stabilitě. Díky širší podstavě dochází ke snížení těžiště, a kolejnice se tak hůře převrátí. Hlava kolejnice má tento tvar z důvodu samotné jízdy vlaku. Tato část je jako jediná ve styku s koly a je „tlustší“ právě kvůli tzv. okolku, díky němuž vlak nevykolejí (kapitola 1.5). Spojnice těchto dvou částí je užší z důvodu úspory materiálu, a tedy i hmotnosti.

Při výrobě kolejnic se používá ocel jakosti 900 A, jejíž pevnost v tahu je přibližně 880 až 1030 MPa <sup>1</sup>[3]. Kolejnice se vyrábí metodou tzv. válcování, které probíhá při teplotě 1000 °C [4].



*Obrázek 4: Profil kolejnice [3].*

### 1.3.1 Upevnění kolejnic

Každá tato kolejnice musí být přichycena k pražci. Kolejnice však není s pražcem spojena napevno, ale mezi pražec a patu kolejnice je vložena tzv. podkladnice (na obrázku 5). Tato „vločka“ má za cíl zvýšit kontaktní plochu mezi kolejnicí a pražcem. Následný tlak vyvolaný průjezdem vlaku se tak díky větší ploše zmenší<sup>2</sup>, a pražec (ať už dřevěný nebo betonový) tak není tolik namáhán.

V počátcích železniční dopravy se kolejnice na podkladnici přidělávala napřímo. Pata tedy byla pomocí vrtulí (nebo jiných vrtů) přichycena rovnou k podkladnici. Při tomto uchycení byla nutná častá údržba jako například utahování šroubů. Ty se totiž působením sil od jízdy vlaku postupně uvolňovaly a docházelo k vychylování kolejnic. Zároveň nebyl nijak vyřešen problém teplotní roztažnosti. Nyní už takové uchycení na železnici nenajdeme.

---

<sup>1</sup> Pevnost v tahu je maximální napětí, které materiál snese bez porušení.

<sup>2</sup> Určíme pomocí výpočtu tlaku  $p = \frac{F}{S}$ , kde  $F$  je síla, působí kolmo na plochu  $S$ . S rostoucí plochou se pak tlak způsobený danou silou zmenšuje. Bez podkladnice by byla styčná plocha mezi kolejnicí a pražcem menší a tlak působící na malou plochu pražce by mohl snáze způsobit například popraskání pražce.



*Obrázek 5: Podkladnice upevněná k pražci [5]. Do široké drážky ve střední části se vkládá kolejnice.*

Později se vyvinula tzv. žebrová a rozponová podkladnice. Při tomto typu upevnění je pata kolejnice přichycena k podkladnici pomocí malé ocelové vložky. Tím je docíleno toho, že se kolejnice může při průjezdu vlaku a při teplotním rozpínání „hýbat“. Takový typ upevnění je vidět na obrázku 6.



*Obrázek 6: Rozponové upevnění. Dva krajní šrouby přichycují podkladnici k pražci, prostředním šroubem je upevněna vložka k podkladnici. Vložka přesahuje přes okraj paty kolejnice. Kolejnice je tak zajištěna proti příčnému pohybu, ale může se pohybovat podélně.*

Rozponové upevnění můžeme a zahlédnout na většině vedlejších tratí, kde vlaky nejezdí tak vysokými rychlostmi

Po druhé světové válce došlo k zásadní změně, tedy k vývoji tzv. pružného upevňování. Pružné upevnění je podle Správy železnic (SŽ) popsáno jako „upevnění, kdy je pata kolejnice trvale přitlačována pružným elementem, a to i pod zatížením při průjezdu vlaku“ [6]. Volnost pohybu je v tomto případě větší než u rozponového způsobu (třecí plocha mezi patou kolejnice a upevňovacím prvkem je menší), zároveň ale zůstává pevnost uchycení jako takového. Při budování a modernizaci tratí se v dnešní době používá zpravidla tohoto upevnění.



*Obrázek 7: Pružné upevnění. Svěrka je přišroubována k podkladnici tak, že její konce vyvíjejí stály přitlak na patu kolejnice.*

### 1.3.2 Spojování a roztažnost kolejnic

Z technického, provozního a ekonomického hlediska by bylo náročné vyrábět kolejnice libovolně (až nekonečně) dlouhé. Z toho důvodu se kolejnice vyrábějí po částech, které jsou následně různými způsoby spojovány. Standardně jsou kolejnice dlouhé 25 m [3], ale vyrábějí se v délkách až 75 m, v ojedinělých případech (například pro VRT (vysokorychlostní tratě)) můžou jednotlivé části dosahovat až 120 m.

Dříve se kolejnice spojovaly metodou, která je zachycena na obrázku 8. Spojení dvou kolejnic se říká kolejový styk (na obrázku 8 konkrétně šroubovaný spoj) a je možné ho najít opět na některých vedlejších tratích.



*Obrázek 8: Kolejnicový styk na výhybce.*

Kolejnice nejsou přiraženy přímo na sebe, ale jsou spojeny tak, že se je mezi nimi ponechává tzv. „dilatační spára“. Tato mezera má na železnici zásadní funkci. Vlivem změn teplot se kolejnice chovají stejně jako každá jiná pevná látka, tedy se roztahují nebo naopak smršťují<sup>3</sup>. Pokud by mezi kolejnicemi mezera nebyla a styk byl proveden natěsno, došlo by při větším výkyvu teploty k roztažení kolejnice, zvýšenému napětí na spoji a při nedokonalém zašterkování i k vychýlení kolejnice. Při jízdě vlaku po křivé koleji by mohly být následky až fatální. Dilatační spáry můžeme poznat podle typického „drncání“ vlaků.

Dnes už tento efekt na hlavních tratích, kde jezdí vlaky vyššími rychlostmi, téměř nenajdeme. Důvodem je využívání jiného způsobu spojování kolejnic a sice tzv. bezstykové koleje. U takového typu kolejí jsou jednotlivé části kolejnic mezi sebou svařovány, a tudíž nevznikají dilatační mezery, bez nichž je jízdni dráha hladká. Vynecháním těchto mezer dochází k zvýšení komfortu cestujících (opadne ono pověstné „drncání“), ale hlavně ke snížení poruchovosti vozidel, které byly při přejezdu přes dilataci značně opotřebovány. Otázkou ale zůstává, jak je to u takovýchto kolejí s teplotní roztažností, ty se přece musí „někam roztáhnout“. Na obrázku 9 je vidět svařený spoj.

---

<sup>3</sup> Teplotní roztažnost je jev, při kterém dochází ke změně rozměrů tělesa vlivem změn jeho teploty. Je-li  $l_0$  původní délka tělesa podlouhlého tvaru,  $\alpha$  teplotní součinitel délkové roztažnosti a  $\Delta t$  změna teploty tělesa, roztáhne se těleso na délku  $l = l_0(1 + \alpha\Delta t)$ .





*Obrázek 9: Svarový spoj.*

Takto svařené kolejnice musí být velmi pevně uloženy. Při teplotních výkyvech tedy dochází k tlakovému nebo tahovému (zejména v zimě) namáhání celé kolejnice. Pokud by tak kolej nebyla dostatečně upevněna, došlo by až k příčnému vybočení koleje.

I z tohoto důvodu se takovýto kolejnicový svár provádí při teplotách odpovídající průměrné okolní teplotě. Dochází tak k menšímu mechanickému namáhání při změnách teploty. Pokud bychom například kolejnice svařovali v zimě při teplotě 0 °C, byly by v létě namáhány v tlaku mnohem více než v zimě v tahu (v létě na slunci by mohl být teplotní rozdíl oproti teplotě během svařování i více než 50 °C, v zimě do 20 °C). Pokud ji ale svaříme například při teplotě 17 °C, bude změna teploty podobná v zimě i v létě (při svařování v zimě se tedy kolejnice musí zahřívat).

### Příklad 1 – Dilatační mezera

Při pokládce kolejnic o délce 25,000 m byla jejich teplota 25 °C. Vypočtěte, jak velkou dilatační mezera je potřeba ponechat mezi každými dvěma kolejnicemi, mají-li být těsně u sebe při zahřátí na 60 °C. Jaká bude mezera mezi nimi, ochladí-li se v zimě na -20 °C? Předpokládáme, že kolejnice jsou upevněny tak, že se roztahují rovnoměrně na obě strany (tj. jako kdyby byly uprostřed přichyceny napevno). Teplotní součinitel délkové roztažnosti oceli je  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  [7].

Řešení:  $l_0 = 25 \text{ m}$ ;  $t_0 = 25 \text{ °C}$ ;  $t_1 = 60 \text{ °C}$ ;  $t_2 = -20 \text{ °C}$ ;  $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

*Pro výpočet použijeme vztah k určení délky, na kterou se roztáhne těleso podlouhlého tvaru při zahřátí.  $l_0$  označíme původní délku kolejnice a  $t_0$  teplotu při pokládce.  $l$  je pak délka při teplotě  $t$ .  $\Delta t = t - t_0$  je změna teploty.*

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) \quad (1)$$

*Délka kolejnice je při teplotě 60 °C, kdy je  $\Delta t = 35 \text{ °C}$  (respektive 35 K), rovna:*

$$l = 25 \text{ m} \cdot (1 + 35 \text{ K} \cdot 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}) = 25,011 \text{ m}.$$

*Kolejnice se prodlouží celkem o 1,1 cm, na jednu stranu tedy o 55 mm. Proti ní se ale roztáhne druhá kolejnice o stejnou vzdálenost. Mezera, kterou kolejnice mezi sebou musí mít, je rovna přesně této vzdálenosti a sice 1,1 cm.*

*Uvažujme kolejnice s dilatační spárou 1,1 cm a o teplotě 25 °C. Ochladí-li se v zimě na teplotu -20 °C ( $\Delta t = -45 \text{ K}$ ), bude délka jedné kolejnice zkrácena na hodnotu:*

$$l = 25 \text{ m} \cdot (1 - 45 \text{ K} \cdot 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}) = 24,985 \text{ m}.$$

*Celá kolejnice se zkrátí o 1,5 cm. O stejnou vzdálenost tak se zvětší dilatační mezera. Ta bude v zimě veliká 2,6 cm.*

***Dilatační mezera musí být při pokládce veliká 1,1 cm, přičemž se v zimě zvětší na 2,6 cm.***

## Příklad 2 – Bezstyková kolej

Vypočtete, jaký je nárůst mechanického napětí v bezstykové kolejnici (tj. bez možnosti se protáhnout do délky) při zahřátí kolejnice o 1 °C. Uvažujte teplotní součinitel délkové roztažnosti oceli  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , modul pružnosti oceli v tlaku 200 GP [7].

Řešení:  $\Delta t = 1 \text{ °C}$ ;  $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;  $E = 200 \text{ GPa}$

*K výpočtu použijeme Hookův zákon.  $\sigma$  označuje mechanické napětí,  $E$  modul pružnosti (lze najít v tabulkách) a  $\varepsilon$  relativní prodloužení, jež je rovno poměru  $\frac{\Delta l}{l_0}$  (prodloužení ku původní délce).*

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

*Prodloužení  $\Delta l$  určíme jako vzdálenost, o kterou by se kolejnice roztáhla při ohřátí o 1 °C.  $\Delta l = l - l_0$  ( $l$  je délka prodloužené kolejnice,  $l_0$  délka původní). Po dosazení do vztahu pro relativní prodloužení a následnému zjednodušení dojdeme ke vztahu:*

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) - l_0}{l_0} = \frac{l_0}{l_0} ((1 + \alpha \Delta t) - 1) = \alpha \Delta t. \quad (2)$$

*Mechanické napětí pak určíme jednoduše jako:*

$$\sigma = E \alpha \Delta t = 200 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \cdot 1 \text{ K} = 2\,600 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 2,6 \text{ MPa}.$$

***Napětí v bezstykové koleji se při zahřátí o 1 °C zvýší o 2,6 MPa.***

## 1.4 Mosty

Železniční tratě nejen v České republice, v Evropě, ale i po celém světě obsahují celou řadu stavebních prvků, mezi něž se řadí tunely, estakády, viadukty, mosty a podobně. Z technický důvodů je převýšení tratě minimální (řádově se hodnota pohybuje kolem jednotek až desítek promile). V minulosti se proto stavby tratí projektovaly tak, aby vedly po dráze s právě co nejmenším sklonem, tratě tedy vedly často po vrstevnicích. Někdy však bylo třeba překonat údolí, horu nebo například řeku. Některé problémy se daly vyřešit obyčejným náspem, přes řeku však musela přijít na řadu stavba mostu. Než se začal opět prosazovat železobeton, byly mosty jednoduše konstruovány ze stejného materiálu jako kolejnice, a to z oceli.

Při stavbě se tedy musel brát ohled na podobné potíže jako při pokládce kolejí. Jednou z nich je opět teplotní délková roztažnost. Řešení je však jednoduché. Most není posazen na kamenné nebo betonové pilíře napevno, ale spočívá na pohyblivých částech – válečkových ložiscích (obrázek 10). U meších mostovek jsou tato válcová ložiska pouze na jedné straně, na opačné straně je most postaven „napevno“ na „hrotu“. Zároveň jsou na krajích konstrukce ponechány dilatační mezery. Při změně teploty, kdy se most protáhne nebo zkrátí, se válec pootočí a most se neporuší.



Obrázek 10: Mostová konstrukce posazená na válcové ložisko. Železniční most v pražské Výtoni.

Dnešní železobetonové konstrukce nevyužívají válcových ložisek, ale jsou posazeny na velkých tzv. elastomerových ložiscích čtvercového tvaru: mezi horní konstrukci a pilíře je vložena pryž, která umožňuje volný pohyb mostovky.

Jak je to ale s kolejemi, které přes most vedou? Na ocelových mostech bez štěrkového lože (bez něj je most lehčí) jsou pražce (zejména dřevěné) položeny přímo na mostovku. Na přechodech je mezi takovýmto mostem a zbytkem trati je využíváno tzv. dilatačního zařízení. To umožňuje daleko větší pohyb kolejnic v podélném směru než běžný kolejnicový styk. Dilatační zařízení je tvořeno jednou kolejnicí, která je seříznuta do špičky (stejný tvar jako u výhybky), té se říká jazyk, a druhou kolejnicí, která je lehce vychýlena (viz obrázek 11, na kterém je pouze jedna z kolejnic) nebo může mít také tvar jazyka. Při jízdě vlaku je přechod zajištěn plynule, kolo vlaku nemusí překonávat dilatační spáru jako na běžném styku kolejnic. Takovému dilatačnímu zařízení ovšem můžeme najít z bezpečnostních důvodů i na některých mostech s kolejovým ložem, zejména na tratích, kde vlaky jezdí velmi vysokou rychlostí.



*Obrázek 11: Dilatační zařízení na železničním mostě v pražské Výtoni.*

## 1.5 Průjezd obloukem

Častý problém, který nastává při cestování vlakem, souvisí s jízdou do oblouku. Tedy v momentě, kdy je kolej zakřivena a vlak tím mění svůj směr (zatáčí). Aby lokomotiva (a vůbec celý vlak) zatočila, musí být zajištěna dostatečně velká

dostředivá síla<sup>4</sup>. Při jízdě autem je tato síla způsobena třením, tedy přilnavostí kola k vozovce, zatímco při jízdě kolejových vozidel tuto sílu zajišťuje tzv. okolek, který napomáhá k vedení kola po kolejnici. Je to jakýsi výstupek, který vyčnívá z vnitřní strany kola po celém obvodu a dotýká se hlavy kolejnice z vnitřní strany. Bez něj by jednoduše lokomotiva vykolejila, neboť by se na kolejích neudržela a sjela by mimo ně. Dostředivou silou je pak tlaková síla kolejnic na okolek. Pro představu je okolek vidět na obrázku 12.



*Obrázek 12: Okolek. Z vnitřní strany kolejnice je vidět, že okolek zasahuje níž než je její horní hrana.*

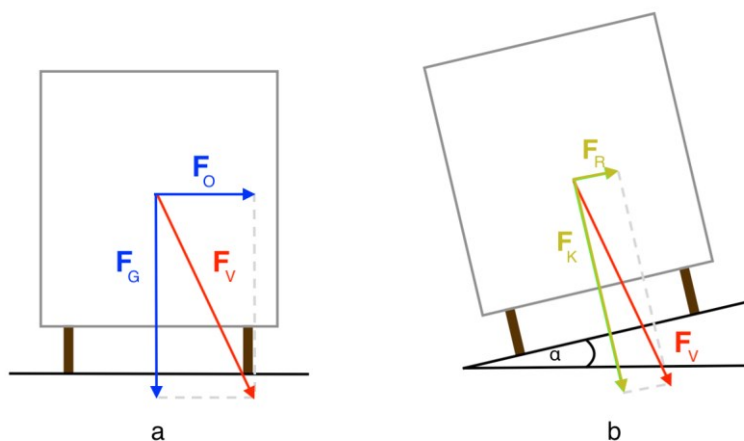
Důležitým prvkem, který jízdu obloukem zlepšuje, je vhodný náklon kolejí. V praxi to vypadá tak, že je vnitřní kolejnice oblouku položena níže než ta vnější. Vlak je při průjezdu obloukem tedy lehce nakloněn. Náklon je pak určen v závislosti na průjezdní rychlosti vozidel a také poloměru křivosti daného oblouku. Rychlost, na kterou je daný náklon dělaný, se bere jako jakýsi kompromis mezi všemi rychlostmi,

---

<sup>4</sup> Dostředivá síla udržuje těleso na zakřivené trajektorii. Závisí na hmotnosti tělesa  $m$  a jeho rychlosti  $v$ , ale také na poloměru křivosti oblouku  $r$ . Platí  $F = \frac{m \cdot v^2}{r}$ . V neinerciální soustavě spojené s pohybujícím se tělesem působí na toto těleso odstředivá síla, kterou vypočteme podle stejného vztahu. V případě jízdy vlaku je žádoucí tuto sílu co nejvíce zmenšit, proto se při stavbě nových tratí pro vyšší rychlosti volí velké poloměry oblouků, na stávajících tratích je v oblouku často povolena nižší maximální rychlost než v rovném úseku tratě.

kterými vlaky daný oblouk projíždějí. Vždy však musí být náklon takový, aby nebyla ohrožena stabilita jakéhokoliv vlaku, pokud v oblouku zastaví.

Cílem náklonu obloukové trati je co nejvíce snížit tu část odstředivé síly, která působí na okolky. Bez náklonu dochází k opotřebování vnější koleje a okolku a zároveň je zde riziko převrácení vlaku.



Obrázek 13: Rozklad výsledné síly působící na vlak v oblouku.

Obrázek 13a ukazuje průjezd obloukem bez náklonu. Na vlak působí tíhová síla  $F_G$  a odstředivá síla  $F_o$  (viz poznámka <sup>5</sup>). Šikmo dolů je znázorněna výslednice  $F_V$  těchto dvou sil. Na obrázku 13b pak vidíme průjezd vlaku obloukem v náklonu. Výslednice  $F_V$  zůstává stejná (působí stejné síly jako v 13a, pro přehlednost nejsou v obrázku zakresleny). Tuto výslednici pak můžeme rozložit na sílu rovnoběžnou s rovinou kolejí  $F_R$  a sílu k ní kolmou  $F_K$ . Silou  $F_R$  působí okolek na vnější kolejnici z boku, silou  $F_K$  působí kola na kolejnici shora. Je tedy zřejmé, že velikost síly, kterou tlačí okolek na kolejnici (a kolejnice na okolek) je v tomto případě podstatně menší než v případě 13a (kdy je tato velikost této síly rovna velikosti síly odstředivé – viz obrázek). Dochází tak k menšímu opotřebení materiálů okolku i kolejnice a vozidlo je při průjezdu obloukem ve stabilnější poloze.

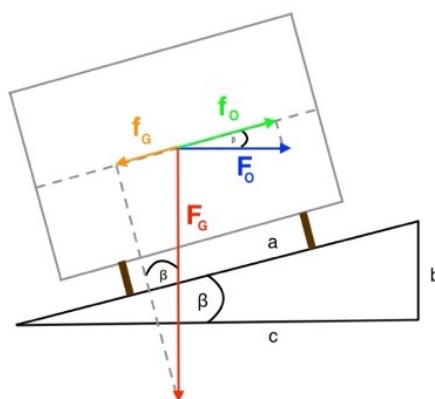
Některá moderní vozidla (u nás pouze elektrická jednotka řady 680 Pendolino) disponují naklápěcími skříněmi, které umožňují průjezdy obloukem s daleko vyšší rychlostí. Naklápěcí skříň nemá vliv na tlakovou sílu okolku, zvyšuje se však komfort cestujících (skříň se naklápí ideálně tak, aby výslednice  $F_G$  a  $F_o$  působící na cestující mířila kolmo k podlaze vlaku) a trochu se zlepšuje stabilita vozidla.

### Příklad 3 – Rychlost v oblouku

V oblouku o poloměru 300 m je převýšení koleje 150 mm (tzn. kolejnice ve vnější části oblouku je o 150 mm výše než kolejnice ve vnitřní části oblouku). Vypočítejte, jakou rychlostí musí jet motorový vůz řady 810, aby docházelo k minimálnímu opotřebení okolků i kolejnic na obou stranách (tj., aby výsledná síla působící na koleje byla kolmá na spojnici obou kolejnic). Vypočítejte, jaká minimální třecí síla musí působit mezi cestujícím a sedačkou, aby cestující nesklouzl ze sedadla, pokud vlak v oblouku zastaví.

Řešení:  $a = 1435 \text{ mm}$ ;  $b = 150 \text{ mm}$ ;  $r = 300 \text{ m}$ ;  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  [7]

Na těleso působí při průjezdu obloukem mj. tíhová síla  $F_G$  a odstředivá síla  $F_O$ . Při řešení využijeme rozkladu sil na složku rovnoběžnou s rovinou kolejí a složku na ní kolmou a rozložíme tak obě síly. Na obrázku jsou zakresleny pouze průměty  $f_G$  a  $f_O$  rovnoběžné s rovinou kolejí. Průměty k ní kolmé se nijak na sílu okolků na kolejnici neprojeví.



Obrázek 14: Rozklad sil.

Velikosti těchto složek určíme pomocí úhlu náklonu trati jako:  $f_G = \sin\beta \cdot F_G$  a  $f_O = \cos\beta \cdot F_O$ . Tíhová a odstředivá síla je jednoduše:  $F_G = m \cdot g$ , kde  $m$  je hmotnost vozu a  $g$  tíhové zrychlení,  $F_O = \frac{mv^2}{r}$ , kde je  $v$  rychlost vozu a  $r$  poloměr daného oblouku. Aby nepůsobil okolek na kolejnici žádnou silou, musí se průměty  $f_G$  a  $f_O$  rovnat. Po dosazení dostaneme rovnost:

$$\sin\beta \cdot m \cdot g = \cos\beta \cdot \frac{mv^2}{r}, \quad (1)$$



$$\text{pak je rychlost: } v = \sqrt{\frac{\sin\beta}{\cos\beta} \cdot g \cdot r} = \sqrt{tg\beta \cdot g \cdot r}. \quad (2)$$

Abychom určili  $tg\alpha$ , potřebujeme pomoci Pýthagorovy věty dopočítat stranu  $c$ .

$$c = \sqrt{1435^2 - 150^2} \text{ mm} = 1427 \text{ mm. Pak je } tg\beta = \frac{b}{c} = \frac{150}{1427}. \text{ Dosazením hodnot do}$$

(2) dopočítáme rychlost  $v$ .

$$v = \sqrt{\frac{150}{1427} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 300 \text{ m}} = 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cong 65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

**Aby při průjezdu vlaku působil okolek co nejmenší (nulovou) silou na kolejnici, musí jet přibližně rychlostí  $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .**

Třecí síla  $f_G$  působící na cestujícího, který je v klidu (nesjíždí ze sedačky), musí být stejně velká jako síla  $f_G$  (zde ve smyslu složky tíhové síly působící na cestujícího, nikoli na vlak) a musí mít opačný směr.

$$F_T = f_G = \sin\beta \cdot m \cdot g \quad (3)$$

Pomocí  $\triangle abc$  dopočítáme  $\sin\alpha = \frac{b}{a} = \frac{150}{1435}$  a dosazením hodnot do (3)

dopočítáme třecí sílu.  $\sin\beta = \frac{b}{a} = \frac{150}{1435}$ . Budeme uvažovat průměrnou hmotnost člověka 80 kg.

$$F_T = \frac{150}{1435} \cdot 80 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 82 \text{ N}$$

**Třecí síla působící na sedícího člověka o hmotnosti 80 kg musí být velká 82 N, aby při zastavení vlaku v oblouku nesklouzl ze sedačky.**

## 1.6 Trolejové vedení

V České republice je elektrifikována zhruba třetina železniční sítě spadající pod SŽ. V této kapitole se budeme věnovat právě těmto tratím, respektive trolejovému vedení z pohledu mechanických a tepelných jevů. Popisu elektrických vlastností a elektrických jevů se pak věnuje kapitola 2.

Každého cestujícího elektrickým vlakem může napadnout řada otázek týkajících se právě trolejového vedení. Kdokoliv si těchto „drátů“ nad hlavami všiml, se mohl zamyslet například nad tím, jak vůbec trolej nad kolejemi drží. Proč je vůbec vodičů nad železniční tratí více, když například nad tramvajovou je jen jeden. Pokud se někdo rád dívá na trať ze zadní části posledního vagónu, mohl si pomyslet, proč jsou troleje klikaté, když je kolej pod nimi rovná? Anebo proč jsou na některých stožárech kladky a těžká závaží? Na některé tyto otázky lze odpovědět využitím jednoduché středoškolské fyziky.

### 1.6.1 Zavěšení trolejového vedení

Začněme tím, jak jsou troleje nad tratí vůbec přichyceny a k čemu jaký „drát“ slouží. Na obrázku 15 je dvoukolejná elektrifikovaná trať. Nad každou z kolejí vidíme dva dlouhé vodiče nad sebou. Zároveň si ale všimněme, že jsou tyto vodiče spojeny kratšími laničkami.



*Obrázek 15: Dvoukolejná elektrifikovaná trať.*

Horní vodič slouží jako nosné lano pro spodní vodič, kterým je samotná trolej. Tomuto typu zavěšení se říká řetězovkové a je na železnici vůbec nejpoužívanější.

Než si ho ale popíšeme, poukážeme na tzv. prosté vedení, které se používá u tramvajové dopravy. Vodivá trolej, po které se smývá sběrač, je jednoduše pověšena mezi jednotlivými stožáry. To, jak je trolej prověšená, závisí na vzdálenosti stožárů od sebe i na teplotě (teplotní roztažnost). Pro tento typ dopravy, kdy tramvaje nedosahují tak vysokých rychlostí, je způsob prostého vedení dostačující. Problém by však nastal u rychlostí daleko vyšších, jimiž se pohybují vlaky.

Pokud by byla na železničních tratích trolej prověšena (nebyla by tedy vodorovná), docházelo by při vysokých rychlostech k odskakování sběrače od trolejového drátu. Sběrač je totiž k troleji přitlačován pomocí jednoduché pružiny (viz obrázek 16). Ta sběrač udržuje ve zvednuté poloze a vyvolává přitlak sběrače na trolej.



*Obrázek 16: Sběrač lokomotivy (polopantograf). Ve spodní části je vidět pružina, pomocí níž je sběrač přitlačován k troleji.*

Při prostém vedení na železnici, kde jsou na rovných úsecích stožáry v pravidelných vzdálenostech (prověšení by tak bylo také pravidelné), by mohlo dojít i k rezonančnímu zesílení kmitů<sup>5</sup> sběrače a jeho následnému poškození

---

<sup>5</sup> Každé kmitající těleso má nějakou vlastní frekvenci kmitů. Pokud natáhneme pružinu a pustíme ji, bude kmitat se svou vlastní frekvencí. Můžeme také pružinu rozkmitávat harmonicky se měnící vnější silou různé frekvence. Pružina pak bude kmitat s frekvencí vnější (budící) síly. Velikost výchylky však nebude při všech frekvencích stejná – největší bude, pokud frekvence vnější síly bude rovna vlastní frekvenci pružiny. V tom případě říkáme, že nastala rezonance. Ta může být v mnoha případech nebezpečným jevem pro pevnost kmitajících materiálů, protože velikost maximální výchylky může být značná (záleží na velikosti tlumení, bez něj je maximální výchylka teoreticky nekonečná).

a poškození troleje. Pokud by byl problém řešen zvětšením přítlaku sběrače k troleji, mohlo by docházet k velkému nadzdvihávání troleje a jejímu hnutí, které by vedlo k její destrukci. Při každém odskakování zároveň dochází ke vzniku nežádoucího elektrického oblouku.

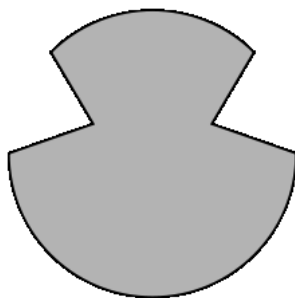
Na řadu tedy přichází řetězovkové zavěšení troleje, při němž je trolejový drát („spodní drát“) zavěšen pomocí laníček na nosné lano („horní drát“). Nosné lano je pak jednoduše prověšeno a pomocí různě dlouhých laníček je dosaženo téměř vodorovné troleje, která je tak po celé své délce v takřka konstantní výšce nad kolejí. Díky tomu se sběrač hladce po troleji smýká, aniž by při vyšších rychlostech odskakoval.



*Obrázek 17: Detail řetězovkového vedení. Je vidět, že je horní nosné lano prověšené.*

Takovéto řetězovkové vedení, je na rovné trati ve stejných vzdálenostech přichyceno pomocí konzolí k ocelovému nebo železobetonovému stožáru. V některých případech (například na nádražích nebo v místech s větším počtem kolejí) jsou stožáry spojeny lanovými či ocelovými nosníky (břevny), ke kterým je pak zespondu trolej opět pomocí konzole uchycena.

Jak je ale trolej pomocí laníčka zavěšena na nosné lano, když se po něm musí sběrač bez přerušování smýkat? Způsob přidržování laníčkem je dán průřezem onoho vodiče. Každého v prvním momentě napadne, že má trolej kulatý průřez, tedy že vypadá jako každý jiný drát. Ve skutečnosti má trolej na bocích drážky, do kterých jsou pak úchyty připevněny. Pro představu je průřez na obrázku 18. Plocha průřezu závisí na typu trakční soustavy (kapitola 2.2).

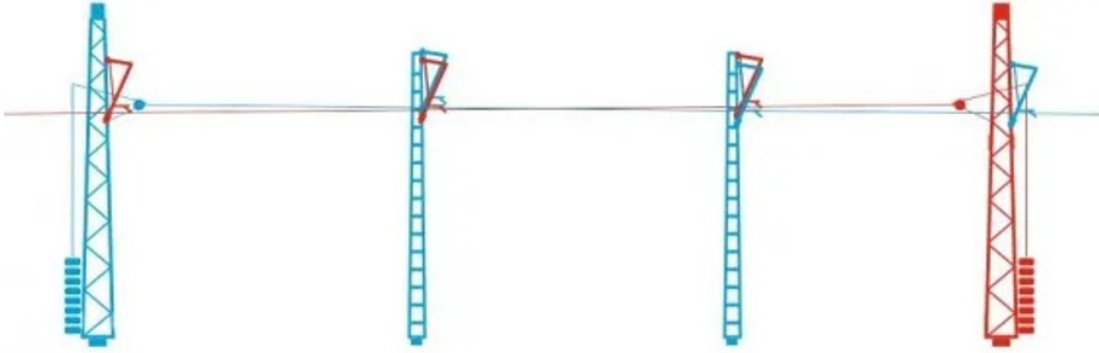


*Obrázek 18: Průřez trolejovým drátem [8].*

### 1.6.2 Napínání a roztažnost trolejí

V kapitole 1.1. byl u železničního svršku vyřešen problém teplotní roztažnosti jednoduchým ponecháním mezery mezi dvěma navazujícími kolejnicemi. Takové řešení by bylo technicky asi možné zkonstruovat, ale nebylo by praktické. Lokomotiva by kvůli neustálému zvedání a stahování sběrače nedosáhla vysokých rychlostí a elektrifikace by ztratila význam. Aby se trolej kvůli teplotní roztažnosti neprohýbala, je celé trakční vedení „rozkouskováno“ na části dlouhé přibližně do 1500 m. Jednotlivé části jsou pak z obou stran napínány pomocí závaží, jež je k troleji připevněno často pomocí kladkostroje. Na některých stožárech je k vidění i západkový naviják, díky němuž po přetržení troleje závaží nepadne a neponičí stožár. Uprostřed úseku je napínaná část ukotvena, aby se nemohla posunovat jedním nebo druhým směrem.

V místě styku dvou takto napínaných úseků to vypadá tak, že se obě části mezi několika stožáry překrývají a jsou mezi sebou vodivě propojeny. Pro lepší představu je styk na obrázku 20 (kvůli přehlednosti je uvažován pouze trolejový drát). Místo styku dvou trolejových částí snadno poznáme podle různě tvarovaných a hlavně silnějších stožárů.



Obrázek 19: Styk dvou napínaných úseků (bez nosného lana) [9]. Vlak přijíždějící zleva smýká sběrač po červené troleji. Následuje pak úsek, kde jsou na několika stožárech připevněny dvě troleje, přičemž modrá klesá a červená stoupá. Sběrač tak postupně přejede na modrou trolej, po níž dále pokračuje.



Obrázek 20: Kladkostroj. Na konci troleje je připevněna volná kladka, která potřebnou sílu k napnutí snižuje na polovinu. Díky tomu má závaží poloviční hmotnost, než by bylo třeba, kdyby bylo zavěšeno přímo na troleji.



*Obrázek 21: Západkový naviják. Závaží je připevněno a navijeno do drážky s poloměrem celého kotouče. Trolej je připevněna a navijena na kotouč s menším poloměrem. Závaží tak vytváří moment síly orientovaný směrem „k nám“. Aby byl naviják v klidu, musí trolej vytvářet moment síly stejně veliký, ale orientovaný opačným směrem. Díky většímu poloměru kotouče tak může mít závaží opět menší hmotnost, než kdyby bylo využito obyčejné kladky. Naviják má po svém obvodu výstupky. Pokud by došlo k přetržení troleje, kotouč by poklesl a zahákl se do západky (viditelná pod kotoučem). Po zapadnutí by nedošlo k pádu závaží a následné destrukci okolí (závaží je velmi těžké).*

#### Příklad 4 – Napínání troleje

Trolej a nosné lano jsou napínány závažím tvořeným ze 32 betonových válců, přičemž je využito zavěšení na obrázku 20. Jeden kladkostroj napíná polovinou závaží trolej a ten druhý druhou polovinou závaží nosné lano. Jakou silou bude napínána trolej, jestliže jeden betonový válec váží 30 kg?

---

Řešení:  $m_v = 30 \text{ kg}$ ;  $n_v = 32$ ;  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

*Závaží působí silou  $F_z$  a trolej je napínána silou  $F_t$ . Napínání troleje na tomto stožáru využívá volné a pevné kladky. Síla působící na konec lana u závaží je díky volné kladce poloviční, než je síla napínající trolej.*

$$F_t = 2F_z \quad (1)$$

*Sílu, kterou působí na lano betonové válce, je tíhová síla betonových válců:*

$$F_z = m_z \cdot g, \quad (2)$$

*kde  $m_z$  je hmotnost závaží a  $g$  tíhové zrychlení (tabulková hodnota). Hmotnost závaží určíme díky počtu válců  $n_v$  a jejich hmotnosti  $m_v$ .*

$$m_z = m_v \cdot \frac{1}{2} n_v = 30 \text{ kg} \cdot 16 = 480 \text{ kg}$$

*Po dosazení hmotnosti do vztahu (2) a následně do (1), získáme sílu působící na trolej:*

$$F_t = 2F_z = 2m_z \cdot g = 2 \cdot 480 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 9420 \text{ N}.$$

***Trolej (resp. nosné lano) je napínána silou 9240 N.***



### 1.6.3 Klikatost

Když se na rovné trati podíváme z kolejí na trolejové vedení, uvidíme, že je klikaté. Tzn. nevede rovnoběžně s kolejnicemi, střídavě se přibližuje od jedné ke druhé. Tato nenápadná vlastnost viditelná na obrázku 22 má velmi opodstatněný důvod. Sběrač proudu je opatřen smykadlem, které je v kontaktu s trolejí. Jak název napovídá, trolej se po něm smýká. Pokud bychom nechali trolej v přímce, docházelo by na smykadle k vybrušování drážek a silnému zahřívání jednoho místa. Smykadlo by se tak muselo často měnit. Ovšem když má trolejové vedení tuto klikatost, bývá smykadlo na sběrači opotřebováno rovnoměrně v šířce dané klikatostí a prodlužuje se tím jeho životnost. Zároveň je klikatost omezena tak, aby nedošlo ke sjetí sběrače mimo trolej. V oblouku je pak docíleno klikatosti jednoduše tím, že je trolej mezi dvěma stožáry vždy rovná, nad obloukem kolejí má tedy tvar lomené čáry.



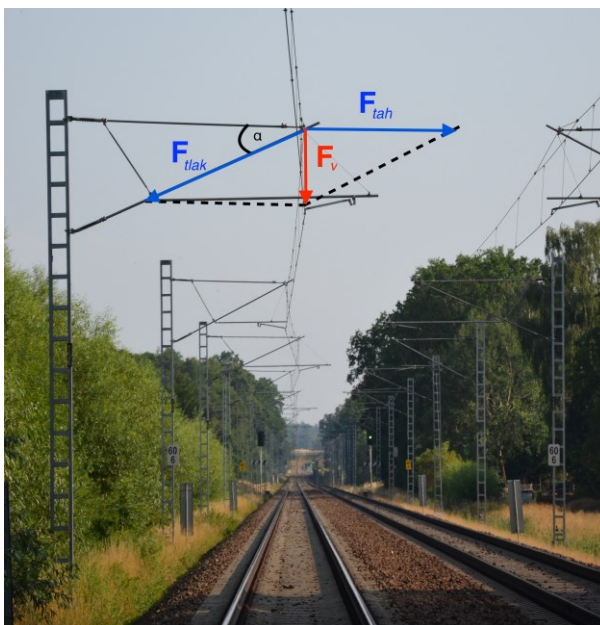
*Obrázek 22: Klikatost troleje na rovném úseku. Klikatosti je docíleno tím, že je trolejový drát napínán střídavě na opačné strany – na nejbližším stožáru doprava, na dalším doleva, atd.*

## Příklad 5 – Namáhání výložníku

Vypočtete, jakou silou jsou namáhány horní a spodní části výložníku (část konzole ve tvaru trojúhelníku) na jednom stožáru nesoucím trolejové vedení na střídavém systému. Předpokládejme, že je trolej v úseku 1000 m uchycena na 17 stožárech. Trolejový drát má průřez  $100 \text{ mm}^2$  a je zhotoven z elektrovodné mědi s hustotou  $8960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [10]. Předpokládejme, že ostatní části vedení (nosné lano, laníčka, drobná upevňovací) mají přibližně stejnou hmotnost jako samotná trolej.

Řešení:  $l = 1000 \text{ m}$ ;  $n = 17$ ,  $S = 100 \text{ mm}^2$ ;  $\rho = 8960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Výložník je zobrazen na obrázku 23, uvažujme, že jeho ramena svírají úhel  $30^\circ$ . Trolej je přichycena na jeho rohu a zde působí na konstrukci silou  $F_v$ . Síla působící na vrchol výložníku odpovídá tíze troleje a můžeme ji rozložit na sílu působící na vodorovné rameno v tahu a na šikmé rameno v tlaku. Tíha celé troleje v délce  $l$  se rovnoměrně rozloží na  $n$  stožárů.



Obrázek 23: Rozklad síly působící na výložník.

Hmotnost celého trolejového drátu určíme pomocí vztahu:

$$m = l \cdot S \cdot \rho. \quad (1)$$

Hmotnost vodiče připadající na jeden stožár odpovídá hmotnosti:

$$m_s = \frac{m}{n} = \frac{l \cdot S \cdot \rho}{n} \quad (2)$$

Tíhová síla působící na část troleje (trolejového drátu):

$$F = m_s \cdot g = \frac{m}{n} g = \frac{l \cdot S \cdot \rho}{n} g, \quad (3)$$

kde  $g$  je tíhové zrychlení (tabulková hodnota). Celková síla působící na výložník  $F_v$  je ale dvojnásobná, neboť ostatní části trolejového vedení mají stejnou hmotnost jako samotná trolej.

$$F_v = 2 \cdot \frac{l \cdot S \cdot \rho}{n} g \quad (4)$$

Dosazením hodnot získáme velikost síly působící na vrchol výložníku. Tuto sílu pak rozložíme na složky rovnoběžné s rameny výložníku (obrázek 23).

$$F_v = \frac{2}{17} \cdot 1000 \text{ m} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 8960 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 1034 \text{ N}$$

Pak je velikost síly  $F_{\text{tah}}$  působící na horní rameno výložníku v tahu a síly  $F_{\text{tlak}}$  působící na spodní rameno v tlaku:  $F_{\text{tah}} = \frac{F_v}{\text{tg}\alpha}$  a  $F_{\text{tlak}} = \frac{F_v}{\text{sin}\alpha}$ . Dosazením úhlu  $\alpha$  dopočítáme hledané síly.

$$F_{\text{tah}} = \frac{1034 \text{ N}}{\text{tg}(30^\circ)} = 1790 \text{ N}, \quad F_{\text{tlak}} = \frac{1034 \text{ N}}{\text{sin}(30^\circ)} = 2068 \text{ N}$$

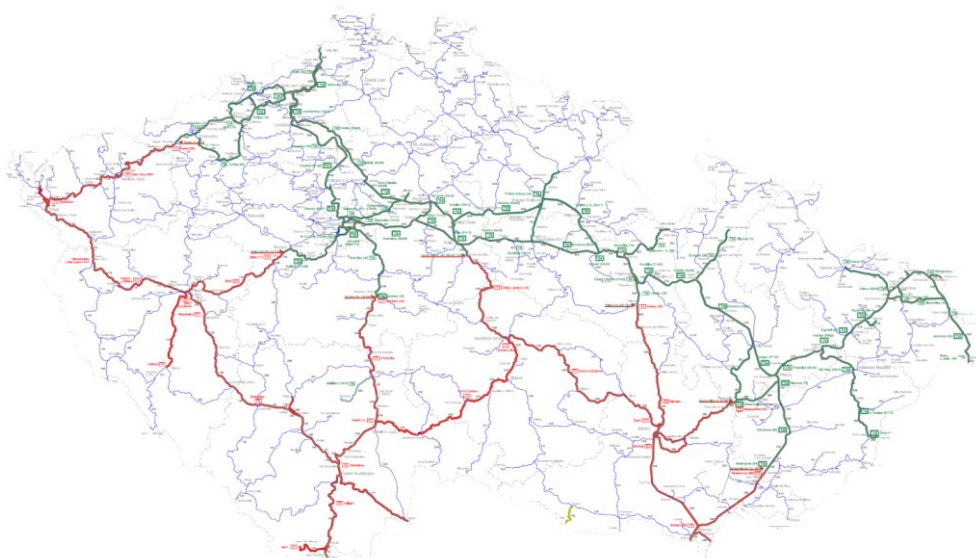
**Na výložník působí trolej silou v tahu o velikosti 1790 N a v tlaku o velikosti 2068 N.**

## 2 Elektrina a magnetismus na železnici

Elektrické a magnetické jevy se v železniční technice uplatňují v mnoha a mnoha technických řešeních. Pro laika nejviditelnější (už jen z důvodu rozměru) a nejprůchočejší použití elektřiny je elektrizace železničních tratí. Většina cestujících, kteří čekají na elektrický vlak si asi všimne „drátů“ nad kolejemi, a že ty „dráty“ jsou přichyceny k různým stožárům a po „drátech“ se smýká sběrač lokomotivy. Zajímavé a pro studenty poučné je ale podívat se (myšleno doslova na nádraží) na to všechno podrobněji a zamyslet se nad tím, jak to celé funguje. Na některé otázky jsme odpověděli už v kapitole 1.4: proč je nad kolejemi těch „drátů“ tolik a že nestačí jeden, nebo proč jsou v některých místech dráty přerušené a jak může vlak přes tato místa přejíždět. Ale můžeme se ptát dále. Jak je to celé napájené a čím? Proč vlastně skrz lokomotivu teče proud, co ho k tomu nutí? Prohlédneme-li si nádraží skutečně otevřenýma očima, může nás podobných otázek napadnout celá řada. Odpovědi na některé z nich nám opět může poskytnout středoškolská fyzika.

### 2.1 Elektrické napětí

Začneme poslední otázkou. Základní podmínkou existence tekoucího elektrického proudu je elektrické napětí. V ČR (a v bývalém Československu) máme dva základní napěťové systémy.



Obrázek 24: Železniční mapa ČR. Na mapě je červenou barvou vyznačena střídavá soustava 25 kV, 50 Hz, zelenou barvou stejnosměrná soustava 3 kV, žlutou střídavá soustava 15 kV, 16,7 Hz a šedivou stejnosměrná soustava 1,5 kV. [11]

V jižní a západní části země je využíváno střídavého napětí 25 kV s frekvencí 50 Hz a v severovýchodní části pak napětí stejnosměrného 3 kV. Na dvou krátkých úsecích existují ještě dvě jiné soustavy a to stejnosměrná 1,5 kV (úsek Tábor – Bechyně) a střídavá 15 kV s frekvencí 16,7 Hz (trať ze Znojma do Rakouska).

Než jednotlivé systémy rozebereme, bylo by dobré poukázat, v jaké části, tedy mezi jakými prvky, můžeme vůbec napětí změřit. Víme totiž, že napětí měříme právě mezi dvěma místy. Jak je to tedy s železnicí, kde máme jen jeden trolejový drát? Nyní už víme, že přes tu na první pohled změř mnoha drátů se sběrač lokomotivy dotýká opravdu jen jednoho vodiče. Uvedené napětí je tak mezi trolejovým vedením (trolej, jež reprezentuje fázový vodič na střídavém systému, resp. plus pól stejnosměrného systému) a zpětným vedením, kterým jsou kolejnice. Ty jsou následně vodivě připojeny k nejbližší napájecí stanici a uzemněny. Dodejme, že stejného principu (avšak jiného napětí) využívá i tramvajová doprava. U trolejbusů je to ovšem jinak. Z důvodu, že trolejbusy nejezdí po vodivých kolejkách, jsou v trakčním vedení použity dvě troleje. Dané napětí je pak právě mezi nimi.



*Obrázek 25: Srovnání jedno- a dvouvodičové troleje [12]. Vlevo na obrázku je tramvaj, která využívá napětí mezi trolejí a kolejkami stejně jako je to u železniční dopravy. Vpravo je trolejbusová trolej, napětí je pak mezi oběma trolejemi.*

Pokud bychom se měli odkázat na nějaký jev, který nám potvrdí, že mezi trolejí a kolejnicemi napětí skutečně je, můžeme pozorovat výboje, které vznikají při „spojování“ sběrače lokomotivy s trolejí. Tedy v momentě, kdy se sběrač při zdvihání přibližuje k trolejovému drátu. Nejlépe je tento jev možné pozorovat při velmi vlhkém vzduchu. Lokomotiva stojí na uzemněných kolejích a její sběrač se přibližuje k vodiči s potenciálem 3 kV na stejnosměrném systému, resp. 25 kV na střídavém systému. Dochází k elektrickému průrazu vzduchu<sup>6</sup> a mezi trolejí a sběračem vzniká obloukový výboj, který je doprovázen prasknutím (často je možné slyšet právě jen malou ránu). K výbojům nemusí docházet jen při zvedání pantografu, ale také při samotné jízdě vlaku, zejména během zimních mrazivých rán. Tím, jak jsou troleje namrzlé, má sběrač problém se v různých místech vodiče dotknout, a dochází tak k jeho odsakování od troleje. Nejlépe je tento efekt pozorovatelný ráno, kdy je větší zima a troleje ještě nejsou zbavené námrazy (teplem nebo obroušením od sběračů předchozích vlaků).

Na nádražích i na některých místech podél trati můžeme vidět i takové prvky, které mají zabraňovat nechtěným napěťovým špičkám – tedy bleskojistky. Tzv. růžkové bleskojistky jsou ochranná zařízení tvořená ze dvou elektrod. Jedna je připojena k troleji a druhá uzemněna. Tyto dva vodiče jsou ve spodní části u sebe blízko a směrem nahoru se oddalují (obrázek 26). Nejmenší vzdálenost mezi oběma elektrodami je taková, že při běžném napětí sítě výboj nenastane (u střídavého je tedy vzdálenost větší, jelikož je zde větší napětí než u stejnosměrného (závisí ovšem také na průraznosti vzduchu<sup>7</sup>)). Na stejnosměrném systému se tato vzdálenost nastavuje dle normy [13] na  $(10 \pm 1)$  mm a na střídavém  $(120 \pm 1)$  mm. Pravděpodobnost, že na bleskojistkách výboj doopravdy uvidíme, je velmi malá. Mají ale velmi důležitou

---

<sup>6</sup> Dielektrická pevnost, chcete-li průraznost,  $E_p$  suchého vzduchu se udává jako  $3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  [7]. Pokud bychom tedy chtěli určit vzdálenost  $l$ , na kterou k výboji mezi trolejí a sběračem dojde, tak dosazením průraznosti do vzorce  $lE_p = U_z$ , kde  $U_z$  je zápalné (průrazné) napětí, v našem případě 3 kV, resp. 25 kV, dostaneme vzdálenost 1 mm, resp. 8 mm. Je ovšem třeba si uvědomit, že 25 kV je efektivní hodnota střídavého napětí, pro maximální hodnotu napětí  $U_{max} = \sqrt{2}U_{ef}$  je vzdálenost asi 12 mm. Tato hodnota je pouze teoretická a odpovídá prostředí se zcela suchým vzduchem. Ve skutečnosti je vzdálenost vzhledem k vlhkosti větší a může se pohybovat v řádech cm až desítek cm. Pohybovat se v blízkosti trolejí proto může být velmi nebezpečné.

<sup>7</sup> Podle výpočtu v poznámce <sup>6</sup> musí být vzdálenost elektrod určitě větší než 1 mm na stejnosměrné soustavě a větší než 12 mm na střídavé.

funkci. Toto zařízení chrání soustavu před různými druhy přepětí vzniklými zejména při úderu blesku. V momentě úderu vznikne v nejužším místě bleskojistky výboj, který postupuje nahoru až zhasne. Tím se náboj z blesku dostane bezpečně do země.



*Obrázek 26: Růžková bleskojistka na stejnosměrném systému. Levá část je připojena k troleji, pravá přes stožár uzemněna. Oba růžky jsou odděleny izolátorem.*

## 2.2 Napájení elektrizovaných tratí

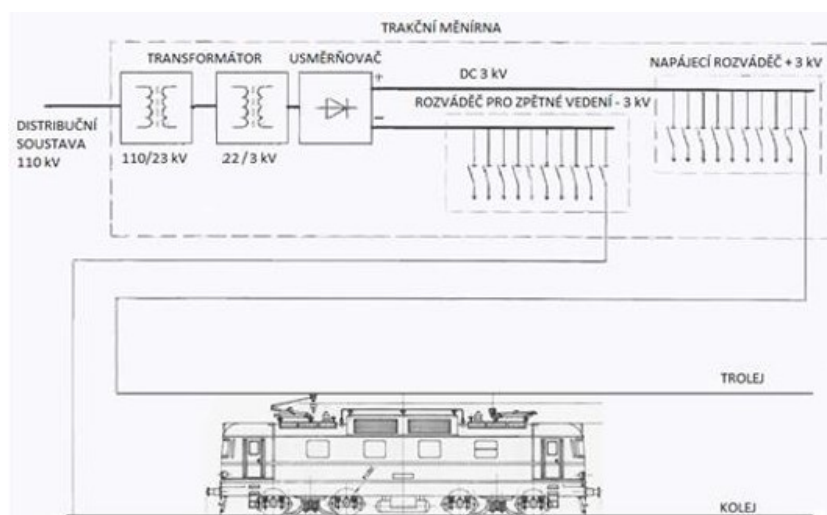
Odkud se ale napětí, ať už stejnosměrné nebo střídavé, v trakčním vedení bere? Napájení trakční sítě je zajišťováno pomocí trakčních napájecích stanic (TNS), které upravují elektrickou energii z distribuční sítě 110 kV nebo 22 kV na požadovanou hodnotu stejnosměrného (nejčastěji 3 kV) nebo střídavého napájení (25 kV). V případě stejnosměrného systému se napájecím stanicím říká trakční měnirny (TM) a v případě střídavého jde o trakční transformovny (TT).

### 2.2.1 Stejnosměrný systém 3 kV

V ČR se tato soustava vyvinula ze stejnosměrné soustavy 1,5 kV, kterou byla započata elektrizace československých železnic ve 20. letech 20. století. Došlo však k zatrolejování pouze několika nádraží v centru Prahy a krátkých úseků mezi nimi. Po druhé světové válce bylo rozhodnuto nadále elektrizovat naše železnice zvýšeným

napětím 3 kV, které oproti 1,5 kV umožňuje vyšší výkonové zatížení<sup>8</sup>. Kvůli relativně nízkému napětí je vedení zatíženo vysokými trakčními proudy, řádově 1000 A, a s tím způsobenými velikými úbytky napětí<sup>9</sup> na trolejovém drátu.

Jak již bylo řečeno, k napájení této soustavy se používají trakční měniřny. Schéma zapojení takovéto TM v železniční dopravě je zobrazeno na obrázku 27.



Obrázek 27: Schéma TM a zapojení soustavy. [14]

TM je připojena k distribuční soustavě 110 kV a v ní pak dochází na transformátorech k transformaci dolů a k následnému usměrnění na požadovaný stav. Proud se tedy „mění“ ze střídavého na stejnosměrný – odtud název trakční měniřna. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.1. a jak je na obrázku vyznačeno, trolej

<sup>8</sup> Pro elektrický výkon platí vztah  $P = UI$ . výkon je tedy přímo úměrný napětí  $U$  na spotřebiči a zároveň proudu  $I$  jím procházejícímu. Pro konkrétní výkon nutný pro provoz vlaku (typicky řádově jednotky MW) je tedy při nižším napětí potřebný vyšší tekoucí proud. Ze vztahu vidíme, že pro výkon řádově v MW a napětí v kV dostaneme proud řádově 1000 A.

<sup>9</sup> Napětí  $U$  na spotřebiči závisí podle Ohmova zákona na tekoucím proudu  $I$  a daném odporu  $R$  spotřebiče. Zmíněný vztah má tvar  $U = IR$ . Hodnotu napětí tak můžeme naměřit na něčem, čím protéká proud a co má vlastní odpor, tedy i na samotném trolejovém drátu. Uvažujme, že je trolejový drát tvořen převážně mědí, jejíž rezistivita  $\rho$  (měrný elektrický odpor) je přibližně  $18 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ , a proud protéká samotným trolejovým drátem o průměru  $150 \text{ mm}^2$  a nosným lanem s průměrem  $120 \text{ mm}^2$  [2]. Použitím vzorce  $U_U = \rho \frac{l}{S} I$  pro výpočet úbytku napětí dostaneme pro proud 1000 A na 1 km spád potenciálu přibližně o 67 V. To je vzhledem k „normovanému“ napětí 3 kV nezanedbatelné.



reprezentuje plus pól a kolejnice mínus pól. Lokomotiva stojící na kolejích dotýkající se pomocí sběrače troleje je tak pod napětím a může odebírat proud potřebný k jízdě.

Pro tuto soustavu je typické dvoustranné napájení traťových úseků. V praxi to znamená, že jeden úsek je napájen z obou konců, tedy že TM jsou umístěny na obou koncích jednoho úseku. Každá měnirna však napájí dva přilehlé úseky, které jsou mezi sebou odděleny (jeden úsek je napájen dvěma různými TM a jedna TM napájí dva různé úseky).

Běžná vzdálenost mezi napájecími stanicemi se pohybuje do 20 km<sup>10</sup>. Skutečná TM je zachycena na obrázku 28.



*Obrázek 28: Trakční měnirna Zahradní Město v Praze.*

Sousední traťové úseky jsou od sebe odděleny tzv. úsekovými děliči (jejich funkce je popsána v podkapitole 2.5.1). Zejména z provozních důvodů jako je například údržba jsou děliče i na jiných místech napájeného úseku společně s úsekovými odpojovači (více v kap. 2.5).

Nutnost krátkých vzdáleností mezi TM a většího průřezu vodiče (přibližně 150 mm<sup>2</sup>, nosné lano pak 120 mm<sup>2</sup> [15]), který je potřeba právě kvůli vysokým

---

<sup>10</sup> Pokud se odkážeme na <sup>9</sup>, zjistíme, že je úbytek napětí po 15 km asi 1 kV. Z toho důvodu je nutné oboustranné napájení z TM, jež jsou v relativně blízkých vzdálenostech, aby nebyly úbytky napětí tak markantní. Daná vzdálenost pak také závisí na sklonu a křivosti trati, při nichž je potřebný vyšší výkon, tím pak vyšší napětí.

proudům<sup>11</sup>, a s tím související vysoké ztráty na vedení<sup>12</sup> se řadí mezi největší negativa tohoto systému. Naopak za největší výhodu dvoustranného napájení úseků se považuje rovnoměrné zatěžování TM a rozvodné sítě. V současné době se však při rekonstrukcích tratí projevuje snaha přechodu z DC (stejnosemného<sup>13</sup>) na AC (střídavý<sup>14</sup>) systém, který se zdá jako daleko efektivnější.

## 2.2.2 Střídavý systém 25 kV, 50 Hz

Během 20. let minulého století se v Evropě také začala rozvíjet a prosazovat střídavá napěťová soustava, která přinesla do napájení železnice spoustu výhod převažujících nad jejími negativy.

K napájení střídavým napětím se používá trakční transformovna, jejíž schéma je znázorněno na obrázku 29. TT je oproti TM (potřebné k napájení stejnosměrného systému) jednodušší v tom, že odpadá nutnost usměrňování a „pouze“ dochází k transformaci z vedení 110 kV na 25 kV<sup>15</sup> (frekvence 50 Hz zůstává stejná). Další výhodou je vyšší výkonové zatížení způsobené daleko vyšším napětím. Přitom ve srovnání se stejnosměrnou soustavou jsou proudy v řádech „pouhých“ stovek ampér. Tím jsou způsobeny daleko menší ztráty a zároveň o dost menší průřez trolejového vodiče (přibližně 100 mm<sup>2</sup> pro trolejový drát a 50 mm<sup>2</sup> pro nosné lano [16]), se kterým pak souvisí i menší náklady potřebné na konstrukci vedení (nižší hmotnost troleje).

---

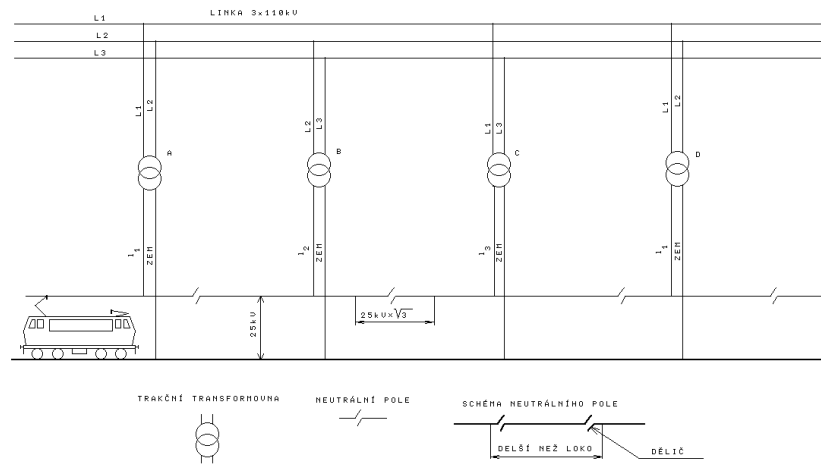
<sup>11</sup> Pro odpor vodiče délky  $l$  a ploše průřezu  $S$  platí  $R = \rho \frac{l}{S}$ .  $\rho$  je měrný elektrický odpor materiálu vodiče (materiálová konstanta). Každý vodič se při průchodu proudem zahřívá a navíc dochází ke spádu napětí podél vodiče; oba nežádoucí jevy jsou tím výraznější, čím vyšší odpor vodič má. Odpor vodiče dané délky tedy můžeme snížit zvětšením plochy jeho průřezu.

<sup>12</sup> Přenášený výkon se vlivem ztrát na vedení snižuje o hodnotu  $P = I^2 R$ , kde  $R$  je odpor ve vodičích. Pokud tedy přenos uskutečníme při nižším napětí, poteče daleko větší proud, a budou tak i větší ztráty a naopak.

<sup>13</sup> DC se používá pro označení stejnosměrného proudu podle anglického spojení „direct current“.

<sup>14</sup> AC se pak používá analogicky pro střídavý proud dle anglického „alternating current“

<sup>15</sup> Nutno dodat, že tato hodnota odpovídá efektivní hodnotě střídavého napětí (nikoliv maximální) a také že na výstupu z TT se tato hodnota pohybuje kolem 27 kV [17].



Obrázek 29: Schéma TT a zapojení soustavy [16].

Střídavá soustava používaná na železnici (nejen) v ČR je jednofázová. Požadovaný příkon pro TT je odebírán vždy ze dvou fází celostátní třífázové rozvodné soustavy. Na potřebnou hodnotu napětí 25 kV se tedy transformuje napětí mezi dvěma fázemi (na obrázku 29 jsou fáze označeny obvyklým způsobem  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ). Na transformátorech tedy dochází k transformaci dolů. Z transformátoru vychází napětí, které je mezi trolejí, jež reprezentuje fáze (na obrázku 29 jsou označeny jako  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ), a kolejí, která je uzemněna. Jelikož není žádoucí zatěžovat stále dvě stejné fáze, napájejí se různé traťové úseky z různých dvojic fází. Tím dochází k lepšímu rozložení zátěže na distribuční síti.



*Obrázek 30: Trakční transformovna nedaleko stanice Chotoviny. Mezi čtyřmi stožáry, jež jsou blízko u sebe, jsou troleje napájeny přívodními vodiči. Na stožárech se pak nachází odpojovače (podkapitola 2.5.1).*

Oproti stejnosměrnému systému jsou dané úseky napájeny pouze z jedné TT nikoliv ze dvou. Toto zapojení transformoven se často označuje jako paprskové. Na obrázku 29 jsou sousedící úseky odděleny tzv. neutrálními poli a jak je patrné, TT napájí každou část uprostřed, aby docházelo k co nejmenšímu spádu napětí a bylo maximální hodnoty napětí využito co nejvíce. Proč to ale není u obou systémů stejné? V kapitole 2.5.3 je následně popsáno, jak tato styková místa sousedních úseků vypadají a jaká je jejich funkce. Díky většímu napětí jsou pak jednotlivé TT od sebe vzdáleny v rozmezí 40 až 60 km (opět záleží na sklonu tratě apod.). I přes tyto vzdálenosti, jsou úbytky napětí na vedení daleko menší než u stejnosměrné soustavy<sup>16</sup>. Na obrázku 30 je možné vidět reálnou transformovnu v provozu.

---

<sup>16</sup> Použijeme-li opět vztah pro výpočet úbytku napětí  $U_U = \rho \frac{l}{S} I$  a dosadíme hodnoty pro proud 100 A, vzdálenost 1 km, celkový průřez vodiče 150 mm<sup>2</sup> (tedy trolej a nosné lano) a rezistivitu 18 nΩ · m, dostaneme úbytek zhruba 12 V. Pokud napájíme úsek dlouhý 50 km ze středu, je úbytek napětí na začátku a na konci 0,3 kV.

### Příklad 6 – Úbytek napětí

Lokomotiva řady 363 (dříve ES 499.1 ČSD) o výkonu 3480 kW [18] na stejnosměrné síti je vzdálena 15 km od trakční měřírny (stejnosměrný systém) a jede na plný výkon. Odpor trolejového vedení je 84 mΩ/km. Jaké napětí bude mezi trolejí a kolejí v místě lokomotivy? (Uvažujme jednostranné napájení úseku)

---

Řešení:  $U = 3 \text{ kV}$ ;  $P = 3480 \text{ kW}$ ;  $R_{V/km} = 84 \text{ m}\Omega/\text{km}$  (odpor vedení na 1 km);  $L = 15 \text{ km}$

*Pomocí vztahu pro výpočet výkonu určíme velikost proudu, kterou lokomotiva ze soustavy odebírá:  $I = \frac{P}{U}$ .*

$$I = \frac{3480000 \text{ W}}{3000 \text{ V}} = 1160 \text{ A}$$

*Lokomotiva odebírá na stejnosměrném systému proud 1160 A.*

*Úbytek napětí na vedení pak určíme pomocí vztahu:*

$$U_U = R_{V/km} \cdot I \cdot L,$$

*kde  $L$  je vzdálenost od TM v kilometrech.*

$$U_U = 84 \cdot \frac{10^{-3} \Omega}{\text{km}} \cdot 1160 \text{ A} \cdot 15 \text{ km} = 1461 \text{ V}$$

*Napětí mezi trolejí a kolejemi v místě lokomotivy je tedy zhruba o 1,5 kV menší než u trakční měřírny. Hodnota poklesu napětí bude ve skutečnosti ještě o něco větší, protože proud tekoucí trolejí je dán příkonem lokomotivy.*

$$U_C = 3 \text{ kV} - 1,5 \text{ kV} = 1,5 \text{ kV}$$

***Napětí mezi trolejí a kolejemi je v místě lokomotivy 1,5 kV.***<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Z výpočtu je mimo jiné patrné, že není možné napájet lokomotivu 15 km od TM jen z jedné měřírny. Je tedy nutné oboustranné napájení. Dle normy jsou hodnoty definovány maximálně 3,9 kV a minimálně 2 kV [14].

### 2.3 Izolování a ochrana před napětím

Nyní už tedy víme, že je na železnici, myšleno mezi trolejí a kolejemi, značně vysoké napětí. Zároveň ale tečou trolejí proudy řádově v tisících ampér. Jak je tedy docíleno toho, že elektrický proud jednoduše „nesteče“ po stožáru do země? Jak je možné, že v troleji „drží“, když si každý pravidelný cestující vlaku všimne toho, že jsou stožáry, ke kterým jsou troleje přichyceny, často z kovu? Řešení je ovšem jednoduché. Stačí, aby trolej byla od stožárů něčím izolována. Nejčastěji se používají izolátory z keramiky nebo z pogumovaného nylonu. Izolátor (na jednom stožáru se jich vyskytuje více, nejčastěji 2) je pak v trolejovém vedení umístěn mezi stožár a zařízení nesoucí samotnou trolej. Jedno z umístění izolátoru je vidět na obrázku 31.



*Obrázek 31: Izolátor na trolejovém vedení. Izolátor je tvořen nylonovým jádrem a gumovými prstenci, na nichž se neudrží souvislá vrstva vody.*

V kapitole 2.1. již bylo zmíněno, že napětí mezi trolejí a sběračem vyvolá výboj přibližně na vzdálenosti řádu mm (v závislosti na systému a okolních podmínkách). Tato vzdálenost je opravdu čistě teoretická a odpovídá zcela suchému vzduchu. Někoho by tedy mohlo napadnout, že pokud vyleze například na nákladní železniční vagón, nic se mu nestane, neboť se k troleji na 1 cm nepřiblíží. Opak je ale pravdou.

V dnešní době se i přes častá varování SŽ takoví jedinci objevují a následky jsou pak fatální. Proč tedy ale k průrazu dojde? Vzorce a vztahy, které často používáme, jsou většinou jen jednoduché přiblížení skutečnosti, při níž spoustu věcí zanedbáváme. Z rozložení náboje víme, že se největší potenciál nachází v ostrých hrotech a hranách. Člověk se dá za takovouto „nerovnost“ považovat poměrně snadno. Kvůli tomu pak k průrazu dojde i na vysokou vzdálenost. Samozřejmě se vzdálenost zvětšuje i s rostoucí vlhkostí, k níž i samotný člověk značně přispívá.

## 2.4 Trolejové vedení

V kapitole 1.2 jsme se zabývali mechanickou stránkou trolejí, v této kapitole se podíváme na jejich elektrické vlastnosti. Někoho by mohlo napadnout, že rozdíl mezi trolejemi na různých soustavách nebude žádný.

Pokud se na troleje ale podíváme detailněji, všimneme si, že se liší ve velikosti průřezu trolejového drátu a nosného lana. Srovnání obou trolejí ukazuje obrázek 32. Různost průřezů trolejí na obou soustavách má důležité opodstatnění.



Obrázek 32: Průřezy trolejí a nosných lan [19]. Vlevo nosné lano s průřezem  $120 \text{ mm}^2$  nese trolej s průřezem  $150 \text{ mm}^2$ . Vpravo nosné lano s průřezem  $50 \text{ mm}^2$  a trolej s průřezem  $100 \text{ mm}^2$ .

Odpor vodiče závisí nepřímo úměrně na jeho průřezu<sup>18</sup>. S rostoucím napětím se zmenšuje proud potřebný pro přenesení daného výkonu, a můžeme si tedy dovolit i vodič s větším odporem, tj. menším průřezem. Na obrázku tedy umíme snadno určit, jaká trolej náleží jakému systému. Na levé straně obrázku 32 se nachází soustava pro stejnosměrné a na pravé straně pro střídavé napětí.

Bylo by tedy nasnadě vyrábět trolejové dráty co nejsilnější, aby se odpor co nejvíce snížil. Silnější drát má ale tím pádem větší hmotnost, a hůře se proto takový drát zavěšuje tak, aby byl co nejméně prověšen. Zároveň se tím násobně zvyšují náklady na jeho vytvoření. Z mechanického hlediska je nosné lano v konstrukci potřebné (viz kapitola 1.2) a zároveň je z hlediska odporu jeho přítomnost výhodou. Právě tímto nosným lanem se celkový průřez vodiče zvětšuje (nosné lano je napřímo vodič spojeno s trolejovým drátem) a samotný trolejový drát pak může být v průřezu menší. Nejen touto metodou je průřez vodiče zvětšován za cílem snížení odporu. Na železniční síti, nejčastěji však u stejnosměrného systému, kde je potřeba většího průřezu, můžeme vidět nejen trolejové vedení, ale i tzv. přídatné vedení.



*Obrázek 33: Přídatné vedení – na pravé straně stožáru vidíme malou konzoli, která přidržuje jednovodičové přídatné vedení. Při bližším pohledu je vidět mezi stožáry vodič, který spojuje přídatné vedení s trolejí.*

---

<sup>18</sup> Jednoduše patrné ze vztahu  $R = \rho \frac{l}{S}$ .  $S$  je plocha průřezu vodiče,  $l$  jeho délka a  $\rho$  měrný elektrický odpor materiálu vodiče.



Přídavné vedení je nejčastěji připevněno přes izolátory buď na břevno mezi stožáry nad každou kolejí nebo na samostatnou konzoli na každém stožáru (viz obrázek 33). Tedy každá trolej má své přídavné vedení, jenž je s touto trolejí vodivě spojeno po pravidelných vzdálenostech. Je-li toto zesilovací vedení nutné (například u tratí s častým sklonem nebo na velmi vytížených tratích) je jeho průřez  $120 \text{ mm}^2$  u AC soustavy a  $120 \text{ mm}^2$  nebo  $240 \text{ mm}^2$  u DC soustavy [15]. Místo jednoho drátu lze také použít svazek více vodičů.

## 2.5 Traťové úseky

Celá elektrizovaná železniční síť se skládá z menších úseků, které jsou zvlášť napájeny buď dvěma TM, nebo jednou TT, přičemž úseky na stejnosměrné soustavě jsou z důvodu menšího napětí a vyšších proudů dlouhé do přibližně 20 km. Úseky střídavého systému jsou pak obvykle do 60 km. Těmto úsekům říkáme traťové úseky. Ani tyto části však netvoří jeden dlouhý (vodivě) nepřerušovaný úsek. Jednotlivé úseky jsou rozděleny na daleko menší části z praktických důvodů. Nebylo by vhodné (i z ekonomického hlediska), aby byla kvůli potřebné údržbě nebo lokální poruše odpojena od napětí celý napájený úsek dlouhý desítky kilometrů. Při potřebě dojde k odpojení pouze konkrétní části, během něhož je zbytek sítě nedotčen. Typicky jsou od sebe vodivě odděleny jednotlivé koleje, úseky mezi dvěma stanicemi, popřípadě i koleje v dané stanici.

### 2.5.1 Úsekové děliče

Jednotlivé části traťových úseků jsou od sebe odděleny tím, že je trolej vodivě rozdělena tzv. úsekovým děličem. Na obrázku 34 vidíme, že je trolejový drát v místě děliče přerušen izolační tyčí. Nosné lano, jež je vodivě spojeno s trolejovým vodičem, je z toho důvodu také přerušeno izolátorem (používaným při izolaci stožárů) nebo podobnou izolační tyčí. Dále je vidět, že po stranách spodní izolační tyče jsou vodiče podobné bleskojistkám. Mají zde také podobnou funkci. Případný výboj mezi nimi je na různých zhášen. Takovýto úsekový dělič se projíždí se zvednutým sběračem. I z toho důvodu je místo přerušení vodičů (po stranách izolační tyče) na různých místech. Je tím tak docíleno toho, že sběrač přejede dělič bez přerušení a lokomotiva (popř. elektrická jednotka) odebírá proud nepřetržitě. Na obrázku 35 je novější typ

úsekového děliče. Trolejový drát se „rozdvíjí“ a je přerušen dvěma izolačními částmi, které jsou opět v různých vzdálenostech od konců děliče. Sběrač tedy projede dělič bez přerušení kontaktu.



*Obrázek 34: Úsekový dělič.*



*Obrázek 35: Úsekový dělič novějšího typu.*



*Obrázek 36: Vlak projíždějící pod děličem se zvednutým sběračem na Hlavním nádraží v Praze.*

### 2.5.2 Úsekové odpojovače

Trat'ové úseky jsou sice vodivě přerušeny na několika místech úsekovými děliči, každá část je ale připojena k napětí a protéká jimi proud. Jak je to možné, když se na daném úseku nevyskytuje napájecí stanice? Zní to jako protimluv, ale tyto úseky jsou vlastně zároveň propojeny. Jsou propojeny tzv. úsekovými odpojovači, které v normálním/sepnutém stavu dané úseky vodivě spojují. Ke každému úsekovému děliči náleží tedy jeden úsekový odpojovač. Na každém elektrifikovaném nádraží si můžeme těchto odpojovačů všimnout a také toho, že se odpojovač ovládá pomocí páky s táhlem. Na nově zmodernizovaných tratích se v dnešní době uplatňují i odpojovače, jež se ovládají dálkově. Obrázek 37 ukazuje úsekový odpojovač v sepnutém stavu. Na odpojovači se nacházejí tři izolátory. Na dva z nich jsou připojeny vodiče, které spojují dva trolejové úseky. Na prostředním z nich je pak spínač, díky němuž jsou úseky spojeny vodivě. Zatažením za páku, a tedy i za tyč vedoucí k prostřednímu z izolátorů, dojde k vychýlení a následnému rozpojení obou částí. Případný elektrický oblouk je opět zhášen na různých.



*Obrázek 37: Úsekový odpojovač na Hlavním nádraží v Praze. Zprava je k odpojovači přiveden vodič spojený s trolejí před děličem, vodivě je propojen s odklápěcí částí děliče, ta pak vodivě s levou stranou. Z této části je pak vyveden vodič připojený k troleji za děličem.*

### 2.5.3 Neutrální pole

Na obrázku 29, kde je schéma TT, je zmínka o tzv. neutrálních polích, nacházejících se mezi dvěma traťovými úseky střídavé soustavy. Neutrální pole, jak název napovídá, je část troleje izolována od napětí, a touto částí tedy neteče žádný proud. Tato část bývá zpravidla ohraničena dvěma děliči nebo izolačními tyčemi (obrázek 38), mezi nimiž je neuzemněná trolej. Proč je ale mezi dva úseky toho systému právě tato část vložena, když u stejnosměrné soustavy žádnou takovou část nenajdeme? Důvodem je právě využívání dvou různých fází na různých TT. Jejich prostřídáním dochází k fázovému posunu mezi napětími na jednotlivých úsecích, tudíž tyto úseky jsou na různém potenciálu. Kvůli tomu je tedy nutné sousední úseky od sebe elektricky oddělit. Pokud bychom tyto dva úseky spojili, došlo by k mezifázovému zkratu. Někdo by ale mohl namítnout, že dva úseky na DC soustavě jsou také vodivě odděleny a že přitom děliče mohou být pojížděny se zvednutým sběračem, a tedy dochází (přes sběrač) k propojení obou úseků. Za normální situace však není potenciálový rozdíl mezi sousedními úseky na stejnosměrném systému vyšší než 500 V a takovýto spád potenciálu ještě nemá destruktivní účinky ani na lokomotivu ani na dělič. Na střídavém systému je však z důvodu fázového posunu

mezi oběma úseky mnohonásobně vyšší napětí<sup>19</sup>. Kdyby byl na střídavě napájené troleji pouze úsekový dělič jako na stejnosměrné a zvednutý sběrač oba úseky propojil, došlo by k mohutnému zkratu a poškození trolejového vedení i lokomotivy. Stačilo by tedy, aby strojvedoucí sběrač stáhl. Z bezpečnostních důvodů tomu tak ale není (strojvedoucí může zapomenout apod.). I proto je mezi částí vloženo neutrální pole.



*Obrázek 38: Izolační tyče na dvoukolejné trati.*



*Obrázek 39: Průjezd vlaku pod neutrálním polem se staženým sběračem.*

---

<sup>19</sup> Tomuto napětí mezi dvěma fázemi se říká sružené napětí. Jeho hodnota je dána vztahem  $U_S = \sqrt{3} \cdot U_L$ , kde  $U_L$  je hodnota napětí na jedné fázi. Po dosazení fázového napětí na střídavém systému, tedy 25 kV, dostaneme hodnotu sruženého napětí mezi dvěma traťovými úseky zhruba 43 kV.

## Závěr

Cílem práce bylo poukázat na využití školské fyziky v železniční dopravě. Text popisuje jevy a technická zařízení, jež se dají využít při výuce fyziky. Dá se na ně během výkladu odkazovat jako na názorné příklady z praxe, které studenti často vyžadují.

Nejdříve jsem vytipoval nejdostupnější prvky a zařízení, které lze středoškolskou fyzikou popsat. Následně popisovaná zařízení fotograficky zdokumentoval na různých místech ČR, přičemž jsem během práce zjišťoval, že je nutné některé obrázky vylepšit. V práci je tedy popsáno jen to, co opravdu můžeme pozorovat vlastníma očima z veřejně přístupných míst, co lze vidět například na nádraží či zastávce nebo z okna při jízdě vlakem.

Text práce jsem se snažil psát tak, aby mohl být použit jako zdroj příkladů pro učitele fyziky, ale aby byl čtivý i pro studenty či méně poučené čtenáře. Obvykle v poznámkách pod čarou jsou uvedeny základní vzorce vztahující se k popisovanému, které by měly být pouhým připomenutím pro studenta gymnázia. Ti výše zmínění „méně poučení čtenáři“ si mohou ke čtení otevřít učebnici fyziky. Mojí snahou bylo především ukázat spojení středoškolského učiva fyziky s technickou praxí, na kterou se každý může podívat.

Příklady v práci jsou vymyšleny tak, aby co nejvíce odpovídaly realitě, ale zároveň v nich bylo použito nejvýše středoškolského (gymnaziálního) učiva fyziky.

## Seznam použité literatury

- [1] *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia* [online]. Praha: MŠMT, 2021. [cit. 15. 7. 2023]. Dostupné z <https://www.edu.cz/rvp-ramcove-vzdelavaci-programy/ramcove-vzdelavaci-programy-pro-gymnazia-rvp-g/>
- [2] *Železniční svršek, Díl X, Kolejové lože a jeho uspořádání*. Předpis SŽDC S3. Praha, 2008
- [3] Wikipedie, 2023. *Kolejnice* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. [cit. 11. 7. 2023] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kolejnice>
- [4] SVOBODOVÁ, Anežka. *Materiály a tvary kolejnic v kolejové dopravě* [online]. Brno, 2019 [cit. 24. 6. 2023] Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ing. Radovan Galas, Ph.D. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=193175](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193175)
- [5] *Upevnění na tratích s parním provozem* [online]. Správa Železnic. [cit. 25. 6. 2023] Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/o-nas/vse-o-sprave-zeleznice/zeleznice-cr/zajimavosti-z-vyvoje-zeleznicniho-svrsku/upevneni-na-tratich-s-parnim-provozem>
- [6] *Vývoj pružného upevnění* [online]. Správa Železnic. [cit. 25. 6. 2023] Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/o-nas/vse-o-sprave-zeleznice/zeleznice-cr/zajimavosti-z-vyvoje-zeleznicniho-svrsku/vyvoj-pruzneho-upevneni>
- [7] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce*. Praha: Prometheus, 2019. ISBN 978-80-7196-477-3
- [8] Wikipedie, 2023. *Trolejové vedení* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. [cit. 12. 7. 2023] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Trolejové\\_vedení](https://cs.wikipedia.org/wiki/Trolejové_vedení)

[9] *Trocha teorie o trakčním vedení* [online]. Moje TT. [cit. 27. 6. 2023] Dostupné z: <https://www.mojett.cz/38608>

[10] ŠIMEČKOVÁ, Milada, Ing. *Elektrovodná měď - ECu Hluboká nad Vltavou*, 2013 [cit. 14. 7. 2023]. Prezentace. Střední škola elektrotechnická, Centrum odborné přípravy, Zvolenovská 537, Hluboká nad Vltavou

[11] *Železniční síť České republiky* [online]. [cit. 14. 7. 2023] Dostupné z: [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)

[12] *Historický moment po 45 letech – zkušební jízda trolejbusu po Praze* [online]. Trolejbusy v Praze. [cit. 14. 7. 2023] Dostupné z: [http://www.trolejbusyvpraze.net/tb\\_udalosti\\_praha\\_10\\_10\\_2017.htm](http://www.trolejbusyvpraze.net/tb_udalosti_praha_10_10_2017.htm)

[13] ČSN 34 1500 *Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Předpisy pro elektrická trakční zařízení*. Praha, 2009. Třídící znak 341500

[14] SKÁLA, Pavel. *Analýza zpětné cesty elektrického napájení železničního trakčního vozidla*. [online]. Praha, 2017 [cit. 27. 2. 2023] Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. prof. Ing. Josef Tlustý CSc. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70088/F3-DP-2017-Skala-Pavel-%5BAnalyza%20zpetne%20cesty%20elektrickeho%20napajeni%20zeleznicniho%20trakcniho%20vozidla%5D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[15] *Technická specifikace. Trakční vedení soustav AC 25 kV 50 Hz a DC 3 kV pro rychlost do 200 km/h (včetně)*. 2. vydání [online]. Správa Železnic. 2020 [cit. 18. 6. 2023] Dostupné z: [https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/139626480/SZ\\_Technické+specifikace\\_TV\\_200\\_km\\_h\\_20200731.pdf/40de137c-7ff1-4a78-98db-a1ae10d572ec?version=1.0](https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/139626480/SZ_Technické+specifikace_TV_200_km_h_20200731.pdf/40de137c-7ff1-4a78-98db-a1ae10d572ec?version=1.0)



[16] K-report, český dopravní server [online]. [cit. 25. 5. 2023] Dostupné z:  
<https://www.k-report.net>

[17] BULÍN, Martin. *Ochrany pro trakční napájecí stanice pro systém 25 kV, 50 Hz* [online]. Plzeň, 2019 [cit. 18. 6. 2023] Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D. Dostupné z:  
[https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/39453/1/BP\\_BULIN.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/39453/1/BP_BULIN.pdf)

[18] GAŠPAŘÍK, Jozef, KOLÁŘ, Jiří. *Železniční doprava*. Dotisk 2021.  
Praha: GRADA, 2017. ISBN 978-80-271-0058-3

[19] Soukromý archiv T. Kekule

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Kolejové lože.</i>	4
<i>Obrázek 2: Betonové pražce.</i>	6
<i>Obrázek 3: Dřevěné pražce pod výhybkou.</i>	7
<i>Obrázek 4: Profil kolejnice.</i>	8
<i>Obrázek 5: Podkladnice upevněná k pražci.</i>	9
<i>Obrázek 6: Rozponové upevnění.</i>	9
<i>Obrázek 7: Pružné upevnění.</i>	10
<i>Obrázek 8: Kolejnicový styk na výhybce.</i>	11
<i>Obrázek 9: Svarový spoj.</i>	12
<i>Obrázek 10: Mostová konstrukce posazená na válcové ložisko.</i>	15
<i>Obrázek 11: Dilatační zařízení na železničním mostě v pražské Výtoni.</i>	16
<i>Obrázek 12: Okolek.</i>	17
<i>Obrázek 13: Rozklad výsledné síly působící na vlak v oblouku.</i>	18
<i>Obrázek 14: Rozklad sil.</i>	19
<i>Obrázek 15: Dvukolejná elektrifikovaná trať.</i>	21
<i>Obrázek 16: Sběrač lokomotivy (polopantograf).</i>	22
<i>Obrázek 17: Detail řetězovkového vedení.</i>	23
<i>Obrázek 18: Průřez trolejovým drátem.</i>	24
<i>Obrázek 19: Styk dvou napínaných úseků (bez nosného lana).</i>	25
<i>Obrázek 20: Kladkostroj.</i>	25
<i>Obrázek 21: Západkový naviják.</i>	26
<i>Obrázek 22: Klikatost troleje na rovném úseku.</i>	28
<i>Obrázek 23: Rozklad síly působící na výložník.</i>	29
<i>Obrázek 24: Železniční mapa ČR.</i>	31
<i>Obrázek 25: Srovnání jedno- a dvouvodičové troleje.</i>	32
<i>Obrázek 26: Růžková bleskojistka na stejnosměrném systému.</i>	34
<i>Obrázek 27: Schéma TM a zapojení soustavy.</i>	35
<i>Obrázek 28: Trakční měnična Zahradní Město v Praze.</i>	36
<i>Obrázek 29: Schéma TT a zapojení soustavy.</i>	38
<i>Obrázek 30: Trakční transformovna nedaleko stanice Chotoviny.</i>	39
<i>Obrázek 31: Izolátor na trolejovém vedení.</i>	41
<i>Obrázek 32: Průřezy trolejí a nosných lan.</i>	42

<i>Obrázek 33: Přídavné vedení.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 34: Úsekový dělič.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 35: Úsekový dělič novějšího typu. ....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 36: Vlak projíždějící pod děličem se zvednutým sběračem na Hlavním nádraží v Praze.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 37: Úsekový odpojovač na Hlavním nádraží v Praze.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 38: Izolační tyče na dvoukolejné trati. ....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 39: Průjezd vlaku pod neutrálním polem se staženým sběračem. ....</i>	<i>48</i>

## **Seznam použitých zkratek**

SŽ – Správa železnic

TNS – trakční napájecí stanice

TM – trakční měnírna

TT – trakční transformovna

DC – direct current

AC – alternating current