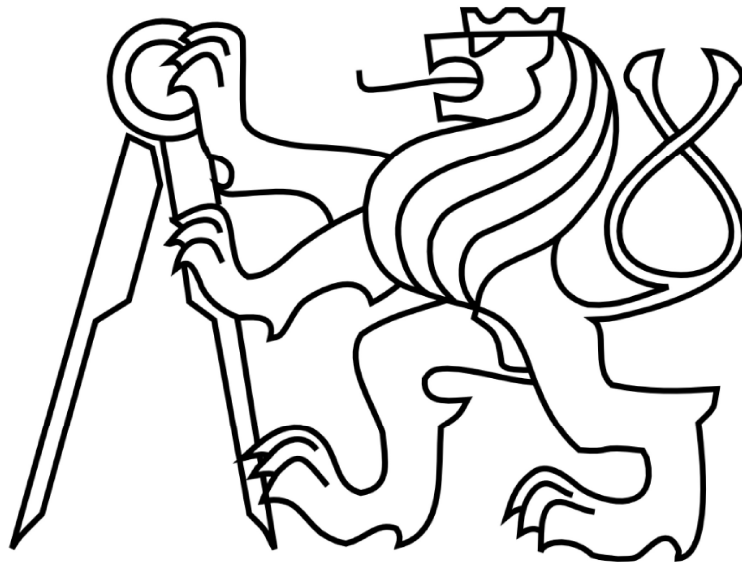


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

**12120 – ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ
A KOLEJOVÝCH VOZIDEL**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

STUDIE ŘEŠENÍ BRZDY PRO VOZY METRA

Radek Lhotan

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lhotan** Jméno: **Radek** Osobní číslo: **437745**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Studie řešení brzd pro vozy metra

Název bakalářské práce anglicky:

Brake design study for metro vehicles

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte:

1. Rešerši koncepce řešení brzd u soupravy metra M1 a současný stav techniky.
2. Základní návrhové blokové schéma pneumatické části brzd pro pětivozovou soupravu metra.
3. Stanovte základní technické parametry kotoučové brzdy.
4. Rozbor silových účinků působících při brzdění koutoučovou brzdou a dvojkolí.
5. Výpočet šroubového spoje brzdového koutoče s nábojem.
6. Průvodní technickou zprávou a sestavný výkres hnacího dvojkolí s brzdovým kotoučem.

Seznam doporučené literatury:

Odborné časopisy, firemní literatura, patentová literatura, normy.

Skripta ČVUT:

KOLÁŘ, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II,

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II - pojezd

MARUNA, Z., HOFFMANN, V., KOULA, J. KROUPOVÁ, Z.: Metodika konstruování kolejových vozidel - osobní a nákladní podvozky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


doc. Ing. Josef Kolář, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce:


doc. Ing. Josef Kolář, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci: „Studie řešení brzdy pro vozy metra“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Josefa Koláře, za konzultací u Ing. Michala Kuny a s použitím literatury, kterou uvádím na konci mé práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 13.6. 2018

.....

Radek Lhotan

Poděkování

Tímto děkuji panu doc. Josefu Kolářovi jakožto vedoucímu práce za odborné připomínky a velké množství konzultací. Děkuji také technickému oddělení firmy *DAKO-CZ, a.s.* za poskytnuté materiály a informace, ale především pak za získané vědomosti a znalosti týkající se oblasti elektropneumatických brzd. Děkuji panu Ing. Davidu Tichotovi za prohlídku pražského metra *M1* v depu Kačerov a poskytnuté materiály. Spolužákům Lukáši Hetfleischovi bych chtěl poděkovat za pořízení fotografií a Jiřímu Kadlecovi za technickou podporu v programu *Autodesk Autocad 2017*.

Nejvíce bych chtěl ale poděkovat své mamce za velkou trpělivost a za podporu ve studiu.

Anotační list

Jméno autora:	Radek Lhotan
Název práce:	Studie řešení brzdy pro vozy metra
Name of thesis:	Brake design study for metro vehicles
Akademický rok:	2017/2018
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojího inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	12 120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Kolář, CSc.
Konzultant:	Ing. Michal Kuna
Zadavatel tématu:	DAKO-CZ, a.s.
Rozsah práce:	Počet stran: 68 Počet obrázků: 38 Počet tabulek: 10 Počet příloh: 2
Klíčová slova:	Metro M1, metro Varšava, elektropneumatická brzda, kotoučová brzda, brzdění, brzdová jednotka, brzdový kotouč, řízení brzdy, elektropneumatický rozváděč
Keywords:	Underground, electropneumatic braking system, disc brake, braking, brake unit, brake disc, brake control unit, electropneumatic distributor

Anotace

Předmětem této práce je návrh kotoučové adhezní elektropneumatické brzdy pro vůz metra. Rešerše je zaměřena na srovnání dvou různých elektropneumatických brzdových systémů. Zde jsou popsány funkce jednotlivých komponent, stejně jako i různé typy brzdění. Na základě rešerše a zadaných a normovaných parametrů je proveden výpočet parametrů vozu metra a brzdy, načež je zvolen vhodný brzdový kotouč s brzdovou jednotkou. Kotoučová brzda je navržena tak, aby zastavila vůz metra v případě výpadku brzdy elektrodynamické. Další specifika brzdy jsou uvedena ve výpočtu.

Abstract

Design of mechanical adhesion electro-pneumatic disc brake for underground is the main subject (Pokud je hlavní. Pokud ne, smaž) of this bachelor thesis. The research is focused on a comparison of the two different types of electro-pneumatic brake systems. There are described base functions of several individual components and also the various types of underground braking. Based on research and given parameters which are based by norms, a carriage and brake parameters are calculated and the disc brake with brake unit is designed. Brake disc and unit must be able to stop the underground in a case of electro-dynamic brake failure from maximum operating speed. Specifics and details are presented in calculation.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Brzdový systém vozů SIEMENS M1	2
2.1	Rozdělení jednotlivých typů brzdy	3
3	Popis funkce elektropneumatické brzdy vozů M1	4
3.1	Zařízení pro dodávku a přípravu vzduchu	6
3.2	Řízení brzdy	13
3.2.1	Jízda	16
3.2.2	Provozní brzdění	16
3.2.3	Nouzové brzdění	18
3.2.4	Parkovací brzda.....	22
3.2.5	Zajišťovací brzda	22
3.3	Zařízení brzdy v podvozku.....	26
3.3.1	Kotoučová brzda	28
3.3.2	Výhody kotoučové brzdy.....	30
3.4	Protismykové zařízení	31
3.5	Vzduchové vypružení.....	31
4	Brzdový systém DAKO metra ŠKODA Varšava	36
4.1.1	Provozní brzdění	38
4.1.2	Provozní odbrzdění	41
4.1.3	Nouzové brzdění	41
4.1.4	Zajišťovací brzdění	42
4.1.5	Odbrdění zajišťovací brzdy.....	42
4.2	Třístupňový relé ventil DAKO DSV-3	45
4.3	Protismykové zařízení	46
4.4	Systém vypružení	47
5	Technické parametry brzdy	48
6	Výpočet brzdy.....	49
6.1	Úvod do problematiky výpočtu.....	49
6.2	Výpočet základních parametrů vozu.....	49
6.3	Výpočet brzdné dráhy	51
6.4	Výpočet potřebné brzdné síly.....	52
6.5	Kontrola součinitele meze adheze.....	52
6.6	Výpočet sil působících na brzdový kotouč a dvojkolí	53

6.7	Výpočet potřebného tlaku ve válci.....	58
7	Kontrola šroubů brzdového kotouče.....	60
7.1	Výpočet sil působících na šrouby	60
7.2	Výpočet potřebného utahovacího momentu.....	61
8	Závěr	62
9	Seznam použitých veličin	63
10	Seznam použité literatury	65
11	Seznam obrázků	66
12	Seznam tabulek	68
13	Seznam grafů	68
14	Seznam příloh	68

1 Úvod

Tato práce se zabývá návrhem mechanické třecí brzdy pro vůz metra. Jedná se o brzdou kotoučovou, kde navrhovanými součástmi bude brzdová kotoučová jednotka, brzdové obložení a brzdový kotouč. Brzda je řízena elektropneumaticky pomocí rozváděče a elektrické brzdové jednotky.

Pro pochopení základní problematiky funkce elektropneumatické brzdy je v souladu se zadáním BP provedena rešerše, která se zabývá porovnáním staršího a novějšího typu provedení. Pro toto porovnání byla jako zástupkyně staršího provedení vybrána souprava *SIEMENS MI* s brzdou *KNORR-BREMSE*. Novější techniku pak zastupuje *ŠKODA Transportation, a.s.* se soupravou Varšava, která disponuje brzdou *DAKO-CZ*.

V práci jsou vysvětleny základní předpoklady brzdění pomocí elektropneumatické kotoučové brzdy, rozebrány jednotlivé typy brzdění, které musí vůz metra zvládat a popsány některé důležité komponenty elektropneumatického obvodu. Zároveň je snaha vysvětlit, jak tyto komponenty fungují a jaký mají vliv na určitý typ brzdění. Větší pneumatické okruhy jsou přehledně uspořádány v blokových schématech, která ukazují, v jakých vozech jsou okruhy umístěny. V práci je dále vysvětleno, jak se liší jednotlivé typy brzdění (provozní, nouzové zajišťovací aj.) na obou typech vozů metra s odlišnými elektropneumatickými brzdovými systémy. Nakonec je navržena brzda (jen zmíněná mechanická část) pro obecný model vozu metra, který je závislý na parametrech, jež jsou od vozů požadovány normou a vypočten tlak k brzdění se 100 % obsazeností vozu. Jedním z výstupů práce pak je sestavný výkres dvojkolí s navrženým brzdovým kotoučem a brzdovou jednotkou.

Cílem práce je tedy návrh zmíněné kotoučové brzdy (brzdového kotouče a jednotky) pro vůz metra za pomoci vypočtených veličiny, jimž jsou potřebná brzdná síla a brzdný moment za dodržení součinitele adheze. Cílem je zastavení soupravy metra nouzovou elektropneumatickou brzdou při výpadku brzdy elektrodynamické z maximální provozní rychlosti pomocí těchto navržených komponent při zvolení vhodného brzděného tlaku.

Práce byla vyhotovena s podporou společnosti *DAKO-CZ, a.s.*, která poskytla odbornou konzultaci pro většinou část této práce.

2 Brzdový systém vozů SIEMENS M1

V devadesátých letech byla potřeba obměna souprav pražského metra a zastaralé vozy typu *Ečs* a vozy *81-71* sovětské výroby byly buď modernizovány firmou *ŠKODA Transportation, a.s.* nebo nahrazeny novými soupravami *M1 SIEMENS, s.r.o.*

Soupravy metra *M1* jsou tvořeny pěti vozy, které jsou rozmístěny v následujícím pořadí: *M1.1 + M1.2 + M1.3 + M1.2 + M1.1*. Jedna souprava tedy sestává ze tří druhů odlišných vozů. Čelní vozy *M1.1* jsou shodné, jejich hlavní odlišností od vozů *M1.2* a *M1.3* je především stanoviště řidiče, odkud je celý brzdový systém ovládán elektronicky. Odtud jsou posílány signály do elektronických řídicích jednotek *KBGM-P*, jimiž jsou vybaveny všechny vozy. Řídicí jednotka pak na každém z vozů ovládá pneumatický rozváděč *EP-BGE*, který reguluje přívod vzduchu do brzdových válců v podvozku. Každý vůz má svůj rozváděč. Vůz *M1.1* je na rozdíl od ostatních vozů dále vybaven dvojitým manometrem pro sledování tlaku v průběžném napájecím potrubí a v brzdových válcích a také tlakovým spínačem, který poskytuje signál pro elektronický řídicí systém vozu. Z dalších pneumatických okruhů lze zmínit obvod houkačky, obvod pro napojení automatického čelního spřáhla. Co se týče jiných než pneumatických komponent, jsou čelní vozy navíc vybaveny bateriemi a proudovými měniči, které obstarávají napájení pomocných pohonů, například osvětlení apod.

Vůz *M1.2*, tedy v pořadí druhý a čtvrtý vložený vůz, je jako jediný vybaven zařízením pro výrobu a přípravu tlakového vzduchu, které se skládá zejména z kompresoru s mezichladičem, z vysoušeče a filtrů. Vůz *M1.2* je vybaven jako *M1.1* elektronickou řídicí jednotkou, pneumatickým rozváděčem a zařízením brzd v podvozku. Vůz *M1.3*, který se nachází uprostřed soupravy, je shodný s vozem *M1.2*, avšak neobsahuje zařízení pro výrobu a přípravu tlakového vzduchu.

Pneumatický brzdový systém soupravy byl navržen a dodán firmou *KNORR-BREMSE*, která podobně jako *DAKO-CZ, a.s.* patří k předním dodavatelům brzd pro kolejová vozidla jak pro městskou dopravu, tak i pro železnici. Návrh brzdového systému počítá s maximální provozní rychlostí soupravy $v = 80 \text{ km/h}$, přičemž respektuje profily tratě linky metra v Praze.

[2] [3] [12]

2.1 Rozdělení jednotlivých typů brzdy

Metro je poháněno asynchronními elektromotory v podvozcích (jeden elektromotor na dvojkolí), a proto jako svou hlavní provozní brzdu používá brzdu elektrodynamickou. Ta funguje přepnutím elektromotorů do generátorového chodu. Souprava začne brzdít, načež posílá vyráběný proud zpět do sítě 750 V DC , kde je následně použit třeba jinou soupravou, která se právě rozjíždí ze stanice. Tento způsob rekuperace je u vozů metra obzvláště výhodný, jelikož na vedení je v jednu chvíli připojeno značné množství souprav, jež dělí poměrně malé vzdálenosti. V podstatě skoro vždy se tedy najde alespoň jedna souprava, která využije rekuperovanou energii jiné, brzdící soupravy, pro svůj rozjezd.

Elektrodynamická brzda je velmi účinná obzvláště ve vyšších rychlostech, avšak v menších rychlostech její brzdný účinek rychle klesá. Pro rychlosti nižší než přibližně $v = 4 \text{ km/h}$ je brzdný účinek už tak malý, že je elektrodynamická brzda vesměs nepoužitelná a brzdný účinek je potřeba vyvozovat jiným způsobem. Za tímto účelem je souprava *M1* vybavena elektropneumatickou brzdou, která zde zastává hned několik funkcí. Její primární funkcí je sloužit převážně jako tzv. brzda dobrzdňovací, kde opakovaně, tedy při každém příjezdu do stanice, pomáhá elektrodynamické brzdě zastavit soupravu. Elektropneumatická brzda pro metro *M1* je navržena tak, aby zvládala toto opakované zastavování v rozmezí rychlostí $v \leq 10 \text{ km/h}$.

Další funkcí elektropneumatické brzdy je nouzové brzdění, tedy náhlé zastavení v případě, že je na kolejích překážka či člověk. U metra *M1* je zpoždění brzd při nouzovém brždění maximálně $0,94 \text{ s}$.

V neposlední řadě se používá elektropneumatická brzda v případě, že brzda elektrodynamická selže nebo dojde k její poruše. Pak je strojvedoucí donucen zastavit soupravu metra třeba i z maximální rychlosti $v = 80 \text{ km/h}$ právě pouze za pomoci brzdy elektropneumatické. Při zapnutí třetí brzdě by její maximální oteplení nemělo překročit hodnotu $t = 360^\circ\text{C}$.

Jako parkovací brzda je na každém podvozku jednoho vagonu jedna tzv. střadačová brzda, jež v parkovací poloze uvolní pružinu, která přitlačí brzdové obložení na disk. [2] [3] [10]

3 Popis funkce elektropneumatické brzdy vozů M1

Kvůli zjednodušení bude funkce elektropneumatické brzdy popsána na vozech *SIEMENS M1*. Jako příklad poslouží brzdové zařízení již zmíněné firmy *KNORR-BREMSE*. Brzdové zařízení se skládá z několika základních částí, bloků:

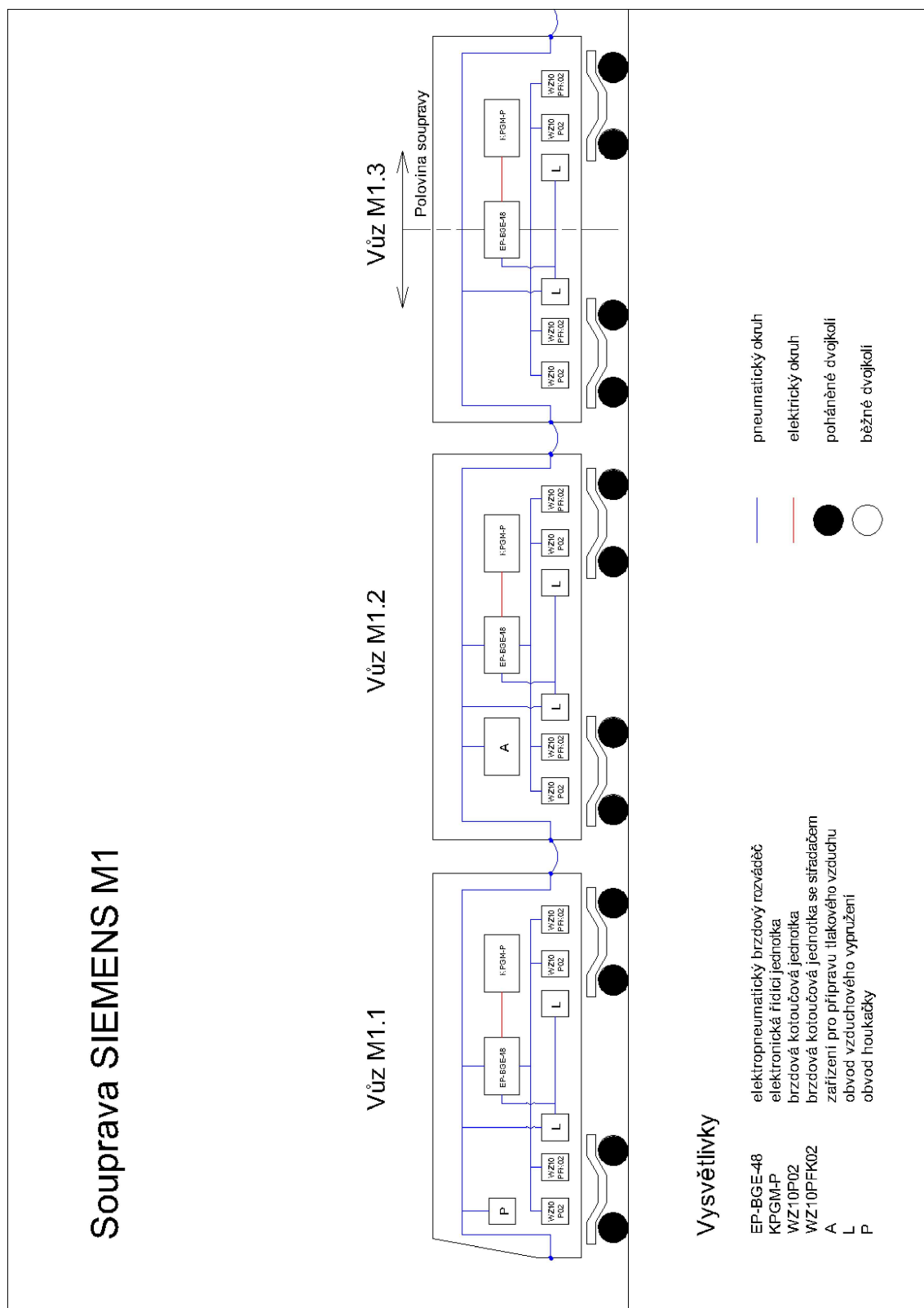
- A zařízení pro dodávku a přípravu vzduchu
- B řízení brzdy
- C zařízení brzdy v podvozku
- G protiskluzové zařízení
- L zařízení vzduchového vypružení

Celkové pneumatické zařízení soupravy obsahuje ještě další komponenty nebo součásti, které jsou ovládány pomocí pneumatiky. Možné je zmínit například ovládání houkačky. Pneumaticky je dále ovládán třeba sběrač proudu nebo zařízení pro mazání okolků kol. S těmito pneumatickými celky se tato práce však podrobněji zabývat nebude, a proto budou v dalších kapitolách záměrně vynechány. Jedná se o tyto části:

- P obvod houkačky
- U pneumatický sběrač proudu

Zjednodušené elektropneumatické schéma s rozmístěním základních celků brzdy soupravy *M1* uvádí *Obrázek 1* na následující straně.

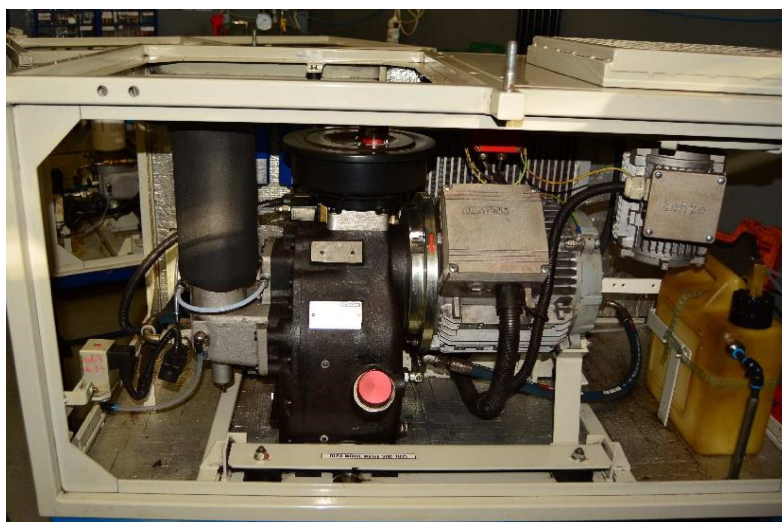
[2][3][4]



Obrázek 1: Blokové schéma SIEMENS M1

3.1 Zařízení pro dodávku a přípravu vzduchu

Docílení potřebné dodávky vzduchu o požadované kvalitě je u pneumatických a elektropneumatických brzd jeden z nejdůležitějších faktorů celého brzdového zařízení. Za tímto účelem byl pro zásobování vzduchem navržen rotační šroubový kompresor *SL 20 A1*, který zvládne vyrobit více než $V = 54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ vzduchu o tlaku $p = 9 \text{ bar}$. Šroubový kompresor je poháněn střídavým asynchronním elektromotorem A2 o příkonu $P = 11 \text{ kW}$, jenž je napájen střídavým napětím $U = 400 \text{ V}$ s frekvencí 50 Hz . Chod motoru je řízen tlakovým spínačem. Kompresor pak zapíná při spodní hranici tlaku $p = 7,5 \text{ bar}$ a vypíná při horní hranici tlaku $p = 9 \text{ bar}$. Pro indikaci závady na kompresoru se používá tlakový spínač. U vozů metra byl použit šroubový kompresor místo pístového především z důvodu snížení hlučnosti.¹ Ihned za kompresorem se nachází mezichladič A23, který se stará jednak o snížení teploty vzduchu, která se razantně navýšila po jeho stlačení v kompresoru a jednak také o částečné snížení vlhkosti. Celé zařízení pro výrobu a přípravu vzduchu ukazuje *Obrázek 2*. Pneumatické schéma zařízení pro přípravu vzduchu znázorňuje *Obrázek 8* na straně 12. [2][3]



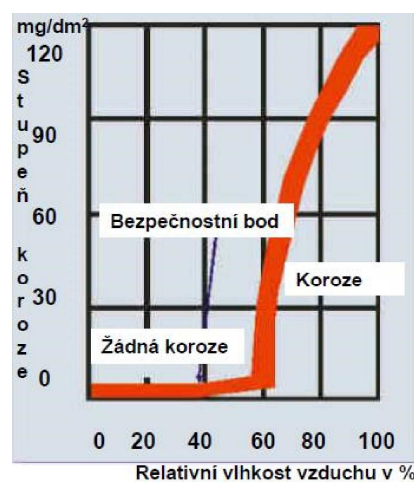
Obrázek 2: Zařízení pro výrobu tlakového vzduchu

Dané množství stlačeného a ochlazeného vzduchu je potřeba dále upravit na požadovanou kvalitu, kterou výrobce posléze uvádí v návrhu brzdového systému.

¹ Z důvodu špatné životnosti kompresorů bylo třeba vystřídat několik různých modelů od různých výrobců, než bylo dosaženo požadované životnosti. Proto se kompresor na obrázku neshoduje s kompresorem použitým v původním návrhu.

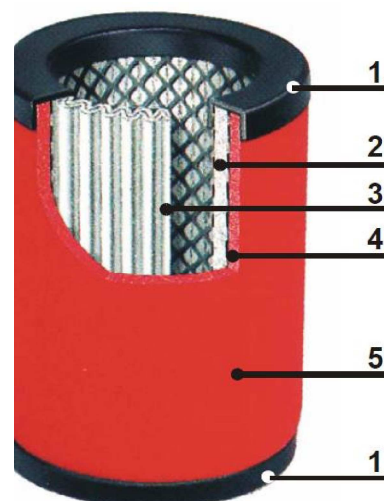
Na kvalitu stlačeného vzduchu má vliv zejména zařízení pro vysoušení vzduchu, které se podílí na jeho přípravě. Stlačený vzduch z kompresoru tedy proudí do vysoušecí jednotky, kde je přes dvojitý pístový ventil směřován k jedné ze dvou komor vysoušečů 44. Vysoušeč tlakového vzduchu zajišťuje rosný bod 40°C pod teplotou nasávaného vzduchu. Většina vzduchu, která prochází vysoušečem, poté proudí řídicím ventilem dále do oběhu. Zbytek je odveden tryskou přes druhou komorou vysoušeče k jeho nastavci na opačné straně a slouží k regeneraci nastavece. Dvojitý pístový ventil pomocí časovače určuje, ke kterému z vysoušečů bude vzduch přiveden. Elektronický časovač je izolován vodotěsným pláštěm a vybaven magnetickým ventilem. Ten je spínán nebo vypínán pomocí elektronického časovače každou minutu. Podle provozního stavu vysoušeče usměrňuje vzduch do levé či pravé komory. Dvoukomorový sušič má oproti sušiči jednocomorovému výhodu především v možnosti pracovat bez regenerační přestávky, při níž by bylo třeba úplné zastavení šroubového kompresoru. Komory sušiče vzduchu jsou navíc vytápěny, což zabraňuje jejich zamrznutí za nízkých teplot. Společně s vysoušečem je před startem vytápěna ještě olejová nádoba kompresoru, olejový chladič a filtry s odvodem kondenzátu. [9]

Vzduch jdoucí od kompresoru je vysoušen především z důvodu ochrany pneumatických komponentů a zvýšení jejich životnosti. Tím, že razantně snižuje vlhkost vzduchu v pneumatickém systému, chrání další tlakovzdušné komponenty jednak před vznikem koroze (a to i v přítomnosti katalyzátorů koroze jako jsou například soli) a zadruhé před zamrzáváním jednotlivých součástí. Kvůli možnosti vzniku koroze je snaha potlačit relativní vlhkost tlakového vzduchu pod 35%, kde je šance na vznik koroze takřka minimální, jak je ukazuje *Graf 1: Koroze*. [1][2][3]



Graf 1: Koroze [1]

Ze sušiče je dále vzduch veden přes ohebnou hadici 42 do vzduchového filtru 45 (Obrázek 3). Tento mikrofiltr má za úkol zbavit vysušený brzdový vzduch zbytků oleje. Toto opatření pneumatického potrubí mikrofiltrem je nezbytné, neboť kompresor nemá za všech podmínek konstantní spotřebu oleje. Ta roste především ve vysokých provozních nebo okolních teplotách, kdy vysoušečem prochází poměrně značné množství spotřeby oleje. Ten je od vzduchu následně oddělen právě v mikrofiltru, kde se olej usazuje ve vrstvě ze skelných vláken. Vnější tělo mikrofiltru bývá ocelové, koncové části jsou vyrobeny z hliníku, popřípadě z plastu. Mikrofiltry na vozech *M1* jsou v hliníkovém provedení. Mikrofiltr minimalizuje či spíše úplně neutralizuje další obsah oleje v pneumatickém vedení.



Obrázek 3: Struktura mikrofiltru [1]

1. Koncový hliníkový uzávěr
2. Vrstva ze skelných vláken
3. Vnitřní ocelový plášť
4. Vnější ocelový plášť
5. Plášť z pěnového materiálu potažený PVC

Jako příklad parametrů jemného filtru oleje je uveden typ *OEF1* instalovaný na soupravách *M1* (Obrázek 5 strana 9). Parametry mikrofiltru jsou uvádí **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [1]

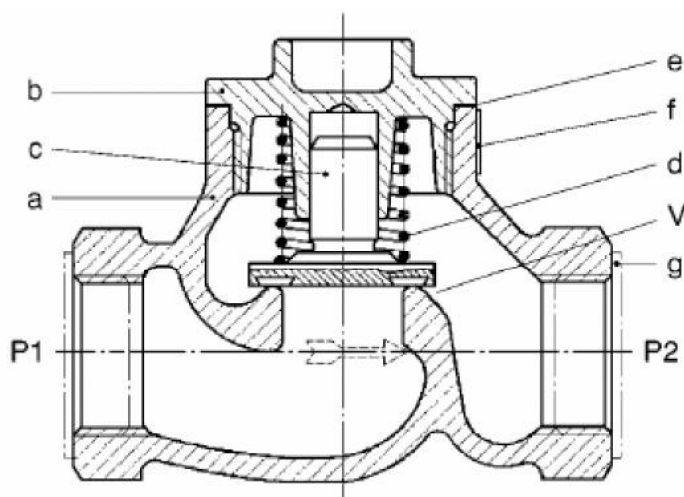
Maximální objemový tok vzduchu	900 l · min ⁻¹
Hmotnost	1,8 kg
Výška zástavby	271 mm
Prostor pro údržbu	168 mm
Šířka zástavby	87 mm
Hloubka zástavby	80 mm
Míra odlučování	99 %
Zbývající obsah oleje	≤ 0,01 %
Úbytek tlaku (nový stav)	0,09 bar
Úbytek tlaku (stav před výměnou)	(0,6 ÷ 0,8) bar

Tabulka 1: Technické parametry mikrofiltru *OEF 1* [1]

Za filtrem oleje je vzduch veden skrz zpětný ventil s A8 (Obrázek 4) do dvojice hlavních vzduchojemů A9 s odvodňovacími kohouty A10. Zpětný ventil je zde instalován z důvodu, aby za pomoci jeho samočinného uzavření bylo možné vyměnit zařízení pro vysoušení vzduchu bez úniku tlakového vzduchu v hlavním vzduchojemu. [2]



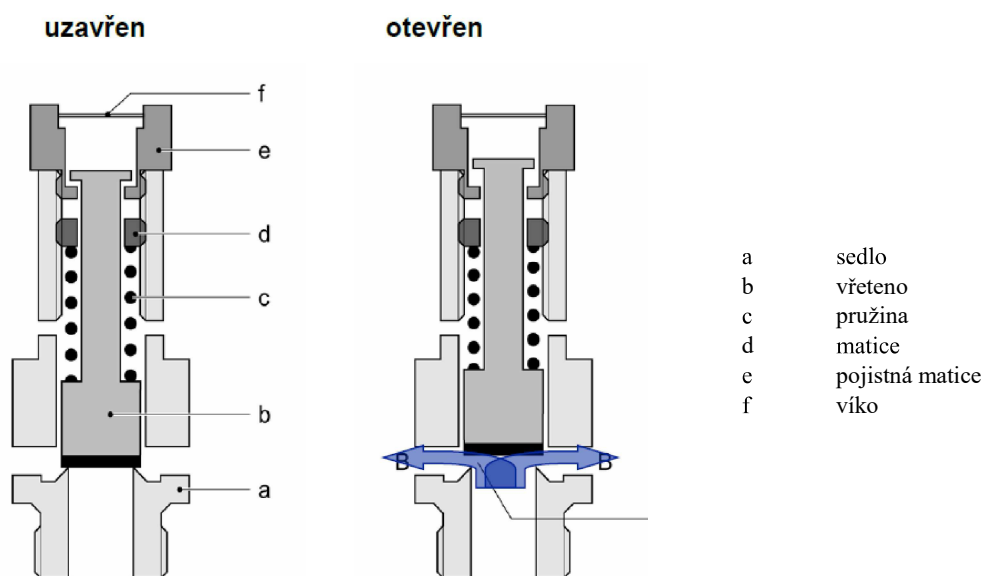
Obrázek 5: Instalace mikrofiltru na podvozku vozu M1



- | | |
|----|-----------------|
| a | těleso |
| b | víko |
| c | vřeteno |
| d | pružina |
| e | těsnicí kroužek |
| f | výrobní štítek |
| g | příruba |
| V | sedlo ventilu |
| P1 | od kompresoru |
| P2 | do vzduchojemu |

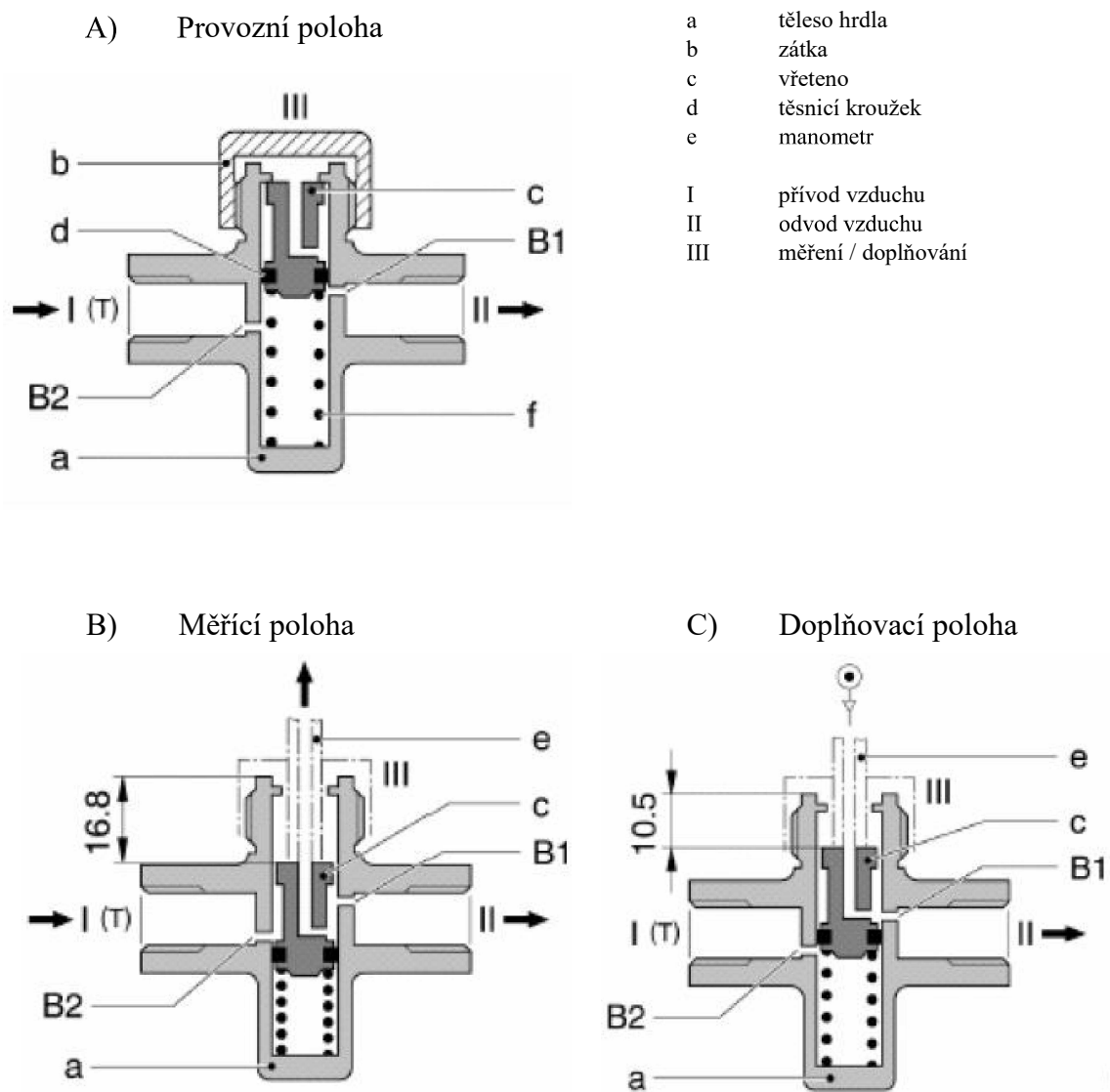
Obrázek 4: Zpětný ventil [1]

Jako bezpečnostní zařízení používají soupravy *M1* pojistné ventily A3 a A18, které se zpravidla umísťují k hlavním vzduchojemům a ke kompresoru. Pojistné ventily slouží primárně jako ochrana těchto tlakovzdušných zařízení a jejich otevírací tlak a vypouštěcí výkon musí být sladěn s ostatními komponenty v pneumatické soustavě. U soupravy metra *M1* je pojistný ventil nastaven na tlak $p = 10 \text{ bar}$. Ventil se zcela otevírá při zvýšení tlaku na $p = 10,8 \text{ bar}$ a uzavírá zpět při poklesu pod $p = 9,4 \text{ bar}$, jak naznačuje *Obrázek 6*. [1][3]

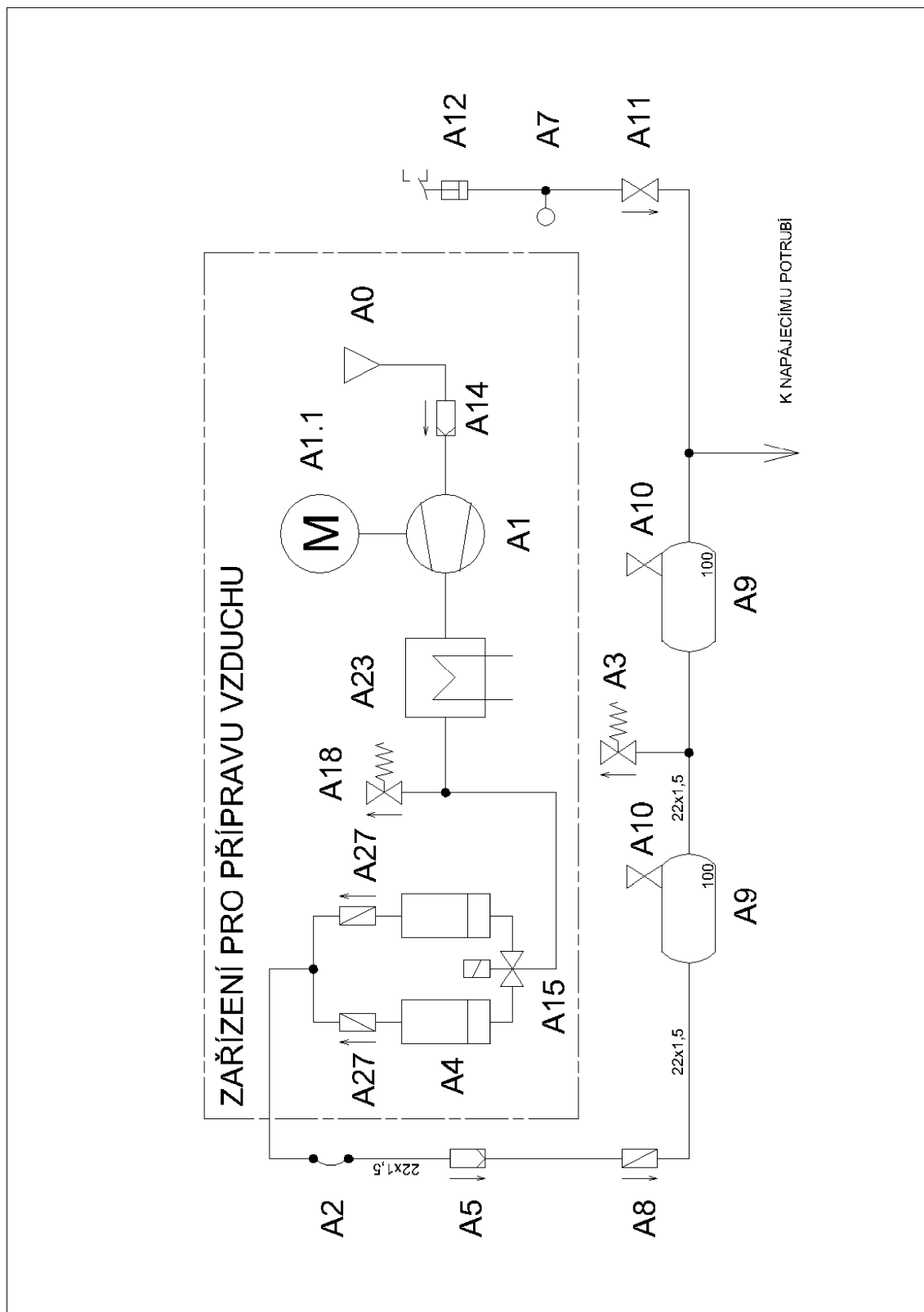


Obrázek 6: Bezpečnostní ventil ve dvou pozicích [1]

Zařízení pro přípravu vzduchu je dále vybavené diagnostickou přípojkou A7 a vypínacím kohoutem s odvzdušněním A11. Diagnostické přípojky mají tři různé polohy. Buď je přípojka uzavřená krytkou a umožňuje volný průchod tlakového vzduchu, nebo je přípojka otevřená a pomocí připojeného manometru je možné měřit tlak v potrubí. Třetí možností použití diagnostické přípojky je doplnění soustavy na požadovaný tlak z cizího zdroje. Polohy diagnostických přípojek ukazuje *Obrázek 7* na následující straně. [1]



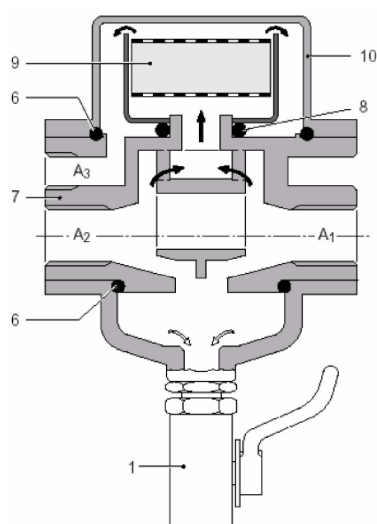
Obrázek 7: Diagnostická přípojka ve třech pozicích [1]



Obrázek 8: Zařízení pro přípravu tlakového vzduchu M1 [4]

3.2 Řízení brzdy

Dalším důležitou jednotkou brzdového systému metra je řízení brzdy (Obrázek 12 strana 15). Tlakový vzduch, který je již ochlazený, vysušený a zbavený oleje, proudí z tlakových zásobníků, vzduchojemů, dále do hlavního potrubí a do brzdových rozváděčů **B10** jednotlivých vozů. Ty mají na starost právě řízení brzdy. Vzduch putuje přes odstředivý vzduchový filtr **B1** (Obrázek 9), další vypínací kohout **B4**, zkušební šroubení **B25** a jednosměrný ventil **B26** k brzdovému vzduchojemu **B7**. Odstředivý vzduchový filtr slouží k odstranění dalších nečistot, které svou vahou spadnou do dolní části filtru. Ten je navíc vybaven výpustním kohoutem, který umožňuje vyprázdnění filtru. [2][3]



- | | |
|----|-----------------|
| 1 | výpustní kohout |
| 6 | těsnicí kroužek |
| 7 | těleso filtru |
| 8 | těsnicí kroužek |
| 9 | vložka filtru |
| 10 | kryt |

Obrázek 9: Odstředivý vzduchový filtr (v pohledu a v řezu) [1]

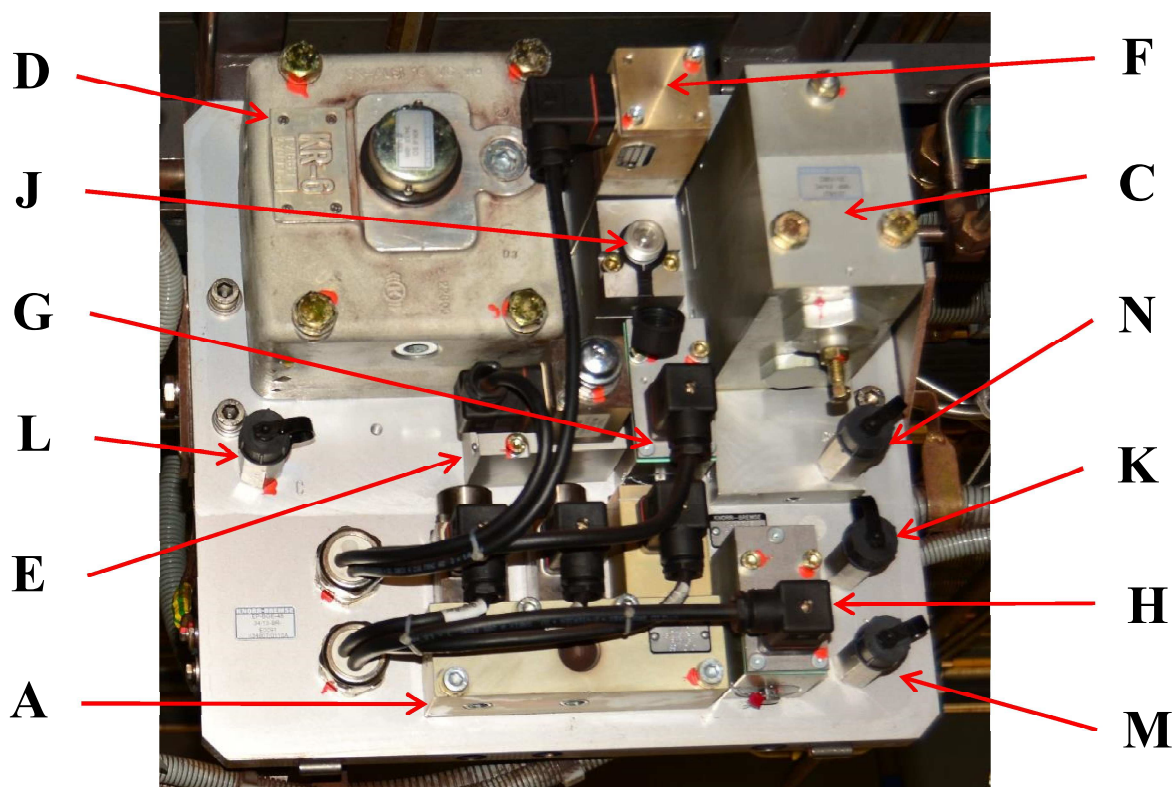
Za vypínacím kohoutem se nachází tlakový spínač **B5**, jenž má funkci indikovat nízký tlak v pneumatické soustavě a případně zabránit rozjezdu soupravy.

Za brzdovým vzduchojemem se nachází již zmíněný brzdový rozváděč **B10**, který je mozkiem celého brzdového systému metra. Rozváděč (*Obrázek 10*) dostává povely z mikroprocesorové elektronické řídicí jednotky vozu **B11**. Ty jsou následně zpracovány elektropneumatickým analogovým převodníkem **B10/A**, který je společně s dalšími komponenty umístěn na hliníkové montážní desce. Montážní deska je půlená, mezi hliníkovými částmi je silikonové těsnění. V každé polovině desky jsou vyfrézované kanálky, kterými je rozváděn tlakový vzduch mezi jednotlivými komponenty rozváděče, které se montují přímo na desku. Takovýto návrh rozváděče umožňuje případnou jednoduchou montáž a demontáž jednotlivých komponent. Rozváděč svým řešením defacto připomíná integrovaný tiskový obvod používaný v elektrotechnice. Mohli bychom jej nazvat „*tiskovým pneumatickým obvodem*“. [9]

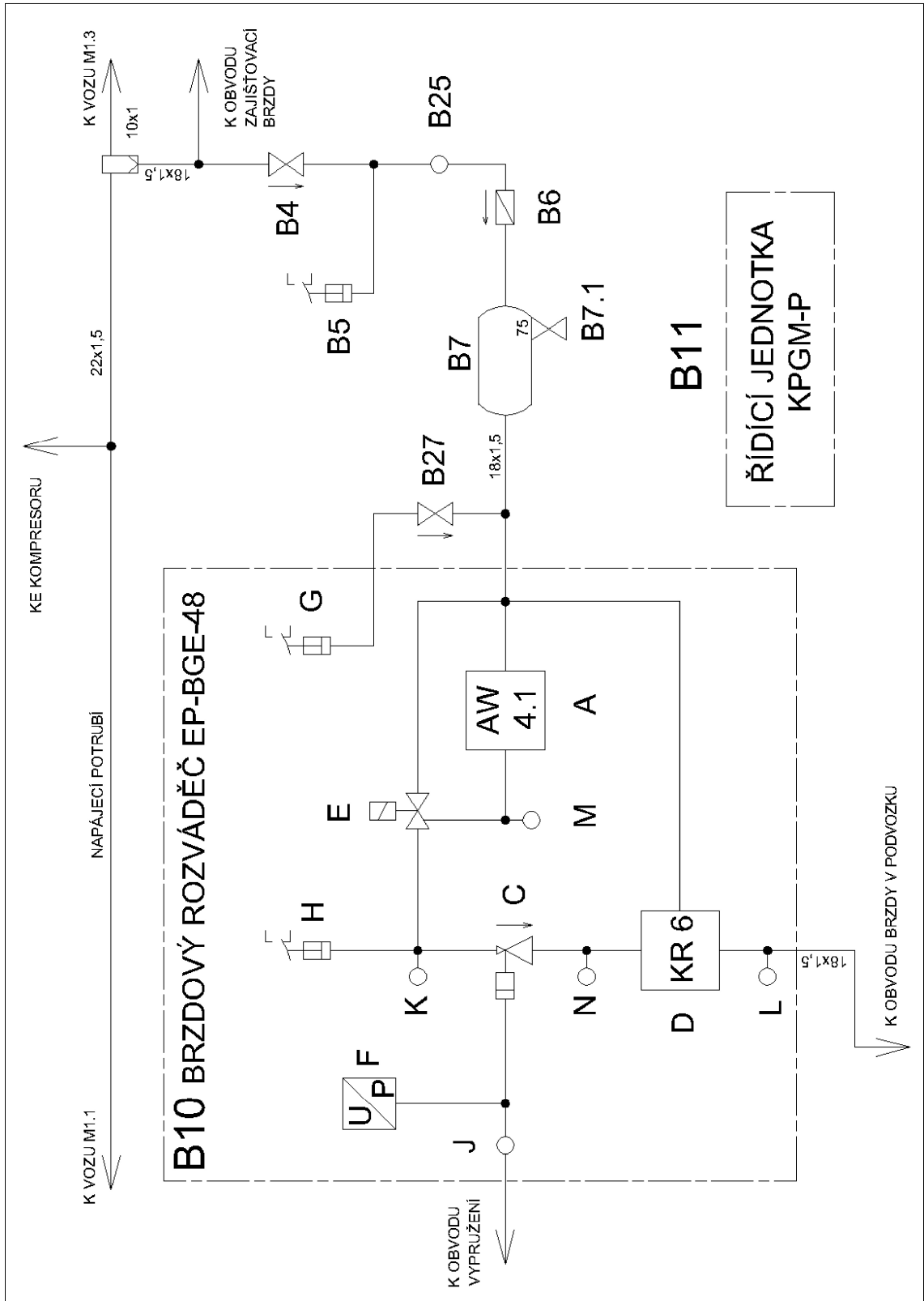
**BRZDOVÝ ROZVÁDĚČ
KNORR-BREMSE EP-BGE-48**

A	analogový převodník AW 4.1C
C	zátěžový ventil DBV1-E
D	relé ventil KR6-So
E	nouzový ventil WMV1-ZEST
F	tlakový snímač DG4-TA (tlak T)
G	tlakový spínač DS7-T (tlak R)
H	tlakový spínač DS7-T (tlak Cv2)
J	kontrolní hrdlo K2-T (tlak T)
K	kontrolní hrdlo K1-E (tlak Cv2)
L	kontrolní hrdlo K1-E (tlak C)
M	kontrolní hrdlo K1-E (tlak Cv1)
N	kontrolní hrdlo K1-E (tlak Cv3)

Obrázek 11: Popisek relé ventilu



Obrázek 10: Rozváděč KNORR-BREMSE EP-BGE-48



Obrázek 12: Obvod řízení brzdy M1 [4]

3.2.1 Jízda

Při jízdě je elektropneumatická brzda nečinná. Stlačený a připravený vzduch o předsunutém tlaku R vystupuje z brzdového vzduchojemu a vstupuje jednou rozbočkou jednak do analogového převodníku **B10/A** a jednak do relé ventilu (výkonného ventilu) **B10/D** jako napájecí tlak. Analogový převodník v případě jízdy nedostává od elektronické řídicí jednotky žádné pokyny pro brzdění, a tudíž dále neposílá žádný řídicí tlak k nouzovému ventilu **B10/E**. Řídicí tlak tedy chybí a výkonný ventil nepouští napájecí tlak do brzdových válců, nedochází k vyvolání brzdného účinku. [2][3]

3.2.2 Provozní brzdění

Provozní brzdění patří jistě k nejvyužívanějšímu způsobu použití brzdy u soupravy metra a je možné jej rozdělit na brzdění zpomalovací či zastavovací a brzdění spádové.

Zpomalovací či zastavovací brzdění je používáno obvykle při příjezdu soupravy do stanice nebo například v případě přiblížení se k jinému vlaku. Zde je na rozdíl od brzdění spádového brzda použita v relativně časově krátkém úseku.

Při spádovém brzdění je totiž potřeba konstantního využití brzdné síly tak, aby nebyla překročena maximální dovolená rychlost na daném úseku. To je nutné především u větších klesání.

Z hlediska rozdělení provozního brzdění je navíc nutné rozlišit, zda je vůz v bezporuchovém nebo poruchovém stavu. Stav vozu má vliv na následné použití typu brzdy.

V bezporuchovém stavu je souprava bržděna vždy pomocí EDB, která je využívána jak pro konstantní brzdění, tak i pro zpomalování při příjezdu do stanice v rychlostech $v = (10 \div 80) \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. V rychlostech nižších než $v = 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ je EDB doplněna brzdou třecí mechanickou, jež je ovládána elektropneumaticky. Ta zajistí dobrzdění vozu do stanice a jeho zajištění.

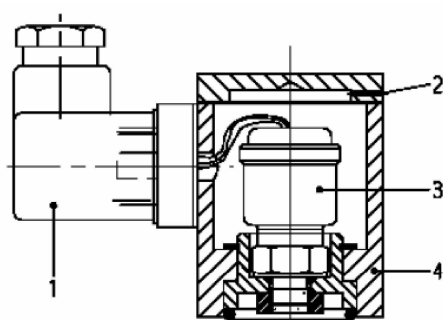
Poruchovým stavem může být například únik vzduchu z napájecího potrubí či chyba na některých pneumatických nebo elektronických prvcích brzdové soustavy. Při poruchovém stavu je souprava plně bržděna elektropneumatickou brzdou, která na rozdíl od EDB musí fungovat vždy. [2][3][12]

Jak bylo již dříve řečeno, při běžném provozním brzdění se upřednostňuje použití EDB před brzdou mechanickou třecí, což přináší některé výhody. Pokud je díky jiné jednotce umožněna rekuperace elektrické energie, pak může EDB pracovat s rekuperací a v podstatě vyrábět energii pro jinou soupravu. Pokud se tak neděje, je elektrická energie částečně nebo úplně disipována pomocí odporů. Při obou způsobech brzdění EDB se nemění brzdny účinek. EDB je ovládána pomocí brzdiče, tedy jeho přestavením do požadované polohy od 0 % do 100 % brzdného účinku.

Elektropneumatická brzda je na EDB nezávislá. V bezporuchovém stavu je používána zejména pro zastavování při rychlostech menších než $v = 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, kde je účinek EDB značně omezený a je potřeba docílit požadovaného brzdného účinku jinou cestou. Ve stavu poruchovém je EPB samostatně použita v celém rozsahu rychlostí $v = (10 \div 80) \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a je tedy předpoklad, že brzdové kotouče budou teplotně velmi namáhané. Požadavek na EPB je tedy stanoven k zastavení plně obsazené soupravy z maximální dovolené rychlosti při největším spádu pouze na omezený počet zabrzdění, načež je-li to nutné, může souprava pokračovat v jízdě jen omezenou rychlostí. EPB je ovládána obdobně jako EDP, tedy pomocí brzdiče a nastavením brzdného účinku od 0 % do 100 %.

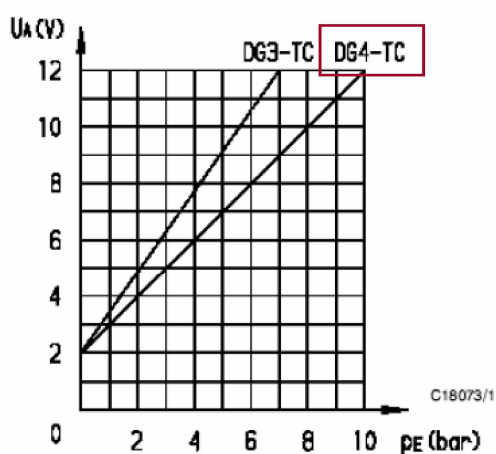
Při provozním brzdění je veden vzduch k brzdovému válci cestou od brzdového vzduchojemu přes analogový převodník **B10/A**, nouzový magnetický ventil **B10/E**, tlakový redukční ventil **B10/C** až do výkonného ventilu **B10/D**. Elektropneumatický analogový převodník dostává povely z elektronické řídicí jednotky **B11** a podle obsazení vozu mění předsunutý tlak R v řídicí tlak C_{v1} . Obsazení vozu cestujícími, a tedy jeho zatížení, snímá v tomto případě tlakový snímač zátěže **B10/F** (Obrázek 13, strana 18), který posílá signály do elektronické řídicí jednotky. Ta následně elektronickou cestou ovládá analogový převodník, který podle zátěže upravuje tlak R na řídicí tlak C_{v1} . Tlakový snímač zátěže je pro získávání informací připojen na pneumatický okruh vypružení vozu **L**. Nouzový magnetický ventil je v tomto případě elektricky nabuzen a umožňuje průchod tlaku C_{v2} smyčkou právě přes analogový převodník k redukčnímu ventilu. Za nouzovým ventilem je řídicí tlak C_{v2} snímán tlakovým spínačem **B10/H** a veden dále ke tlakovému redukčnímu ventilu.

Tlakový spínač za nouzovým ventilem je nastaven na maximální tlak $p = 5,5 \text{ bar}$. V případě provozního brzdění je však tlakový ventil nečinný, jelikož řídicí tlak C_{V2} , který do něj vstupuje z nouzového ventilu, je již dostatečně nízký, než aby jej bylo třeba redukovat. Byl už upraven dříve elektronicky v analogovém převodníku. Tlak C_{V2} tedy proudí bez další úpravy do relé ventilu **B10/D**. Relé ventil, jinak také výkonný ventil, má za úkol násobit předběžný tlak vzduchu R na konečný tlak C , který je požadován v brzdovém válci. Relé ventil je ovládán pneumaticky řídicím tlakem C_{V3} . Největší možný tlak vzduchu při brzdění je $C = 4,74 \text{ bar}$. [2][3] [9][12]



Obrázek 13: Tlakový snímač DG4-TC [1]

- | | |
|---|---------------------|
| 1 | zásuvka snímače |
| 2 | odvzdušňovací otvor |
| 3 | tlakový senzor |
| 4 | těleso |



Graf 2: Charakteristika tlakového snímače [1]

p_E [bar] vstupní tlak
 U_A [V] výstupní napětí

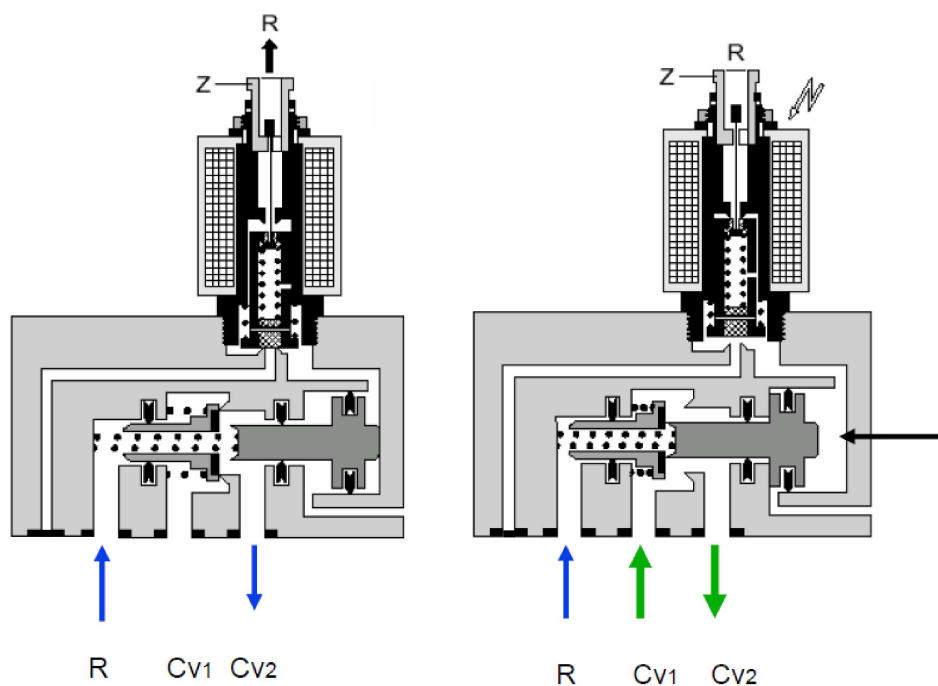
3.2.3 Nouzové brzdění

Nouzové, jinak také rychločinné brzdění se běžně nevyužívá. Své uplatnění najde až v případě, kdy není zajištěna plná bezpečnost, tedy v mimořádných situacích, které vyžadují okamžité zastavení soupravy. Za takovou situaci je možné považovat výskyt cizího objektu v kolejišti, například člověka, přetržení vozové soupravy nebo další poruchy na pneumatickém a elektrickém systému či jiných prvků vozu, kvůli nimž není souprava schopna pokračovat v dalším provozu. Při rychločinném brzdění je využívána pouze třecí mechanická brzda řízená elektropneumaticky.

Při nouzovém brzdění se využívá plného brzděného účinku, který je podobně jako u provozního brzdění nastavován pneumaticky podle obsazení. Rovněž je využito protismykové zařízení, které kontroluje smyk jednotlivých dvojkolí.

Nouzovou brzdou je možné uvést do činnosti několika způsoby, a to buď z místa řidiče nebo za pomoci elektronické řídicí jednotky. Strojvedoucí brzdí vůz nouzovou brzdou přesunem brzdiče do polohy nouzové brzdy, stisknutím tlačítka nouzové brzdy či nedostatečným ovládním pedálu bdělosti. Řídicí jednotka zasahuje obzvláště v krizových situacích, například dojde-li k přetržení vlaku, kdy je přerušena elektrická bezpečnostní smyčka nebo při jiné závažné poruše, kdy souprava není schopna bezpečně dojet do následující stanice. V jiných případech by správně nouzová brzda být použita neměla, neboť je vždy upřednostňující požadavek na dojetí do stanice. Při nouzovém brzdění je přerušen přívod elektrické energie do nouzového elektromagnetického ventilu **B10/E** (Obrázek 14), čímž se následně přeruší i okruh brzdy mezi nouzovým ventilem a analogovým měničem. Vzduch o předběžném tlaku R (8 až 9,5 bar) tak putuje přímo nouzovým ventilem a tlakovým ventilem k výkonnému ventilu bez předchozí elektronické úpravy v analogovém převodníku. Jelikož tlak neputuje přes analogový převodník a není tedy elektronicky korigován podle zatížení vozu, je zátěžová korekce vytvořena pomocí redukčního tlakového ventilu **B10/C**.

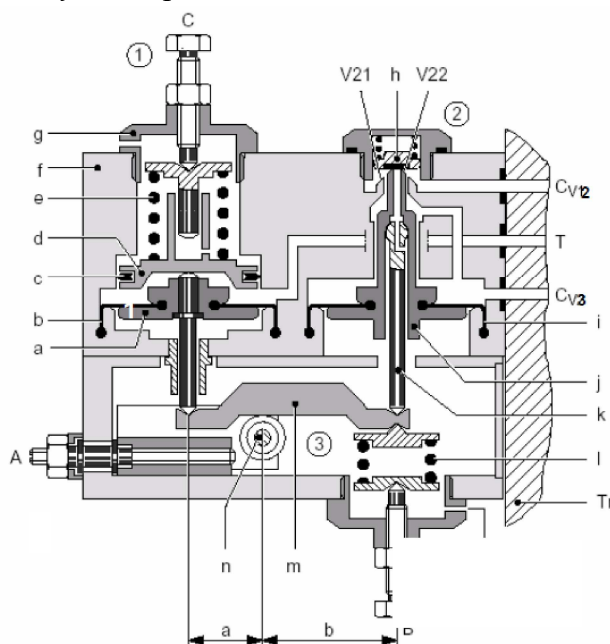
Do redukčního ventilu (Obrázek 15) vstupuje při nouzovém brzdění tlak v podstatě neupravený řídicí tlak Cv_2 ($Cv_2 = R = 8 \div 9,5 \text{ bar}$) z nouzového ventilu, který je potřeba upravit. Děje se tak za pomoci dalšího řídicího tlaku T , který je do redukčního ventilu přiveden z okruhu vypružení vozu (brzdění podle obsazení).



Obrázek 14: Magnetický nouzový ventil (nenabuzený a nabuzený)

Tato korekce tlaku redukčním ventilem je při nouzovém brzdění nezbytná, neboť maximální tlak v brzdových válcích může být již zmíněných $C = 4,74 \text{ bar}$. Redukční ventil tedy omezuje vyšší řídicí tlak C_{V2} na nižší C_{V3} , který je dále násoben ve výkonném ventilu. Redukční ventil pak funguje podobně jako váhy. Základní částí tvoří dvojice pístů o stejné ploše, které jsou spojené přes vahadlo. Písty jsou opatřeny vzduchotěsnými membránami. Vahadlo lze pomocí stavěcího šroubu A nastavit tak, abychom dostaly požadované vzdálenosti a a b a tím pak i následnou vyšší výstupního řídicího tlaku C_{V3} . Řídicí tlak z vypružení T zatlačí na píst a , který přes vahadlo zvedne píst j podle nastavení poměru délek a a b . Píst j se zvedá a částečně umožňuje průchod tlaku C_{V2} . Čím větší je zatížení vozu, tím je větší přivedený tlak od vypružení a tím více se stlačí i píst a . To má za následek vyšší zdvih pístu j , který více otevře průchod řídicího tlaku C_{V2} a tím zvýší i hodnotu tlaku C_{V3} . Tlak C_{V3} pak vstupuje do relé ventilu, kde je násoben, a ovládá propustnost napájecího tlaku R do brzdových válců.

Při provozním i nouzovém brzdění je nutná korekce tlaku podle obsazení, která se využívá hlavně právě u souprav metra. Zde totiž dochází k velkým změnám mezi zatížením jednotlivých vozů a tím pádem i ke změnám brzdné síly, jež je potřebná pro zastavení celé soupravy. Kdyby při brzdění nedocházelo k tlakové korekci, pak by buď plný vůz měl příliš malé zpomalení a nebyl schopen zastavit na požadované vzdálenosti nebo naopak u prázdného vozu by docházelo k překonání meze adheze a následnému smyku kol při brzdění.



Obrázek 15: Tlakový ventil DBV-3E

1	převod zátěže
a	membránový píst
b	membrána
c	těsnicí kroužek
d	pasivní píst
e	pružina
f	těleso
g	uzavírací šroub
2	uzavírací část
h	talíř ventilu
i	membrána
j	membránový píst
k	zdvihátko
l	pružina
3	mechanická část
m	vahadlo
n	uložení vahadla
Tr	nosník
A, B, C	seřizovací šrouby

Plně obsazený vůz je v takovém případě až o 77 % těžší, než je vůz prázdný.

Ve skutečnosti se počítají C_v tlaky, tedy tlaky v brzdovém válci, pro tři různá obsazení vozu; prázdný, částečně obsazený a plně obsazený. Reálné hodnoty udává **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pro různé brzděné požadavky. [2][3][12]

	Obsazení [%]	Hmotnost [kg] (bez rotační)	Hmotnost (s rotační) [kg]	Tlak T [bar]	Tlak C_v [bar]	Brzdná síla [kN]	Odrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
prázdný	57,26	25 200	29 480	1,75	2,84	40,682	1,38
částečně obsazený	89,32	41 700	45 980	3,81	4,27	63,452	1,38
plný	100	47 200	51 480	4,50	4,74	71,042	1,38

Tabulka 2: Hodnoty pro provozní brzdění vozu M1 – 100 % brzděný požadavek [5]

	Obsazení [%]	Hmotnost [kg] (bez rotační)	Hmotnost [kg] (s rotační)	Tlak T [bar]	Tlak C_v [bar]	Brzdná síla [kN]	Odrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
prázdný	57,26	25 200	29 480	1,75	2,46	34,580	1,17
částečně obsazený	89,32	41 700	45 980	3,81	3,67	53,935	1,17
plný	100	47 200	51 480	4,50	4,03	60,386	1,17

Tabulka 3: Hodnoty pro provozní brzdění vozu M1 – 85 % brzděný požadavek [5]

	Obsazení [%]	Hmotnost [kg] (bez rotační)	Hmotnost [kg] (s rotační)	Tlak T [bar]	Tlak C_v [bar]	Brzdná síla [kN]	Odrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
prázdný	57,26	25 200	29 480	1,75	2,16	28,478	0,97
částečně obsazený	89,32	41 700	45 980	3,81	3,02	44,417	0,97
plný	100	47 200	51 480	4,50	3,42	49,730	0,97

Tabulka 4: Hodnoty pro stání vozu M1 – 70 % brzděný požadavek [5]

3.2.4 Parkovací brzda

Parkovací brzda je nezbytnou součástí elektropneumatické brzdy a je využívána zejména jako nástroj zamezující samovolnému rozjezdu soupravy metra stání, při běžném provozu zejména při stání ve stanici. Její časový účinek však není trvalý, poněvadž s funkcí parkovací brzdy se počítá pouze na omezený časový úsek – výstup a nástup cestujících ve stanici. Hlavním požadavkem kladeným na parkovací brzdu je schopnost udržet vůz v nehybnosti i při maximálním sklonu trati 40 ‰. Parkovací brzda je u vozů Siemens *M1* řešena jako mechanická třecí brzda a ovládána taktéž elektropneumaticky jako brzda provozní. Obdobně jako u brzdy provozní slouží k řízení tlaku brzdy parkovací okamžitá hmotnost vozu. Parkovací brzdu ovládá strojvedoucí přestavení brzdiče do nulové polohy. [12]

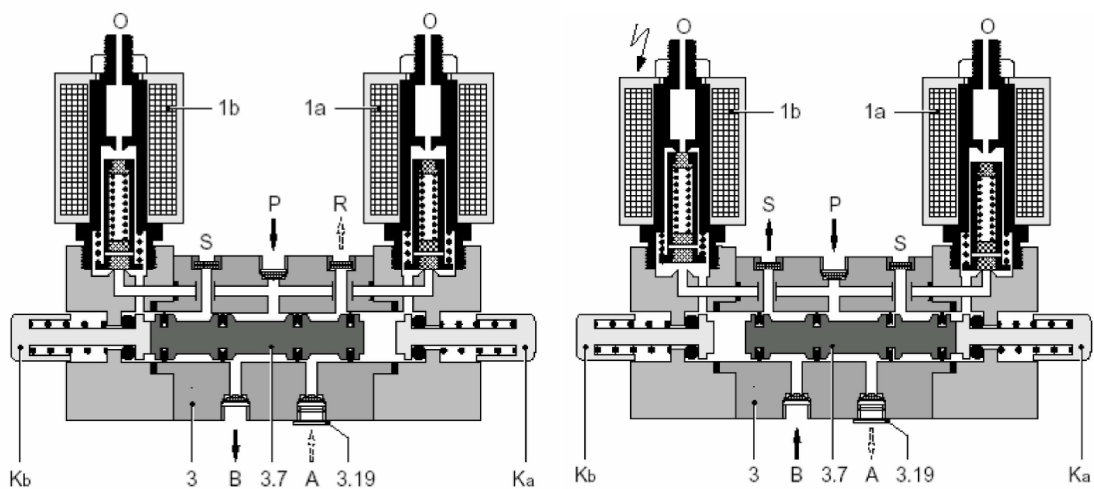
3.2.5 Zajišťovací brzda

Hlavní funkcí zajišťovací brzdy je zabránění pohybu vozu, a to především při dlouhodobém odstavení vozidla v depu či na odstavných a obratových kolejích. Dále je zajišťovací brzda využívána při zajištění vozu v případě, že na trati došlo k poruše a například není k dispozici elektrické napájecí napětí a provozní brzdu nelze ovládat. Hlavním požadavkem na zajišťovací brzdu je podobně jako u brzdy parkovací zajištění plně obsazeného vozu v klidu na maximální povoleném sklonu trati 40 ‰. Na rozdíl od parkovací brzdy by měl však účinek brzdy provozní být trvalý. Jako zajišťovací brzda slouží brzda střadačová, která je ovládána elektropneumaticky, avšak funguje v podstatě opačným způsobem než brzda provozní. Zde vzduch ve válci způsobuje odbrzdění (umožňuje jízdu), jelikož pomocí tlaku vzduchu dochází k odtlačení pružiny střadače.

Systém řízení pneumatické zajišťovací brzdy (*Obrázek 17*, strana 25) je řešen následujícím způsobem. Stlačený a vysušený vzduch putuje odbočkou, která se nachází za odstředivým vzduchovým filtrem buď směrem k jednotce řízení brzdy (popsáno výše) anebo k soustavě zajišťovací brzdy. Ta se skládá z jednosměrného ventilu **B6**, brzdového vzduchojemu o objemu $V = 25 \text{ l}$ a uzavíracího kohoutu **B28**. Uzavírací kohout je zde trojcestný a v případě poklesu tlaku vzduchu v zásobovacím potrubí tedy umožňuje využít vzduchu z brzdového vzduchojemu pro případné odbrzdění zajišťovací brzdy. Uzavíracím kohoutem proudí vzduch přes

redukční ventil **B27** k další rozbočce. Zde je veden jedním směrem k uzavíracímu kohoutu pro pružinový válec a směrem druhým k pneumatické soustavě pro sběrač proudu, kterým se práce dále zabývat nebude. Po uzavíracím kohoutu následuje konečně impulsní magnetický ventil **B18**, který tvoří hlavní operační součást parkovací brzdy. Magnetický ventil řídí soustavu střadačové brzdy, propouští snížený tlak do pružinové části válce brzdové jednotky. Tlak vzduchu o hodnotě $p = 6 \text{ bar}$ udržuje po dobu jízdy pružinu v pneumatickém válci stlačenou a zajišťovací brzda je tedy nečinná. Snížení tlaku za pomoci magnetického ventilu způsobí odtažení pružiny, která následně pomocí páky a převodnic přitlačí kleštiny brzdové jednotky ke kotouči.

Impulsní magnetický ventil (*Obrázek 16*) je řízen 5/2 cestným ventilem, který se skládá z pneumatického člunkového ventilu a dvou magnetických ventilů pro řízení. Impulsní ventil je řízen elektronicky z kabiny řidiče za použití tlačítka na panelu. Tím se zapíná nebo vypíná parkovací brzda. V případě selhání elektroniky je možné provést zapnutí zajišťovací brzdy ručním stlačením ventilu.



Obrázek 16: Impulsní magnetický ventil (nenabuzený a nabuzený) [1]

- | | |
|-----|-------------------|
| 1a | magnetický ventil |
| 1b | magnetický ventil |
| 3.7 | šoupě |

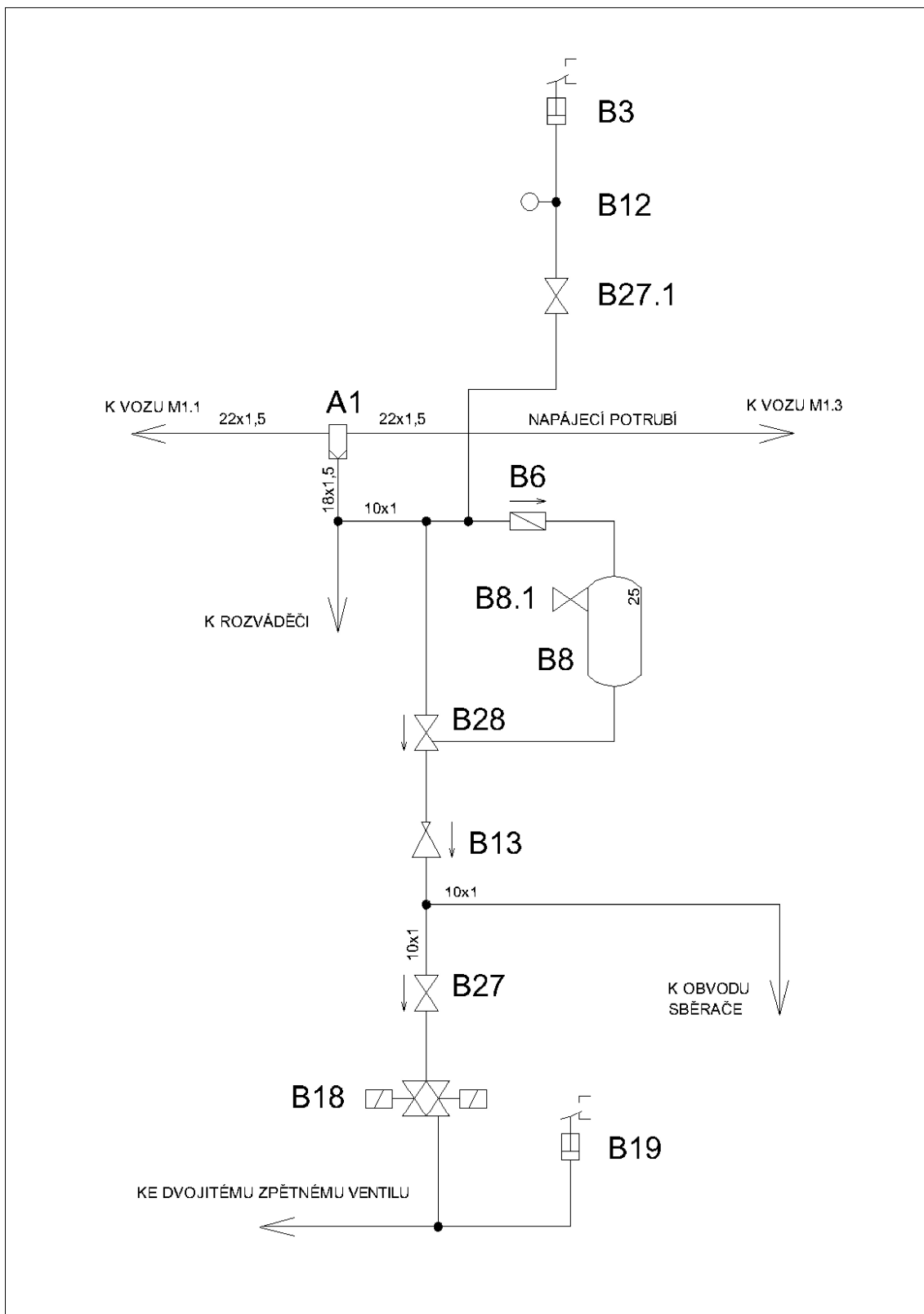
Okruh zajišťovací brzdy je dále vybaven spínačem tlaku **B19**, který indikuje zapnutí nebo vypnutí zajišťovací brzdy. Tlakový spínač zde zastává i funkci bezpečnostního prvku, protože znemožňuje rozjezd soupravy v případě, že je nízký tlak v napájecím potrubí. Příliš nízký tlak jednak nepřekoná sílu pružiny, a navíc při rozjezdu vozu, který nedisponuje potřebnou hodnotou tlaku v napájecím potrubí, není zaručena dostatečná brzdná síla.

O propojení systému zajišťovací brzdy se systémem provozní elektropneumatické brzdy se na voze *MI* stará dvojitý zpětný ventil **B15**, který je vložen mezi impulsním magnetickým ventilem a přívodem tlakového vzduchu z výkonného ventilu. Dvojitý zpětný ventil slouží zejména jako další bezpečnostní prvek. Je-li souprava v pohybu a dojde-li k poruše na pneumatickém okruhu, třeba ke ztrátě tlaku vzduchu v napájecím potrubí, nesmí automaticky dojít k sepnutí zajišťovací střadačové brzdy. Hlavním důvodem je umožnění dojezdu soupravy do stanice (byť třeba sníženou rychlostí). Další úlohou dvojitého zpětného ventilu je zabránění překrytí účinku sil v brzdovém válci pro případ, že by provozní brzda byla zapnuta společně s brzdou zajišťovací. Brzdná síla by v takovém případě byla příliš velká a mohlo by docházet k překročení meze adheze (a tedy ke smyku dvojkolí) nebo k nadměrnému opotřebení některých komponentů brzdy. Při použití provozní nebo nouzové brzdy v době, kdy je zapnuta brzda zajišťovací, je pružina střadačové brzdy ve válci jednotky *WZ10 PFK* odtlačena o jistou vzdálenost, a tudíž v brzdovém válci nedochází k překonání povolených sil.

Dalším požadavkem na zajišťovací brzdou je možnost jejího odbrzdění v případě, kdy ve válci střadače není dostatek tlakového vzduchu. K tomu je střadačová brzda vybavena lankem, pomocí něhož ji je možné v případě poruchy odbrzdit mechanicky. To je výhodné zejména při posunu vozidel v depu nebo na odstavných kolejích, kdy není umožněno plnění pneumatického systému tlakovým vzduchem potřebným k oddálení pružiny.

Zajišťovací brzda je aktivována požadavkem strojvedoucího nebo pomocí elektronické řídicí jednotky při odstavení soupravy. Je dimenzována na maximální možné obsazení (zatížení) vozu, a tudíž u zajišťovací brzdy není nikterak nutná korekce podle obsazení. Protismykové zařízení je pro zajišťovací brzdou v nečinnosti.

[2][3][12]

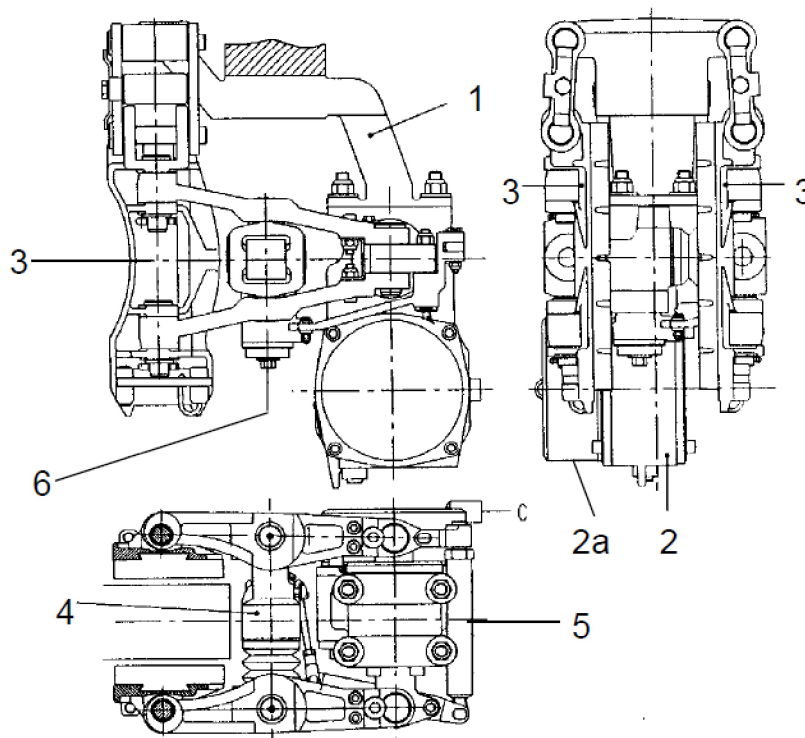


Obrázek 17: Obvod zajišťovací brzdy M1 [4]

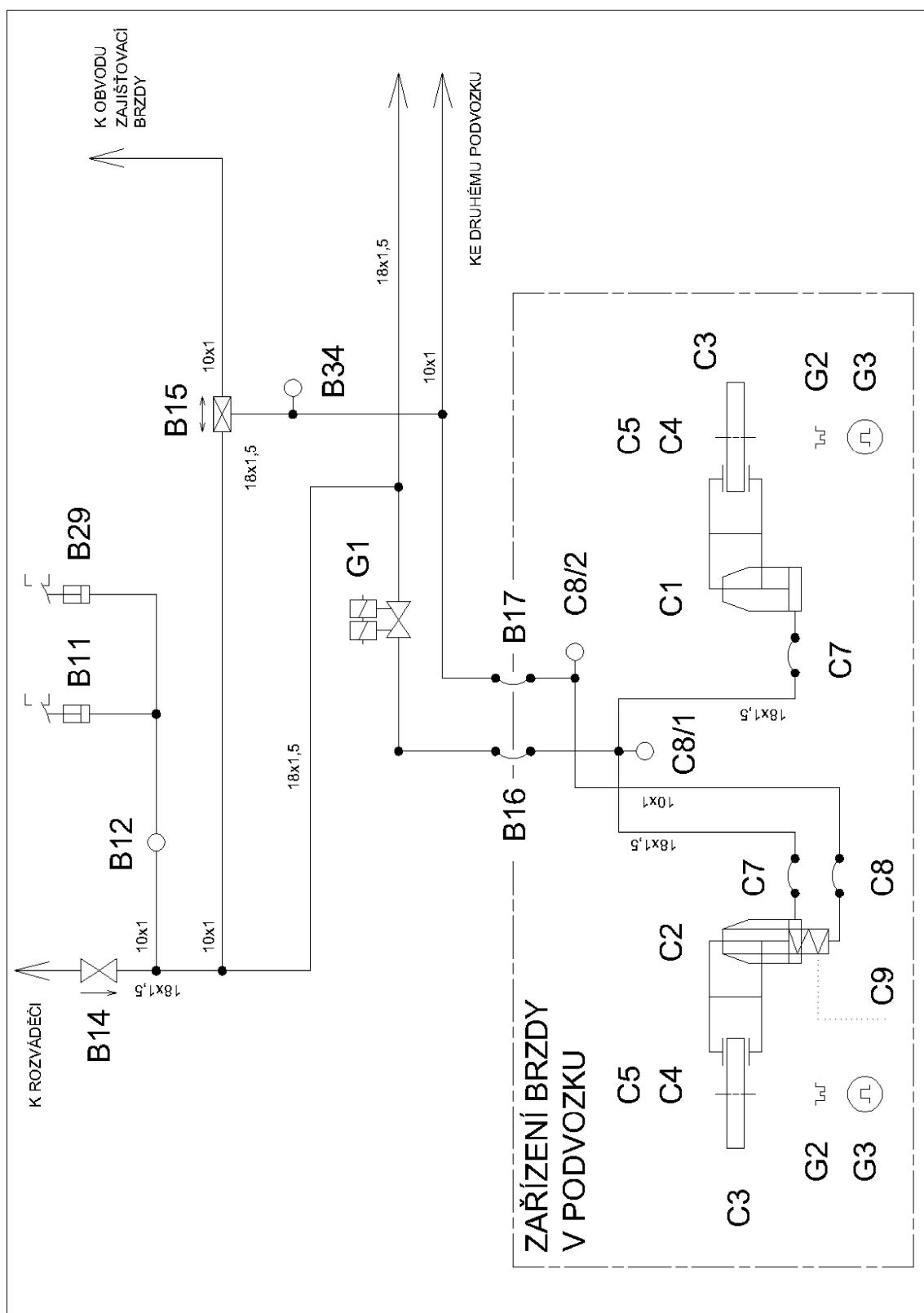
3.3 Zařízení brzdy v podvozku

Připravený tlakový vzduch o nastaveném tlaku proudí z rozváděče dále do brzdových válců (

Obrázek 19, strana 27). Jeden vůz má celkem dva podvozky, každý o dvou nápravách. Vzduch je veden přes uzavírací ventil se spínačem **B14**, diagnostickou přípojkou **B12** a protismykový magnetický ventil **G1** pružnými hadicemi **B16** a **B17** ke každému z podvozků. Protismykový ventil bude popsán v další části práce. Tlakový vzduch je pak rozbočkou veden dále ke každému dvojkolí, kde je pomocí dalších pružných hadic **C6** a **C7** směřován k pneumatickému válci brzdové jednotky **C1** a **C2**. Souprava pražského metra používá k brzdění podobně jako třeba moderní osobní železniční vagóny brzdu kotoučovou. Jedná se o brzdu adhezní, brzdná síla je z převáděna z brzdových kotoučů **C3** na nápravu dvojkolí a poté přes kola na kolejnici. Vozy *M1* jsou navrženy takovým způsobem, že mají jeden brzdový kotouč na dvojkolí, tudíž má každé dvojkolí právě jednu brzdovou jednotku (*Obrázek 18*). Na každém podvozku je navíc jeden ze dvou brzdových válců vybaven pružinovou střadačovou brzdou, která zde zastává funkci brzdy zajišťovací.



Obrázek 18: Brzdová kotoučová jednotka WZ10P02 [6]



Obrázek 19: Zařízení brzdy v podvozku M1 [4]

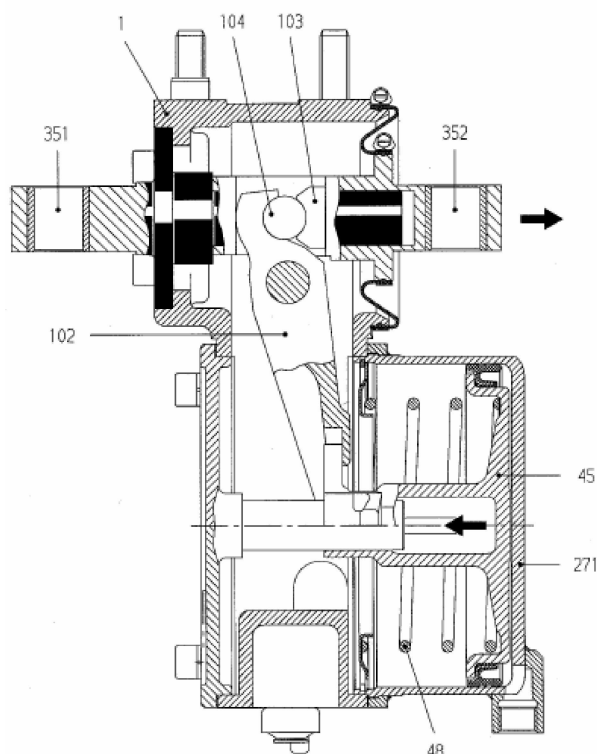
3.3.1 Kotoučová brzda

Sestava kotoučové brzdy se skládá z brzdového kotouče a brzdové kotoučové jednotky. Brzdový kotouč je pomocí šroubů uchycen k náboji, který je nalisován na osazení hřídele dvojkolí. Každá náprava je vybavena jedním brzdovým kotoučem o průměru 640 mm a šířce 110 mm . Vnitřní průměr třecí části je 350 mm . Brzdový kotouč je vybaven válcovými chladícími žebry zajišťující lepší chlazení při velkém zatížení brzdy. Pro vozy *M1* je pro spojení kotouče s nábojem navrženo kruhové šroubové pole o dvanácti šroubech. Brzdová jednotka je uchycena ke konzole ve spodní části vozu pomocí 4 šroubů *M20*. Firma *KNORR-BREMSE* použila pro soupravu pražského metra *SIEMENS* brzdové jednotky *WZ10P02* (Obrázek 20, strana 29) a jednotky *WZ10PFK02*, které jsou navíc vybaveny druhým válcem s pružinou střadačové brzdy. Brzdové obložení je *JURID 840N*, podrobnosti uvádí ***Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.***

Označení	Součinitel tření	Použití	Poznámky
JURID 840	0,38	městská doprava	Speciálně pro vysoké tepelné namáhání při selhání ED brzdy

Tabulka 5: Technické parametry materiálu obložení [14]

Brzdový účinek je vyvolán natlakováním brzdového válce jednotky, v němž dojde k posunutí brzdového pístu. Ten svým pohybem překlápí páku, která dále přesune posuvník v horní části jednotky směrem vpravo. Následně je jedna z převodnic překlápěna směrem ke kotouči. Díky propojení převodnic přes ovladač táhla je následně ke kotouči překlápěna i druhá z převodnic a vzniká třecí kontakt mezi brzdovým obložением a kotoučem. Ovladač táhla tvoří spojovací prvek mezi převodnicemi. U jednotky *WZ10P02* je umístěn samostatně v prostoru mezi brzdovým válcem a místem, kde dochází ke kontaktu obložení s brzdovým kotoučem. Ovladač táhla je vybaven stavěčem odlehlosti převodnic, jehož hlavním úkolem je udržovat stále stejnou vůli mezi brzdovým obložением a kotoučem při opotřebení obložení. Stavěč odlehlosti se skládá z pohybového šroubu, pohybové matice s posuvným tělesem, vratné pružiny a manžety. U této brzdové jednotky funguje stavěč následujícím způsobem. V případě zvětšení vůle obložení a kotouče o určitou vzdálenost se těleso s pohybovou maticí zašroubovává do tělesa s pohybovým šroubem. Přiblížením tělesa s maticí dojde i k přiblížení převodnic, které následně redukuje vůli vzniklou mezi brzdovým obložением a kotoučem. [1]



Obrázek 20: Funkce jednotky WZ10P02 [1]

Výhody brzdové jednotky *WZ10P* tkví především v nejnižší šířce zástavby té doby, lehké konstrukci a následné nízké hmotnosti a také nízké spotřeby vzduchu. Díky pevné konstrukci dosahuje jednotka i vysokých brzdových sil u čelistí a s nerezovými čepy a neprodyšnými ložisky má dobré antikorozní předpoklady a účinnost. [1]



Obrázek 21: Detail brzdové jednotky

3.3.2 Výhody kotoučové brzdy

Zejména u vlaků se v dřívější dobách používalo k vyvození brzdového efektu brzd špalíkových, ať už jednoduchých nebo dvojitých. Jak se zvyšovaly cestovní rychlosti železničních souprav, zvyšovaly se i požadavky na jejich zabrzdění. Zde už špalíkové brzdy nedostačovaly, a proto se zejména u rychlostí vyšších než *140 km/h* začalo používat brzd kotoučových. Ty společně s lepší účinností a kratší zábrzdnou drahou, než měly brzdy špalíkové, přinesly i řadu dalších výhod. Jednou z nich je například nulové tepelné namáhání kol vozu, což snižuje zejména nebezpečí tvorby trhlin, praskání a deformace. Další z výhod, které přinesla kolejovým vozidlům kotoučová brzda, je zlepšení komfortu a pohodlí při cestování. Brzdění je oproti špalíkové brzdě mnohem tišší, klidnější a rovnoměrné. Co se týče životnosti brzdového obložení, i zde má kotoučová brzda mnoho výhod. Brzdové obložení kotoučové brzdy vydrží běžně *100 000 až 140 000 km*, což je déle než litinové špalíky, načež i následná výměna je velmi jednoduchá stejně jako celá konstrukce brzdy. U vozů metra je životnost obložení ještě mnohem delší, poněvadž se EPB používá běžně pouze na dobrzdování. Proto životnost obložení dosahuje i *1 500 000 km*.

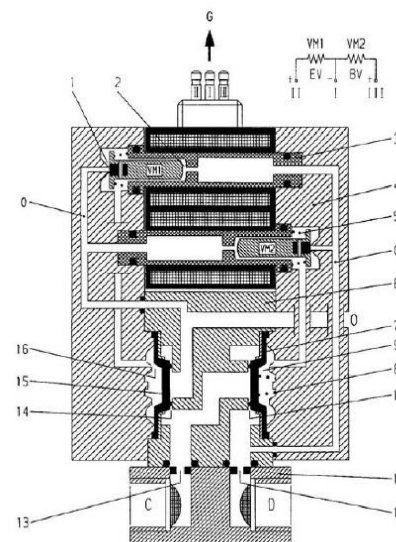
Kotoučová brzda si navíc vystačí s brzdovým válce o krátkém zdvihu, jenž se obvykle pohybuje v rozmezí zhruba *12 až 20 mm*. Tím se nejen rapidně snižuje šířka zástavby brzdové jednotky a její celková hmotnost, ale i spotřeba vzduchu, který je potřeba pro posunutí pístu v brzdovém válci. S nižší spotřebou vzduchu je tedy možné použít pomocných vzduchojemů o menších objemech.

Nevýhodou kotoučové brzdy může být naopak nebezpečí ztráty brzdného účinku v zimním provozu. Za extrémních podmínek se může mezi brzdovým kotoučem a obložením vytvářet ledová nebo tvrdá sněhová vrstva, což má za následek prodloužení brzdných drah souprav. Po začátku brzdění totiž nějakou dobu trvá, než dojde k odstranění této vrstvy z brzdových komponentů a vůz je po tento čas prakticky bez brzdného účinku. Vzhledem k mírným zimním podmínkám v České republice však podobné nebezpečí nehrozí ani u železničních vozů, natož pak u vozů pražského metra.

[15]

3.4 Protismykové zařízení

Každý z podvozků vozu pražského metra je vybaven protismykovým zařízením. To sestává především z protismykového magnetického ventilu **G1** (Obrázek 22), jímž jsou oba podvozky vybaveny, z čidla otáček **G2** a z elektronické řídicí jednotky. Protismykový ventil je umístěn na vnitřní straně příčnicku podvozku. Čidlo snímá otáčky ozubeného pólového kola **G3** a naměřená data posílá ke zpracování do elektronické řídicí jednotky. Ta kromě toho, že ovládá analogový měnič provozní brzdy, řídí i jednotlivé protiskluzové ventily v podvozcích metra. Protismykový ventil je při běžném brzdění je propustný. Jeho funkce se projeví až při smyku kola. Je vybavený dvojicí elektromagnetických ventilů, z nichž jedním se napouští tlakový vzduch do brzdového válce a pomocí druhého odpouští podle pokynů od elektronické řídicí jednotky. [2]

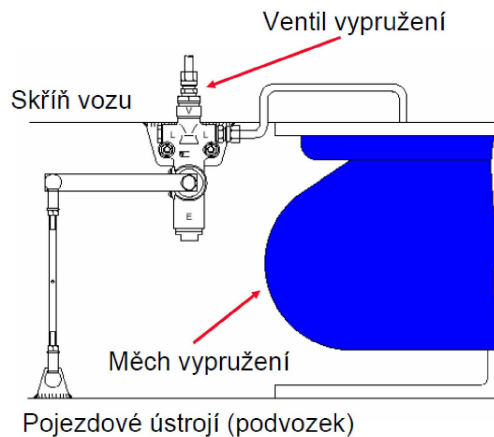


Obrázek 22 - Ventil protismykového zařízení [1]

3.5 Vzduchové vypružení

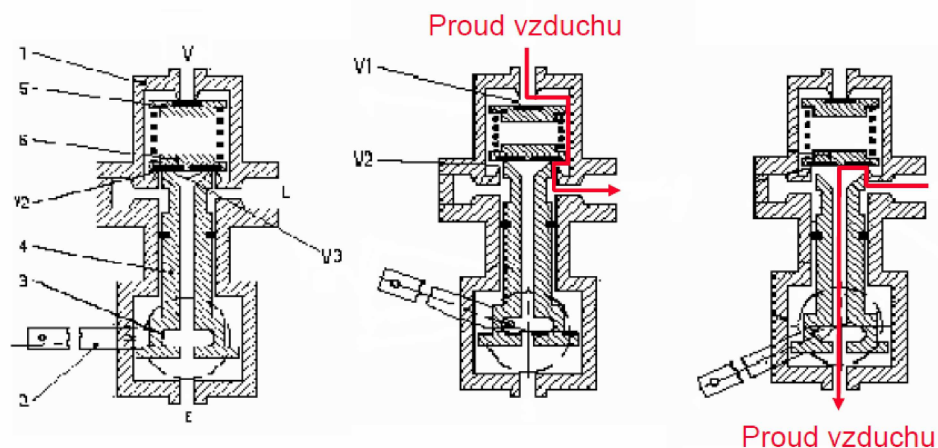
Jednou z důležitých součástí soupravy pražského metra je pneumatický obvod vzduchového vypružení (Obrázek 23, strana 32). Ten se sestává z odstředivého vzduchového filtru **B1**, jenž je napojen přímo na napájecí potrubí, uzavíracího ventilu **L1**, přepouštěcího ventilu bez zpětného proudění **L2** a vzduchojemu o objemu $V = 30 \text{ l}$ **L3** s odvodňovacím kohoutem **L4**. Přepouštěcí ventil je nastaven na otevírací tlak $p = (5,4 \div 5,7) \text{ bar}$. Od vzduchojemu proudí tlakový vzduch přes další zpětný ventil **L6** rozbočkou ke dvojici ventilů pneumatického vypružení **SV1205 L7**. Jsou to dvousedlové ventily se škrťacím účinkem, na něž mohou být připojeny jedna až dvě pneumatické pružiny. Jejich hlavním úkolem je dodržovat konstantní výšku skříně vozu vzhledem k nástupišti. Ta by se totiž mohla měnit s přibývajícím nebo naopak snižujícím se počtem cestujících. Ventil vypružení tento aspekt kompenzuje tak, že mění tlak ve vzduchových pružinách, které jsou umístěny na podvozcích vozů.

Při větším zatížení, respektive obsazení vozu, pustí ventil do měchu vyšší tlak, při menším obsazení naopak nižší tlak. S takovou reakcí na zatížení zůstávají navíc optimální i pružící vlastnosti celého vozu. Soustavu vypružení znázorňuje *Obrázek 23*, funkci vypružení *Obrázek 25* na straně 33.



Obrázek 23: Vypružení podvozku

Vypružení funguje na následujícím principu. Jestliže dojde k zatížení nebo odlehčení, tedy se zvýší nebo sníží obsazenost vozu, vychýlí se napouštěcí páka ventilu, která je upevněna k podvozku vozu. Při vyšším zatížení se pomocí páky otevře přívod tlakového vzduchu ventilem do měchů vypružení. Ten je otevřen až do doby, než se vyrovná výška skříně vozu s výškou nástupiště a páka se dostane do výchozí stabilní vodorovné polohy. Při nižším zatížení se naopak páka ventilu vypružení pohne druhým směrem a umožňuje upustit tlak z měchů opět až do stabilní polohy. Ve stabilní poloze je ventil uzavřen. Pro zabezpečení tlaku v membránových pružinách je ventil vypružení navíc vybaven zpětným ventilem. Funkci ventilu vypružení ukazuje *Obrázek 24*.



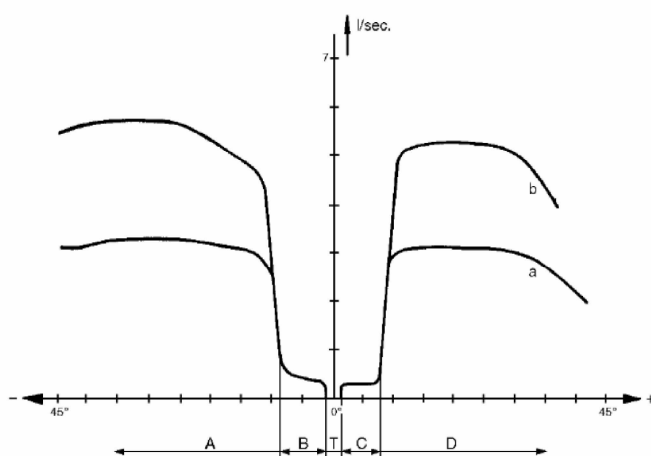
Obrázek 24: Ventil vypružení ve třech pozicích (uzavřen, plnění, vypouštění)

Ventil vypružení poskytuje pro plnění a odvzdušňování membránových pružin kromě volného neškrceného plnění, které je popsáno výše, i plnění a odvzdušnění tzv. škrcené.

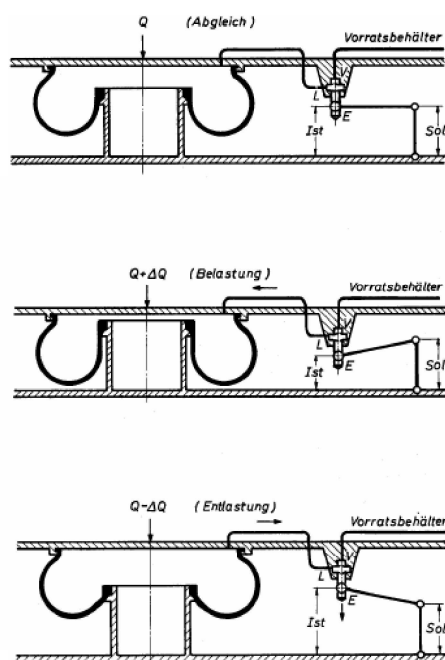
Neškrcené plnění se uplatňuje při velkých změnách zatížení vozu, tedy při nástupu a výstupu cestujících. Pístnice ventilu je pomocí páky a excentru přesunuta do takové polohy, kde mezi ní a tělesem vzniká největší možný průřez pro proudění vzduchu a měchy je tak možno rychle doplnit nebo naopak vyprázdnit tlakovým vzduchem. V charakteristice ventilu vypružení (Obrázek 26) se zde nacházíme v oblasti *A* pro vypouštění a v oblasti *D* pro napouštění.

Naproti tomu při škrceném plnění nebo vypouštění je mezi pístnicí a tělesem ventilu vytvořen jen nepatrný průřez. Ten umožňuje kompenzovat menší potřeby odvzdušnění nebo plnění v průběhu jízdy soupravy a zabraňuje tak velkým výkyvům proudového objemu do okolí. V charakteristice ventilu vypružení se tedy nacházíme v oblasti *B* pro vypouštění a v oblasti *C* pro napouštění.

Mezi dvojicí ventilů vypružení se nachází přepouštěcí ventil L8, který umožňuje vyrovnávání tlaku vzduchu mezi měchy na stranách podvozku podle toho, jaké je rozmístění cestujících. Každý podvozek vozu *M1* je vybaven dvěma membránovými pružinami L9.



Obrázek 26: Charakteristika ventilu vypružení



Obrázek 25: Vypružení ve třech pozicích

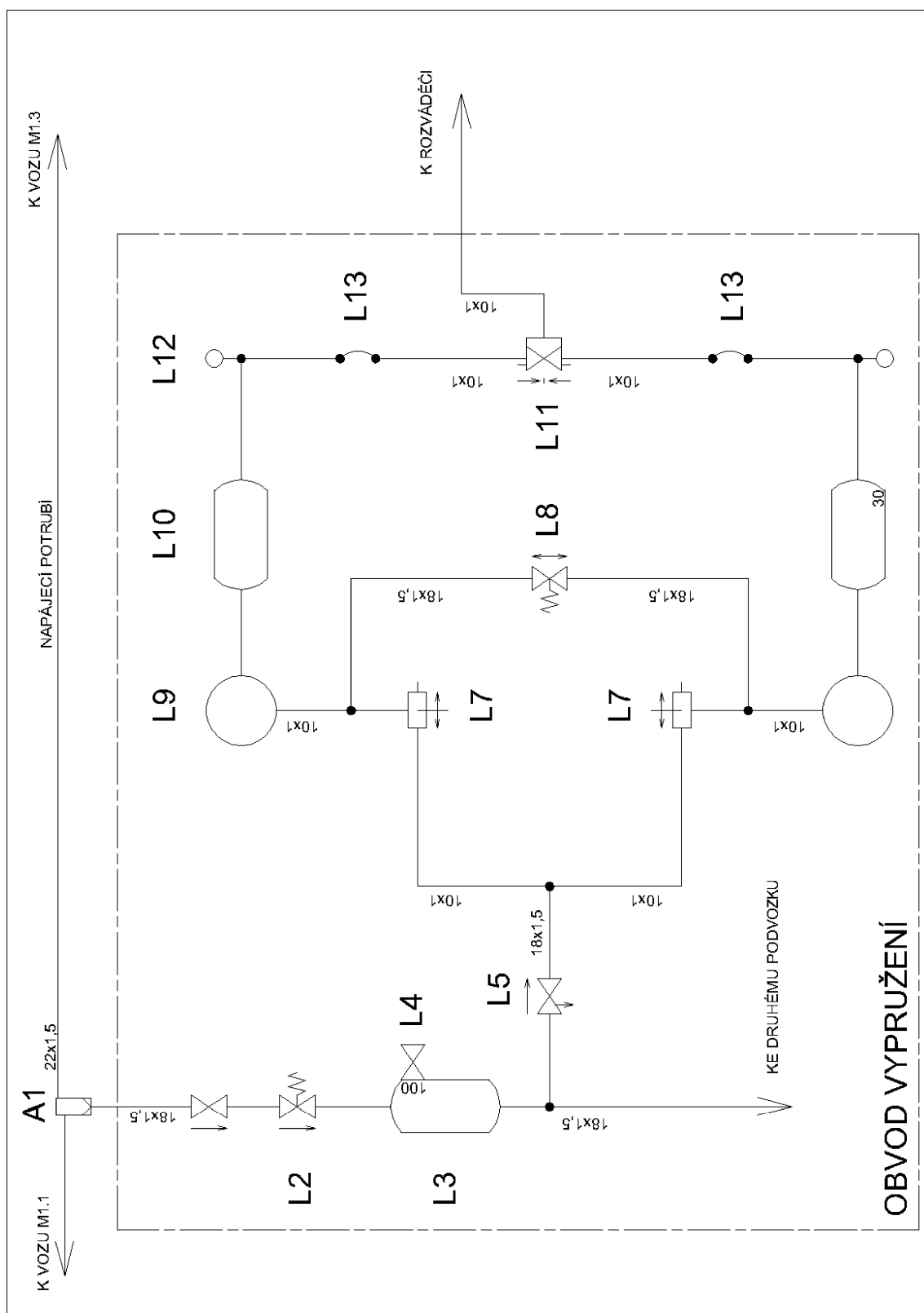
Z měchů je pak vzduch dále veden přes kontrolní hrdla a pružné hadice do středotlakého MDV ventilu **LII**, který upravuje tlak jakožto aritmetický průměr z měchů na obou podvozcích vozu. Středotlaký ventil upraví tlaky T_1 a T_2 z obou okruhů vypružení na tlak T .

Tento tlak je pak směřován jako řídicí ke tlakovému snímači **B10/F** na brzdovém rozváděči, popřípadě tlakovému redukčnímu ventilu **B10/C** v případě nouzového brzdění nebo poruchy na elektrickém vedení. Skutečný systém vypružení ukazuje *Obrázek 27* [1][2][3]



Obrázek 27: Systém vypružení podvozku M1

Předchozí text popisoval koncept elektropneumatické brzdy a vypružení u vlaku metra *M1* pro Prahu. Na vývoji moderních bezpečných pneumatických systémů pracuje společnost *DAKO-CZ, a.s.* a jako příklad nového řešení byla vybrána souprava firmy *ŠKODA Transportation, a.s.* pro Varšavu.



Obrázek 28: Obvod vypružení MI [4]

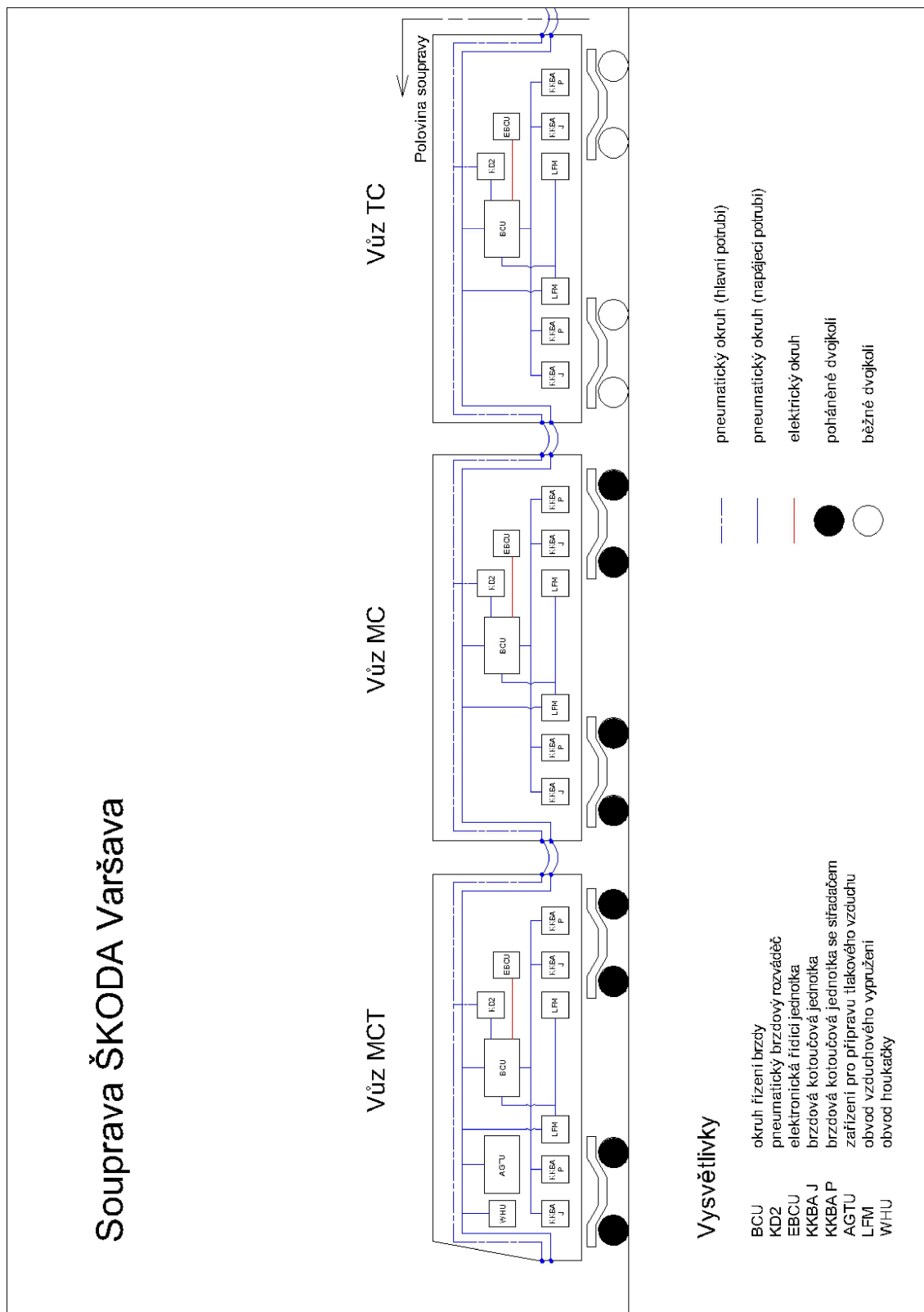
4 Brzdový systém DAKO metra ŠKODA Varšava

Tato část práce bude věnována popisu řešení EPB na současném voze metra. Konkrétně se jedná o metro *Varšava* od společnosti *ŠKODA Transportation, a.s.*, jehož brzdový systém byl navržen českou společností *DAKO-CZ, a.s.* Podobně jako u soupravy *SIEMENS MI* bude popsáno pneumatické schéma, přičemž hlavní pozornost bude věnována především celkům a komponentám, které se odlišují od staršího uspořádání EPB. Dílčí část bude opětovně věnována funkci jednotlivých možností brzdění. Funkce a popis podobných součástí již nebude dopodrobna rozebírán.

Metro *Varšava* je šestivozová souprava, jež je tvořena podobně jako *MI* třemi různými vozy. Všechny vozy jsou vybaveny dvojicí podvozků, které mají každý po dvou nápravách. Čelní vozy, *Motor Driving Car (MCT)*, tedy první a šestý vůz, společně s druhým a pátým vozem, *Motor Car (MC)*, jsou poháněny a disponují jedním asynchronním motorem napájeným střídavým napětím na každém dvojkolí. Prostřední vozy, v pořadí třetí a čtvrtý, nazývané *Trailer Car (TC)* nejsou poháněny a jejich podvozky jsou vybaveny jen běžnými dvojkolími. Všechny vozy disponují mechanickou třecí kotoučovou brzdou s jedním brzdovým kotoučem na dvojkolí. Brzda je ovládána elektropneumatickou cestou jako v případě pražského metra. Poháněné vozy *MCT* a *MC* jsou zákonitě navíc, na rozdíl od vozů *TC*, vybaveny navíc elektrodynamickou brzdou, poněvadž jsou vybaveny elektromotory, které jím v generátorovém chodu tento způsob brzdění umožňují.

Čelní vozy *MCT* jsou oproti ostatním vozům vybaveny zařízením pro tvorbu a přípravu tlakového vzduchu, tedy kompresorem se sušičkou 50 a zásobují vzduchem napájecí potrubí celé soupravy. Další odlišností od vozů *MI*, kde bylo zařízení pro tvorbu a přípravu tlakového vzduchu umístěno na vozech *MI.2*, tedy na druhém a čtvrtém voze soupravy. V případě metra *Varšava* je navíc celý pneumatický brzdový systém navržen jako modulární, vzduchojemy s rozváděčem a ventily jsou umístěny v jednom celku. Tím se usnadní montáž či případná demontáž celého systému, především pak jeho údržba přímo v depu.

Kromě toho, jsou řídicí vozy *MCT* dále vybaveny dvojitými manometry 20, obvodem pneumatické houkačky a ovladačem brzdy 28. Obvod houkačky sestává ze samotné houkačky 42 a jejích ventilů 39 a 40.



Obrázek 29: Blokové schéma ŠKODA Varšava

Brzdový systém pro metro *Varšava* byl na rozdíl od metra *M1* navržen jako dvoupotrubní a kromě napájecího potrubí jsou soupravy vybavené zároveň potrubím hlavním. Hlavního potrubí se používá spíše v mimořádných situacích, kdy je například nutné soupravu vléci. V běžném provozu se však k plnění brzdových vzduchojemů využívá pouze potrubí napájecí.

Souprava je tedy vybavena hned několika typy brzd; elektrodynamickou brzdou, elektropneumatickou přímočinnou brzdou, pneumatickou brzdou samočinnou a brzdou zajišťovací. EDB je využívána primárně jako brzda provozní od mírné regulace rychlosti jízdy až k úplnému zastavení. Zde je EDB v nízkých rychlostech $v \geq 10 \text{ km/h}$ nahrazena přímočinnou EPB, která je také využívána jako brzda provozní, zároveň však může být použita i jako brzda nouzová v případě, že dojde k poruše na EDB či jiném zařízení nebo v případě, že se na kolejišti vyskytne cizí objekt. Přímočinná brzda funguje dále jako brzda zajišťovací, tedy v případě krátkodobého zastavení, když souprava čeká ve stanici na výměnu cestujících. V takovém případě je ovládána automaticky elektronickou řídicí jednotkou. Jako zajišťovací brzda je stejně jako v případě *M1* využívána brzda střadačová, kdy v době nečinnosti kompresoru dojde k poklesu tlaku ve válci vybaveným střadačem a tím i přilehnutím čelistí kleštinové jednotky ke kotouči. Parkovací brzda je ovládána pomocí tlačítek ve stanovišti strojvedoucího. [7][8]

4.1.1 Provozní brzdění

Požadavek na provozní brzdění zadává strojvedoucí přestavením brzdíče do brzdící polohy. Příkaz je zpracován počítačem a pomocí proporcionálního ventilu **35.1**, který se přestaví do plnicí polohy je naplněn řídicí vzduchojem. Proporcionální ventil je řízen elektronicky ($4 \text{ mA} = 0 \text{ bar}$, $20 \text{ mA} = 10 \text{ bar}$). Maximální tlak v řídicím vzduchojemu je omezen na $C_v = 3,8 \text{ bar}$. Jako zařízení pro přípravu tlakového vzduchu je použit kompresor se sušičkou.

Z kompresoru proudí stlačený vzduch přes filtr **15** a jednosměrný ventil **35.1** do řídicího vzduchojemu **33** o objemu $V = 75 \text{ l}$. Ten poskytuje zásobu vzduchu minimálně pro pět plných zabrzdění při poruše všech kompresorů na soupravě. Pro plnění a vypouštění provozní brzdy je použit brzdící **7.1**, respektive odbrzdovací elektropneumatický ventil **7.2**. Tlak z ventilů vstupuje do relé ventilu **2**, který je v tomto případě třístupňový.

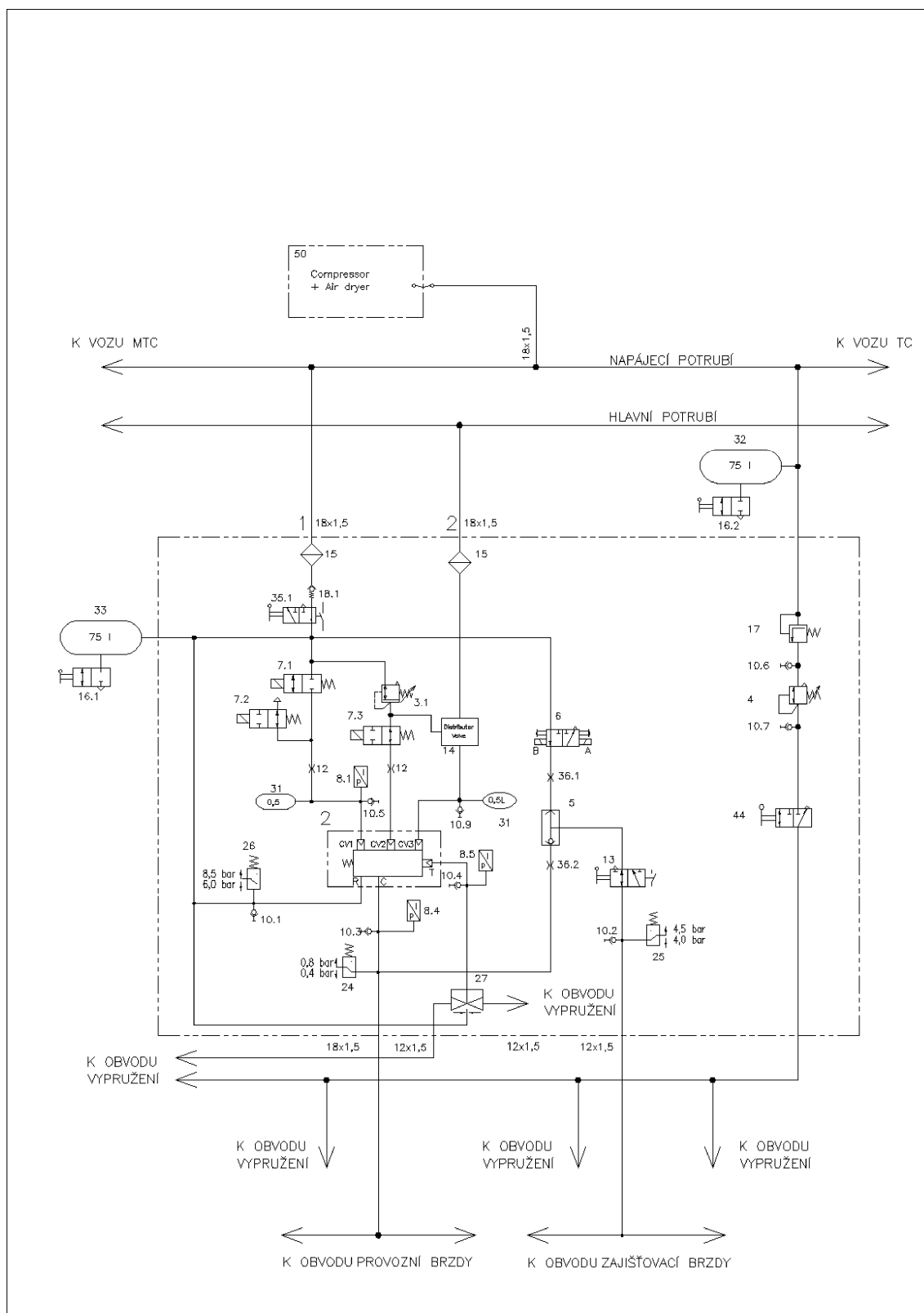
Na rozdíl od metra *MI*, kde je do relé ventilu veden pouze jeden řídicí tlak, a to buď z nouzového a tlakového ventilu při nouzovém brzdění anebo z analogového snímače při provozním brzdění, vstupuje zde do třístupňového ventilu hned čtveřice řídicích tlaků s tlakem napájecím. Při provozním brzdění je to tlak C_{VI} , který přichází právě od zmíněného elektropneumatického ventilu přímočinné pneumatické brzdy, společně s tlakem T , který vystupuje jako řídicí tlak z pneumatického vypružení vozu. Třístupňový relé ventil *DAKO DSV-3* je složením tlakového ventilu a relé ventilu, které známe z metra *MI*. U relé ventilu je zde navíc umístěn vzduchojem o objemu $V = 0,5 \text{ l}$, který zajišťuje přesnější a plynulejší regulaci výstupního brzdícího tlaku C . Ten je veden dále přes uzavírací kohouty, ventily protismykového zařízení a pružné hadice přímo do brzdových válců brzdových jednotek.

Tlak vzduchu v brzdových válcích lze plynule zvyšovat od nulového tlaku do maximálního, přičemž tlak $3,6 \text{ bar}$ je v řídicím vzduchojemu dosaženo zhruba za $4 \pm 1 \text{ s}$. Rychlost plnění je nastavována v elektronické řídicí jednotce. Tlak v řídicím vzduchojemu je kontrolován vnitřním převodníkem proporcionálního ventilu, který poskytuje zpětnou vazbu do řídicího systému a porovnává skutečný tlak v řídicím vzduchojemu s tlakem požadovaným řídicí jednotkou.

Při brzdění pouze pomocí EDB za podmínky, že je její brzdný účinek dostatečný, je brzdící elektropneumatický ventil 7.1 přestaven do uzavřené polohy, čímž umožní vypuštění vzduchu z řídicího okruhu relé ventilu skrze otevřený odbrzd'ovací ventil 7.2. Ten je taktéž ovládán elektronicky. Ve válcích brzdových jednotek tak není žádný tlakový vzduch a EPB nebrzdí. Nastavený tlak vzduchu v řídicím vzduchojemu 33 však zůstává zachován a připraven například pro doplňkové brzdění při příjezdu do stanice.

Klesne-li účinek EDB při nízkých rychlostech na minimum nebo dojde-li z jakýchkoliv důvodů k jejímu vyřazení, například při poruše, přestaví se brzdící elektropneumatický ventil do otevřené polohy a umožní plnění přídavného (relé) ventilu *DSV-3* tlakovým vzduchem, čímž umožní i samotné brzdění. Odbrzd'ovací ventil je v takovémto případě uzavřen. Účinek EPB je možné regulovat na každém z šesti vozů samostatně, podle aktuálního stavu obsazení. Okruh řízení brzdy znázorňuje

Obrázek 30. [7][8]



Obrázek 30: Obvod řízení brzdy [4]

4.1.2 Provozní odbrzdění

Požadavek na odbrzdění vozu dává elektronická řídicí jednotka pomocí proudového signálu obdobným způsobem jako při provozním brzdění. Odbrzdňovací ventil je přestaven do vypouštěcí polohy, čímž dochází ke snížení tlaku v řídicím vzduchojemu v závislosti na požadavku od řídicí jednotky. Odbrzdňovací ventil začne vypouštět vzduch z řídicího vzduchojemu, z okruhu relé ventilu a poté i z válců brzdových jednotek do ovzduší.

Je-li dán požadavek na úplné odbrzdění provozní EPB z maximálního tlaku, dojde k poklesu tlaku v řídicím vzduchojemu z maximální hodnoty $p = 3,8 \text{ bar}$ na minimální hodnotu $p = 0,4 \text{ bar}$ přibližně za $8 \pm 1 \text{ s}$. V takovém případě je hodnota proudového signálu na proporcionálním ventilu nižší než 4 mA . Rychlost poklesu tlaku lze měnit nastavením elektronické řídicí jednotky.

Z obou stran vozidla soupravy Varšava jsou navíc připojeny elektronické ukazatele zabrzdění. Stoupne-li tlak v brzdových válcích na hodnotu $p = 0,3 \text{ bar}$, zareaguje na tuto změnu tlakový spínač 24, který přestaví tyto ukazatele do *červeného pole = brzda zabrzděna*. V takovém případě, tedy při tlaku v brzdách vyšším než $p = 0,3 \text{ bar}$, neumožní řídicí jednotka zařazení trakčních motorů a rozjezd vozu. V opačném případě, klesne-li tlak při odbrzdění pod hodnotu $p = 0,4 \text{ bar}$, což opět registruje tlakový spínač, přestaví se ukazatel do *zeleného pole = brzda odbrzděna*. [7]

4.1.3 Nouzové brzdění

Na každém voze metra *Varšava* je obsažen kromě okruhu brzdy provozní i okruh brzdy nouzové. Nouzová brzda zajišťuje brzdový účinek elektropneumatické brzdy v případě výpadku brzdy dynamické předem stanoveným brzdícím účinkem.

Při nouzovém brzdění je tlakový vzduch směřován přes nouzový elektropneumatický nouzový ventil 7.3, který je plněn tlakem nastaveným redukčním ventilem 3.1. Z nouzového ventilu vstupuje vzduch do přídavného relé ventilu jako řídicí tlak C_{V2} . Pokud je dán požadavek na nouzovou brzdu, je okruh provozní brzdy uzavřen, tj. brzdící a odbrzdňovací ventily provozní brzdy jsou zavřeny.

V relé ventilu je řídicí tlak C_{V2} transformován za pomoci řídicího tlaku T od vypružení, jenž je získán jako aritmetický průměr tlaků z obou podvozků vozu.

O zprůměrování tlaků z regulačních ventilů se stará středotlaký ventil 27. Takto získaný výsledný tlak C (z tlaku $Cv2$ a T) putuje přes ventily protismykového zařízení 104 a 105 přímo do válců brzdových jednotek 107 a 108.

Požadavek na zrušení nouzové brzdy je vyslán elektronickou řídicí jednotkou v podobě přivedení napětí na elektropneumatický ventil nouzové brzdy nebo přestavením ručně ovládaného kohoutu a stlačením ručního ovládacího nouzového ventilu. [7][8]

4.1.4 Zajišťovací brzdění

Zajišťovací brzdění je podobně jako u vozů $M1$ řešeno brzdovou jednotkou se střadačem. Na každém podvozku je pak vždy jedna z brzdových jednotek běžná 108 a jedna vybavená střadačem 107. Pružinová brzda účinkuje pak při snížení tlaku vzduchu v potrubí, čímž dojde k poklesu tlaku i ve střadačovém válci a pružina zatlačí na pákový mechanismus brzdové jednotky. Střadačová zajišťovací brzda je navržena tak, aby splnila požadavek na udržení soupravy na spádu 40 %.

K aktivaci zajišťovací brzdy dochází přes elektromagnetický impulsní ventil 6. V případě elektronického ovládacího je impulsní ventil přestaven do vypouštěcí polohy pomocí přepínače, jenž je umístěn na pultu strojvedoucího. Elektromagnetický impulsní ventil je v odbrzdovací poloze bez proudu. Vzduch se vypouští z brzdových jednotek se střadačovým válcem přes uzavírací kohout 13 a dvojitý zpětný ventil 5 až k impulsní ventilu, odkud je odveden do ovzduší. [8]

4.1.5 Odbrzdění zajišťovací brzdy

Při zaslání požadavku na elektronické odbrzdění zajišťovací brzdy se přestaví elektromagnetický ventil do pozice, v níž uzavře propojení okruhu zajišťovací brzdy se vzduchem a začne napouštět tlakový vzduch do střadačových válců brzdových jednotek. K plnění slouží řídicí vzduchojem 33. Pružina se oddálí a střadačová brzda je odbrzděna a uvedena do pohotovostního stavu.

Řídicí vzduchojem poskytuje dostatečnou zásobu tlakového vzduchu pro minimálně tři odbrzdění zajišťovací brzdy.

Každý vůz je pro případ nutnosti odbrzdění zajišťovací brzdy vybaven navíc mechanickým nouzovým odbrzděním. Je-li brzda zabrzděna a okruh zajišťovací brzdy bez tlakového vzduchu, lze střadačovou brzdou odbrzdit manuálně bowdenem. Po zatažení za táhlo nouzového odbrzdění dojde k uvolnění pák brzdové jednotky a na výstup se nepřenáší žádná síla od pružiny.

Je-li zajišťovací brzda zabrzděna, lze ji opětovně odbrzdit stlačením mechanického ovládání na elektromagnetickém ventilu 6. Ten se přestaví odbrzděné polohy a začne ze vzduchojemu plnit střadačové válce. Pružina se oddálí a uvede do pohotovostního stavu.

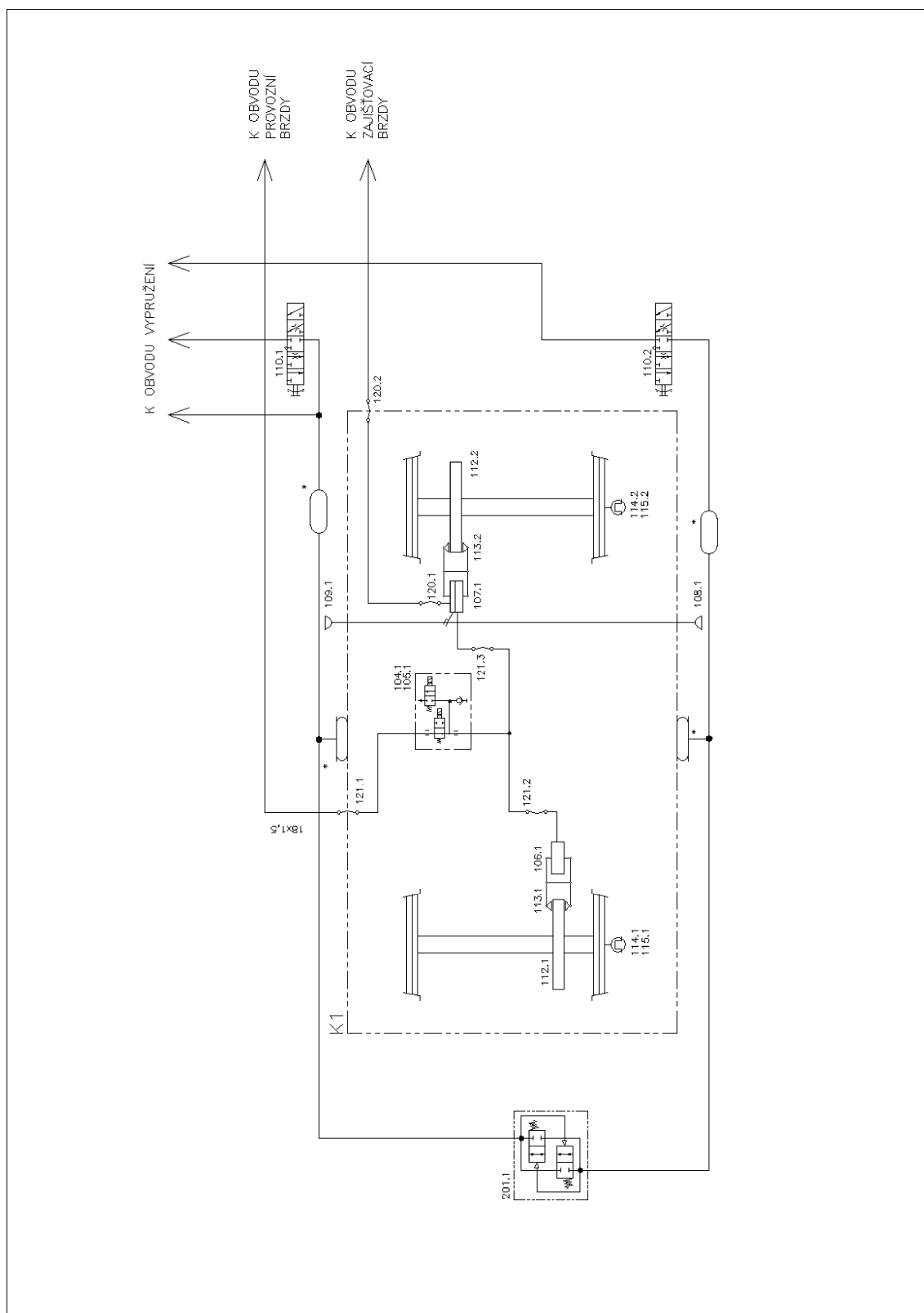
Aby nedocházelo k překrytí účinků provozní a zajišťovací EPB, je v systému vložený dvojitý zpětný ventil 5, který zabraňuje skládání sil a tím i nepřipustnému nárůstu síly na pístnici a dále na brzdové obložení. V případě, že je aktivována zajišťovací brzda a dojde navíc k brzdění provozní brzdou, přestaví se dvojitý zpětný ventil tak, že část vzduchu od provozní brzdy proudí i do střadačových válců a sníží sílu pružiny natolik, že celková síla provozní a zajišťovací brzdy nevzroste nad dovolenou hodnotu.

Pro úplné odpojení zajišťovací brzdy, například při výměně brzdového obložení, slouží uzavírací kohout 13. Ten lze mechanicky uzavřít, čímž při demontáži dílů na podvozku nedojde k vypuštění vzduchu z ostatních brzdových okruhů.

Na výstupní části okruhu zajišťovací brzdy je vložená diagnostická přípojka 36 a tlakový spínač 25, který informuje řídicí jednotku, zda je zabrzděno nebo odbrzděno. Tlakový spínač je nastaven na hodnotu stoupajícího tlaku, kdy je spolehlivě zajištěno odbrzdění střadačové brzdy. Maximální tlak do střadačového válce je nastaven regulátorem.

Podobně jako u provozní brzdy, tak i na okruhu zajišťovací brzdy jsou po stranách vozu umístěny elektronické ukazatele zabrzdění. Při odbrzděné brzdě, kdy tlak ve válcích je vyšší než minimální odbrzdovací tlak, přestaví se tlakový spínač 25 tak, aby bylo viditelné *zelené pole = brzda odbrzděna*. Při poklesu pod minimální odbrzdovací tlak do střadačového válce přestaví spínač ukazatel na *červené pole = brzda zabrzděna*. Zařízení brzdy v podvozku společně s okruhem vypružení ukazuje

Obrázek 31[7][8]



Obrázek 31: Zařízení brzdy v podvozku a obvod vypružení [4]

4.2 Třístupňový relé ventil DAKO DSV-3

Relé ventil (*Obrázek 32*, strana 47) je součástí pneumatické brzdové soustavy používaná především k plynulé a přesné regulaci tlaku v brzdových válcích. U vozů metra *Varšava* je relé ventil třístupňový, což oproti vozům *MI* s relé ventilem *KR6* znamená velký rozdíl. Zatímco ventil *Knorr KR6* je řízený pouze jedním řídicím tlakem z analogového ventilu v případě provozního brzdění, popřípadě z tlakového ventilu při brzdění nouzovém, třístupňový ventil *DAKO DSV-3* má hned čtveřici vstupních řídicích tlaků. V případě provozního brzdění proudí vzduch do relé ventilu z napájecího potrubí klasickou cestou přes brzdící ventil jako řídicí tlak $Cv1$ a společně s řídicím tlakem T od vypružení nastavují napájecí tlak R . V případě nouzového brzdění je místo tlaku $Cv1$ veden do relé ventilu tlak $Cv2$, jenž je přiveden nouzovou smyčkou přes redukční ventil a tlak do brzdových válců je jím nastavován společně s tlakem T .

Čtvrtým vstupem do relé ventilu je tlak $Cv3$. Rozváděč reaguje shodně jako u pneumatické samočinné železniční brzdy na pokles tlaku v hlavním potrubí přestavením do brzdící pozice, kdy vpustí tlak do třístupňového ventilu. Tento proces je doprovázen značnou časovou prodlevou brzd. U železničních vozidel brzděných pneumatickou samočinnou brzdou v režimu nákladní brzdy bez elektrické podpory je tato prodleva přibližně kolem 20 – 28 s, v režimu osobní brzdy 3-5 s. Metro *Varšava* však používá brzdění pomocí rozváděče pouze v situaci, kdy není možné vlak ovládat, tj. například když je vlečen jinou lokomotivou. Tlaky $Cv1$, $Cv2$ a $Cv3$ jsou vedeny zadní stěnou ventilu na jeho jednotlivé písty. Každý píst je opatřen pryžovou membránou.

Relé ventil *Varšavy* pracuje na podobném principu jako výše popisovaný tlakový ventil u metra *MI*. Jde vlastně o pákový mechanismus, jenž funguje obdobně jako kuchyňské váhy. Čím vyšší je tlak puštěný na regulační píst, tím vyšší průřez je pak otevřen druhým pístem a tím vyšší napájecí tlak je pak i pouštěn do válců. Napájecí tlak R , který je přiveden z napájecího potrubí, je ještě zároveň regulován řídicím tlakem T z vypružení. T tlak vstupuje na rozdíl od ostatních řídicích tlaků do ventilu *DSV-3* z boku a přes vratnou pružinu ovládá píst, jenž představuje podpěru na vahadle spojujícím oba písty. Podle obsazení vozu posune tlak od vypružení podporu vpravo či vlevo, čím změní silovou rovnováhu na páce a tím buď navýší nebo naopak sníží vstupní velikost tlaku $Cv1$ ($Cv2$, $Cv3$).

4.3 Protismykové zařízení

Podobně jako starší vozy *M1*, je i metro *Varšava* vybaveno okruhem protismykového zařízení. To je instalováno z důvodu, aby při brzdění soupravy zbytečně nedocházelo k překročení meze adheze mezi kolem a kolejnici. Celé zařízení je obdobné, jako u vozů *SIEMENS M1*; je instalováno na každém podvozku, kde se nachází vypouštěcí ventily **104** a **105**, přičemž každé dvojkolí je pak vybaveno fonickým ozubeným kolem **114** se snímačem otáček **115**. Okruh protismyku je dále vybaven tlakovým spínačem, který je napojen na hlavní potrubí. O řízení protismykového zařízení se stará elektronická řídicí jednotka, jež reguluje brzdění tak, aby se dosáhlo co nejkratších zbrzděných drah při optimálním využití adheze.

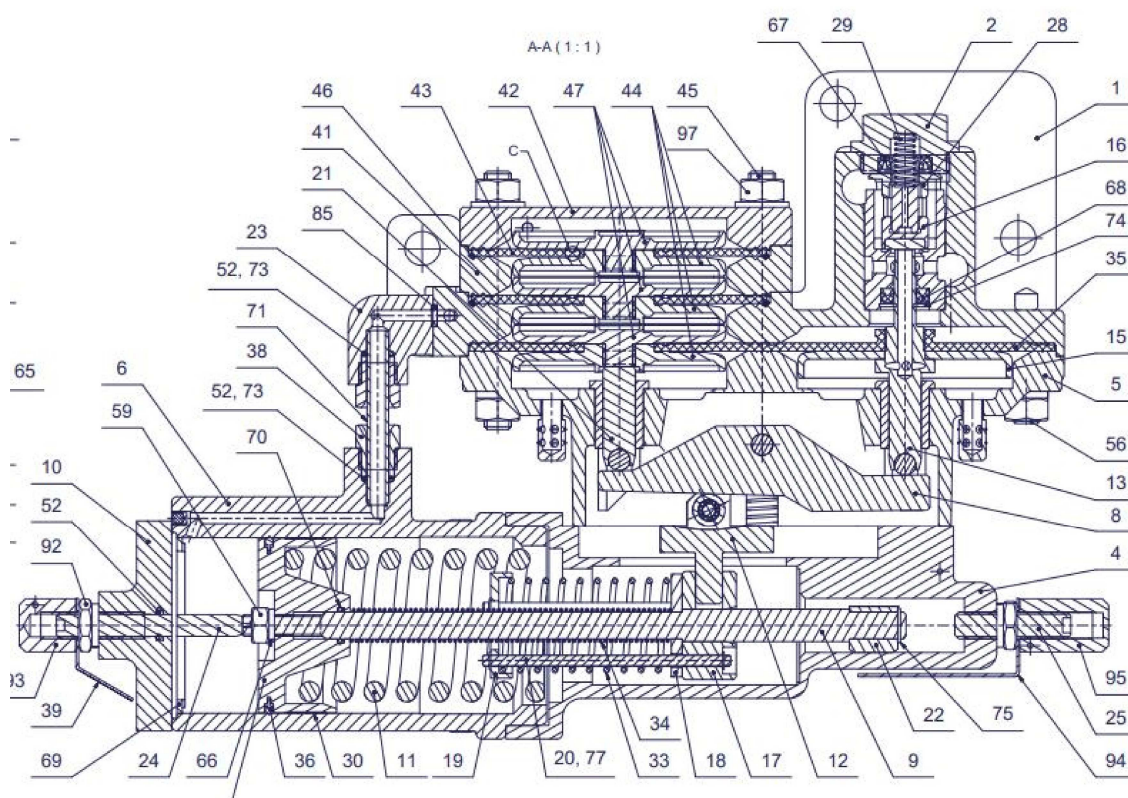
Senzor otáček snímá zuby fonického kola a vysílá napěťové signály do řídicí jednotky, které vyhodnocuje rychlost jednotlivých dvojkolí. Jednotka následně porovná rychlosti všech čtyř dvojkolí na celém voze vůči fiktivní rychlosti vozu. Fiktivní rychlost je získána jako maximální hodnota rychlosti vzata právě z jednotlivých měřených dvojkolí. Při překročení maximální dovolené odchylky rychlostí na dvojkolích pak řídicí jednotka pomocí ovládání elektromagnetických ventilů na podvozcích snižuje brzdnu sílu na jednotlivé nápravy a přizpůsobuje tak brzdění celého vozu skutečným adhezním podmínkám. Toho je docíleno pozvolným nebo rázovým snížením tlaků v brzdových válcích právě pomocí elektromagnetických ventilů. Celé zařízení funguje od nulových otáček fonického kola, tedy od nulové rychlosti vozu.

O signalizaci překročení adhezních poměrů, a tedy o překročení tlaku ve válcích se stará zmíněný tlakový spínač. Ten předává informace o stavu tlaku řídicí jednotce. Stoupne-li hodnota tlaku v hlavním potrubí nad $p = 2,5 \text{ bar}$, zapíná se řídicí jednotka do provozního stavu. Při poklesu tlaku pod tuto hodnotu se řídicí jednotka protismyku vypíná po uplynutí doby, která je v řídicí jednotce nastavená (*od 10 do 60 minut*).

Protismykové zařízení plní kromě bezpečného brzdění ještě další funkce; jedná se zejména o měření ujeté dráhy, hlášení poruchy, diagnostiku systému a další. Protismykové zařízení musí splňovat požadavky norem EN 15595 a UIC 541-05. [7][8]

4.4 Systém vypružení

Okruh vypružení vozu je napojen na napájecí potrubí a plněn přes přepouštěcí ventil **17** a redukční ventil **4**. Celý okruh je možné uzavřít pomocí uzavíracího kohoutu **44**, který lze všechen vzduch ve vypružení vypustit. Výška skříně a tím i tlak v měchu jsou nastavovány ventilem vypružení **110** resp. **111**, který se otevírá či uzavírá přes pákový systém, čímž napouští nebo naopak vypouští měchy. Rozdíl tlaků ve dvojici měchů na podvozku je hlídán diferenciálním ventilem **201**, který je nastaven tak, aby kompenzoval rozdíl tlaků vyšší než $1,5 \text{ bar}$ v sousedících měchách. Z obou podvozků je pak vzduch přiveden do středotlakého ventilu **27**, který vytvoří aritmetický průměr tlaků z protilehlých měchů a takto upravený tlak posílá jako řídicí T tlak do tříступňového relé ventilu (Obrázek 32). [8]



Obrázek 32: Tříступňový ventil DAKO DSV-3 [9]

5 Technické parametry brzdy

Z důvodu následujícího výpočtu je nasnadě uvést nejdříve technické parametry, které by měla elektropneumatická kotoučová brzda pro vůz metra splňovat. Společně s parametry brzdy je třeba uvést i parametry vozu a tratě. Tyto technické parametry uvádí souhrnná *Tabulka 6*.

Provozní rychlost soupravy	$80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
Úhel sklonu trati	0 ‰
Stanovená zábrzdňá vzdálenost při provozním brzdění	215 m
Maximální dovolené odrychlení	$2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Přípustný součinitel adheze	0,15
Dovolené zatížení na dvojkolí vozu	12,5 t
Průměr kola (nové)	850 mm
Průměr kola (opotřebené)	770 mm
Maximální dovolená vzdálenost brzdového kotouče nad kolejnicí	60 mm
Maximální průměr brzdového kotouče	650 mm
Výška zvolené brzdové jednotky	405 mm
Šířka zvolené brzdové jednotky	360 mm
Délka zvolené brzdové jednotky	495 mm
Max. provozní tlak zvolené jednotky	5,4 bar

Tabulka 6: Technické parametry pro výpočet [9]

6 Výpočet brzdy

6.1 Úvod do problematiky výpočtu

Návrh EPB pro vůz metra je velice komplexní záležitost, při které je potřeba zahrnutí velkého množství různých parametrů. Následující část práce se bude věnovat návrhu a výpočtu těchto parametrů, přičemž bude podrobněji popsán postup řešení.

Výpočet bude vycházet z obecného modelu soupravy metra, na kterém bude názorně předvedeno, jakým způsobem se určí potřebný brzdový moment a brzdná síla. Posléze bude zvolena vhodná brzdová jednotka a díky znalostem jejích technických parametrů bude vypočten maximální provozní tlak, který je potřebný pro zastavení vlaku při maximální dovolené hmotnosti soupravy. Kontrolním výpočtem pro brzdovou jednotku bude vlastně porovnání tohoto maximálního provozního tlaku s dovoleným tlakem ve válci, který udává výrobce.

Dále bude zvolen vhodný brzdový kotouč, který bude převádět brzdový moment na dvojkolí. Kontrolním výpočtem bude ověřena dostatečná třecí síla mezi brzdovým kotoučem a nábojem, které jsou spojeny pomocí pevnostních šroubů, načež bude zvolen vhodný utahovací moment. Výpočty vychází ze zdrojů [10][11][12]

6.2 Výpočet základních parametrů vozu

Nejprve je nutné zjistit hmotnost vozu, který bude brzděn, což je důležitý faktor pro další výpočty. Zde je nasnadě vyjít z maximálního dovoleného zatížení na jedno dvojkolí, které je podle normy stanoveno na 12,5 t. Jelikož jeden vůz má dva podvozky a na každém z nich se nachází dvojice náprav (dvojkolí), maximální přípustnou hmotnost vozidla m_v vypočteme z následující rovnice²:

$$m_v = 4 \cdot 12,5 = 50 \text{ t}$$

² Společnost *DAKO-CZ a.s.* počítá u skutečných vozů metra s jejich reálnou hmotností a s maximální obsazeností hmotnostně normovaných cestujících na přepravní plochu. Jednotlivé vozy soupravy jsou však nestejně těžké kvůli různě rozmístěným komponentám, a proto je v práci zvolen zjednodušený výpočet hmotnosti, který je na straně bezpečnosti.

Jedním z požadavků na brzdění vozu je vyhnout se oblasti smyku kol. Tohoto požadavku je docíleno brzděním pod tzv. mezí adheze. To znamená, že dvojkolí se při brzdění budou vždy otáčet, a nikoliv se pouze smýkat po povrchu kolejnice. Nápravy jsou z tohoto důvodu vybaveny protismykovým zařízením, které zabraňuje nežádoucímu smyku kol. Při výpočtu však je nutné zahrnout do brzděné celkové hmotnosti vozu hmotnost rotujících součástí, kterými jsou například dvojkolí, motor, převodovka, brzdový kotouč a další komponenty podvozku. Toho lze docílit uvažováním součinitele rotačních hmot δ , díky němuž je možné získat tzv. redukovanou hmotnost vozu³. Ta zahrnuje jak hmotu statickou, tak i rotační:

$$m_{red} = m_v \cdot \delta = 50 \cdot 1,10 = 55 \text{ t} \quad (1)$$

Dále je možné vypočítat celkovou kinetickou energii E_k , kterou bude mít plně zatížený vůz při maximální dovolené rychlosti. Maximální rychlost pro jednotku metra je stanovena na $v_{max} = 80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Rychlost je nutné přepočítat na jednotky SI:

$$v_{max} = \frac{80}{3,6} = 22,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (2)$$

Kinetická energie je součinem hybnosti a diferenciálu rychlosti. Hybnost lze dále vyjádřit jako součin redukované hmotnosti a rychlosti. Po integraci dosadíme za horní mez $v_2 = v_{max}$, tedy počáteční rychlost, ze které bude vůz brzděn a za dolní mez v_1 , tedy rychlost, na kterou se bude zpomalovat. Zde $v_1 = 0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, jelikož vůz bude zcela zastaven. Celková kinetická energie jednoho vozu se pak určí vztahem:

$$E_k = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv = \int_{v_1}^{v_2} m_{red} \cdot v \cdot dv = \frac{1}{2} \cdot m_{red} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (3)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_{red} \cdot (v_{max}^2 - 0) = \frac{1}{2} \cdot 55 \cdot 10^3 \cdot 22,2^2 = 13\,580\,247 \text{ J}$$

³ Součinitele rotačních hmot lze složitě dopočítat přes hmotnosti rotujících součástí a jejich momenty setrvačnosti, často se však používá empirický odhad pohybující se v rozmezí hodnot: $\delta = 1,05 \div 1,20$.

V dalším kroku je třeba stanovit sílu potřebnou pro zastavení vozu, kde lze využít právě kinetické energie. Energie je zde z fyzikálního pohledu rovna práci. V tomto případě je tedy možné položit kinetickou energii rovnu brzděné práci, tj. práci, která je třeba vykonat pro zastavení jednoho vozu metra. Práce je dále definována jako síla, jež působí na určitém elementu dráhy ds .

$$E_k = A_B = \int_0^{l_B} (F_B + O) \cdot ds \quad (4)$$

6.3 Výpočet brzděné dráhy

Naší silou bude potřebná brzděná síla F_B a dráhou maximální dovolená zábrzděná vzdálenost podle *UIC* $l = 215 \text{ m}$, na niž musí souprava zastavit, zmenšená o vzdálenost l_0 , kterou ujede, než začne brzdit. Skutečná brzděná dráha vozu bude tedy l_B . Čas zpoždění brzd t_0 se spočte jako součet reakční doby t_r a času plnění brzd t_p . Vzdálenost l_0 , kterou vůz ujede za dobu, než začne skutečně brzdit se vyjádří jako součin maximální rychlosti, ze které se bude brzdit v_{max} a času zpoždění brzd t_0 . Hodnoty zábrzděných vzdáleností uvádí *Tabulka 7*.

$$t_0 = t_r + \frac{1}{2}t_p = 0,5 + \frac{1}{2} \cdot 2 = 1,5 \text{ s} \quad (5)$$

$$l_0 = v_{max} \cdot t_0 = 22,2 \cdot 1,5 = 33,3 \text{ m} \quad (6)$$

$$l_B = l - l_0 = 215 - 33,3 = 181,7 \text{ m} \quad (7)$$

Výchozí rychlost jízdy vlaku	Rychločinné brzdění EPB	Nouzové brzdění EPB	Brzdění pomocí EDB
$50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	90 m	90 m	110 m
$90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	215 m	215 m	265 m

Tabulka 7: Zábrzděné vzdálenosti podle typu brzdění [10]

Zde je důležité podotknout, že při výpočtu brzdy budou zanedbány celkové jízdní odpory O , čímž lze uměle docílit navýšení bezpečnosti. Jízdní odpory zahrnují jednak odpory vozidla O_v a také odpory tratě O_t . V případě soupravy metra jsou odpory vozidla odpor vzduchu O_{vzd} , odpor valení kol O_f a další ztráty na hnací soustavě; ztráty v ložiskách, ztráty na ozubeném převodu aj. Mezi traťové odpory patří odpor tunelu O_{tun} , odpor průjezdu obloukem O_r , a především pak odpor ze stoupání O_α .⁴

6.4 Výpočet potřebné brzdné síly

Náš zjednodušený vztah bez jízdních odporů pak tedy bude vypadat pouze takto:

$$\int_0^{l_B} F_B \cdot ds = F_B \cdot [s]_0^{l_B} = F_B \cdot (l_B - 0) = F_B \cdot l_B \quad (8)$$

Odtud již je možné vyjádřit potřebnou brzdou sílu F_B jako podíl brzdné práce a zábrzdné vzdálenosti:

$$F_B = \frac{A_B}{l_B} = \frac{13\,580\,247}{181,7} = 74\,753\,N \quad (9)$$

6.5 Kontrola součinitele meze adheze

Dále je nutné zkontrolovat, zda při brzdění s maximálním zatížením a tím pádem i s maximální brzdou silou nedojde k již zmíněné meze adheze. Tu určuje především součinitel meze adheze, který je pro brzdění vozu metra stanoven na $\mu = 0,15$ (ocelové kolo na ocelovou kolejnici). Kontrola je provedena podle vztahu 10:

$$\mu_B = \frac{F_B}{G_v} = \frac{F_B}{m_v \cdot g \cdot 10^3} = \frac{74\,753}{50 \cdot 9,81 \cdot 10^3} = 0,152 \quad (10)$$

$$\mu_B \approx \mu$$

⁴ Odporu ze stoupání, respektive klesání, by měla být při výpočtu skutečného metra věnována zvláštní pozornost. Výpočet v práci bude proveden na rovinném úseku, tj. $\alpha = 0\%$ a odpor ze stoupání či klesání je tedy roven taktéž nule. Maximální možný sklon trati pro metro je však již zmíněných 40% , což může při jízdě z klesání negativně ovlivnit potřebnou brzdou sílu a tím i výslednou brzdou vzdálenost.

6.6 Výpočet sil působících na brzdový kotouč a dvojkolí

Jelikož vůz metra má dva podvozky a na každém z nich dvě dvojkolí, je třeba rozdělit souměrně brzdou sílu na každé dvojkolí:

$$F_{Bdv} = \frac{F_B}{4} = \frac{74\,753}{4} = 18\,688\,N \quad (11)$$

Dvojkolí bude brzděno kotoučovou brzdou. U ní je třeba stanovit tzv. střední průměr (poloměr) brzdění, který bude poté potřebný pro stanovení brzdě síly na kotouči. Pro soupravu metra volím brzdový kotouč *KOVIS OZ640/110/150 TSK0 196H6* (Obrázek 33 strana 55), jehož technické parametry uvádí následující *Tabulka 8*.

Velký průměr kotouče	640 mm
Malý průměr kotouče	348 mm
Průměr díry v náboji	196 mm
Tolerance díry v náboji	H6
Šířka kotouče	110 mm
Šířka náboje	150 mm
Použité šrouby	12xM14
Hmotnost	133,4 kg

Tabulka 8: Technické parametry brzdového kotouče KOVIS OZ640 [9]

Střední průměr se stanoví jednoduše jako polovina rozdílu maximálního a minimálního brzdícího průměru kotouče dle vztahu 12.

$$d_{k_{stř}} = \frac{d_{k_{max}} - d_{k_{min}}}{2} = \frac{640 - 348}{2} = 494\,mm \quad (12)$$

Následně z momentové rovnováhy mezi dvojkolím a brzdovým kotoučem stanovíme normálovou brzdou sílu F_{BN} působící na kotouč.

$$F_{BT} \cdot r_{k_{stř}} = F_{Bdv} \cdot r_K \quad (13)$$

Tečnou sílu vyjádříme jako součin síly normálové F_{BN} a součinitele tření f . Pro vůz metra volím kotoučovou brzdovou jednotku *DAKO KKBA 140 400* (Obrázek 34 strana 55), která lze použít pro zvolený velký průměr brzdového kotouče. Technické parametry brzdové jednotky uvádí *Tabulka 9*.

Plocha pístu provozní brzdy	153,94 cm ²
Plocha pístu parkovací brzdy	199,30 cm ²
Průměr pístu provozní brzdy	140 mm
Provozní zdvih pístu	40 mm
Maximální zdvih pístu	47 mm
Zdvihový objem válce	0,62 dm ³
Maximální provozní tlak ve válci	5,4 bar
Minimální tlak ve střadačovém válci	4,8 bar
Maximální dovolený tlak	6 bar
Síla vratné pružiny	550 N
Brzdový kotouč	D 640x110 mm
Brzdové obložení	400 cm ²
Maximální převod	13,55
Účinnost převodu	0,92
Hmotnost	100 kg
Provozní teplota	-40°C ÷ +80°C

Tabulka 9: Technické parametry brzdové jednotky *DAKO KKBA 140* [9]

Do brzdové jednotky volím předepsané brzdové obložení o třecí ploše $S_{Bo} = 400 \text{ cm}^2$ z materiálu o součiniteli tření $f = 0,35$. Průměr nového kola vozu metra je $d_K = 850 \text{ mm}$. Výsledná normálová síla je tedy:

$$F_{BN} \cdot f \cdot r_{k_{stř}} = F_{Bdv} \cdot r_K \quad (14)$$

$$F_{BN} = \frac{F_{Bdv} \cdot r_K}{f \cdot r_{k_{stř}}} = \frac{18\,688 \cdot 425}{0,35 \cdot 247} = 91\,875 \text{ N}$$



Obrázek 33: Brzdový kotouč KOVIS OZ640 [9]



Obrázek 34: Brzdová jednotka DAKO KKBA 140 [9]

Zpětně lze ještě dopočítat výsledný brzdový moment M_{Bdv} , který musí brzdový kotouč přenést na hřídel dvojkolí. Moment je roven součinu brzdění síly na dvojkolí F_{Bdv} a poloměru brzděného kola vozu r_K :

$$M_{Bdv} = F_{Bdv} \cdot r_K = 18\,688 \cdot 0,425 = 7\,942 \text{ Nm} \quad (15)$$

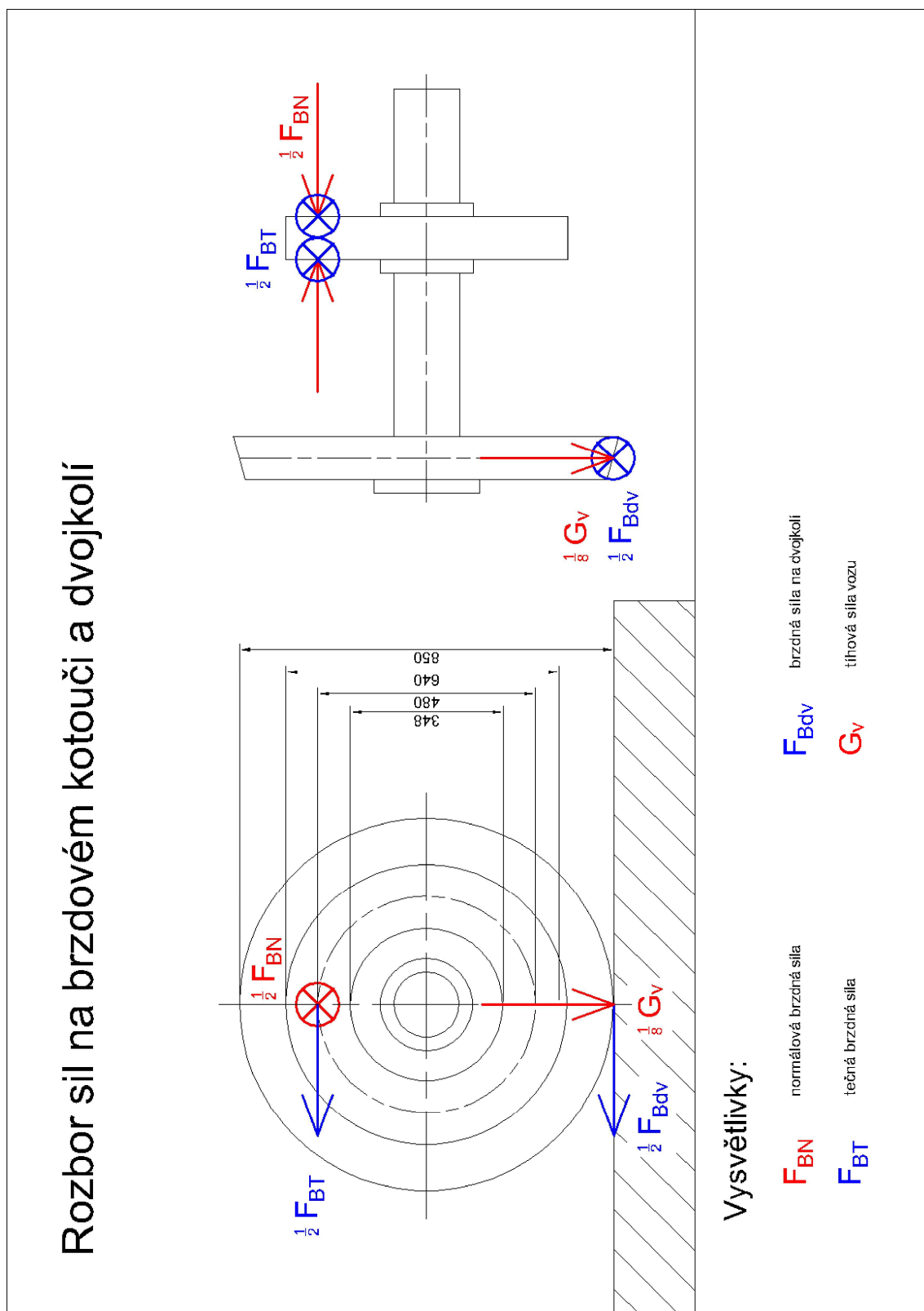
Případně je možné vypočítat brzdový moment i pomocí třecí síly F_{BT} působící na kotouč a jeho středního poloměru $r_{kstiř}$. Brzdový moment bude potřebný pro další výpočty, například, pro dimenzování pevnostních šroubů spojujících brzdový kotouč s nábojem.

Tlak, kterým je přitlačované brzdové obložení na kotouč je určen ze vztahu 16:

$$p_{Bo} = \frac{F_{BN}}{S_{Bo}} = \frac{91\,875}{40\,000} = 2,36 \text{ MPa} \quad (16)$$

Rozbor sil působících na dvojkolí a brzdový kotouč (momentovou rovnováhu) znázorňuje

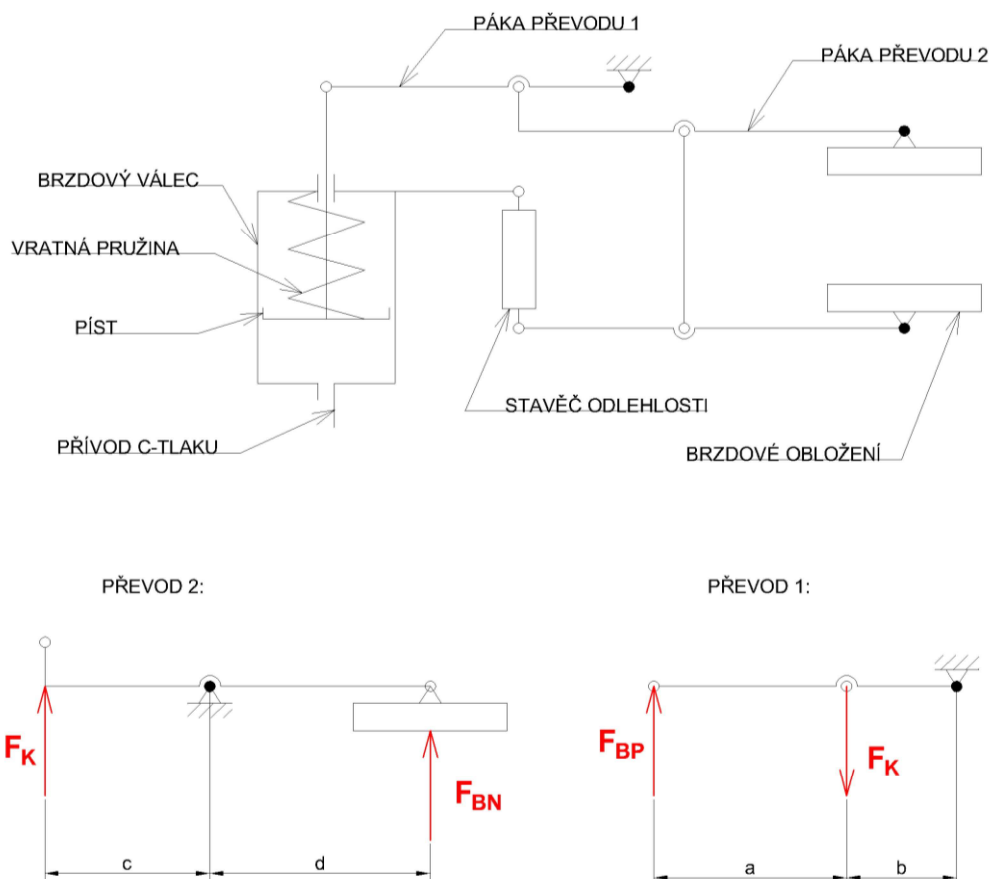
Obrázek 35 na straně 57.



Obrázek 35: Rozbor sil na brzdovém kotouči a dvojkolí

6.7 Výpočet potřebného tlaku ve válci

Síla tlakového vzduchu, která musí působit na píst, se vyjádří z momentové rovnováhy na brzdových kleštinách (Obrázek 36). Jedná se o mechanismus s dvojicí pák, jenž byl detailněji popsán v kapitole zařízení brzd v podvozku.



Obrázek 36: Rozbor sil v brzdové jednotce KKBA

$$M_A: F_{BN} \cdot d - F_K \cdot c = 0$$

$$M_A: F_K \cdot b - F_{BP} \cdot (a + b) = 0$$

$$F_K = \frac{F_{BN} \cdot d}{c}$$

$$F_{BP} = \frac{F_K \cdot b}{a + b}$$

$$F_{BP} = \frac{F_{BN} \cdot d \cdot b}{c \cdot (a + b)} \quad (17)$$

Pro zjednodušení nahradíme podíl součinů délek ve jmenovateli a čitateli ve vztahu 17 celkovým převodem zvolené brzdové jednotky *DAKO KKBA 140 400*: $i_j = 13,55$. V neposlední řadě je třeba zahrnout do výsledku ještě účinnost převodu brzdové jednotky, která je stanovena výrobcem na $\eta_j = 0,92$. Nutné je ještě počítat s disipací energie, jež je zmařena k překonání tlaku vratné pružiny ve válci jednotky $F_{pruž} = 500 \text{ N}$.

$$F_{BP} = \frac{F_{BN} + F_{pruž}}{i_j \cdot \eta_j} = \frac{94\,475 + 500}{13,55 \cdot 0,92} = 7\,410 \text{ N} \quad (18)$$

$$p_{BV} = \frac{F_{BP}}{S_{BP}} = \frac{7\,410}{15\,394} = 0,481 \text{ MPa} \quad (19)$$

$$p_{BV} = 4,81 \text{ bar}$$

7 Kontrola šroubů brzdového kotouče

Tato část práce bude věnována návrhu brzdového kotouče a jeho součástí. Brzdový kotouč je s nábojem spojen pomocí několika šroubů tvořících kruhové šroubové pole. Šrouby je pak přenášen brzdový moment dvojkolí M_B vzniklý přitlačením brzdového obložení ke kotouči. Brzdový kotouč se při nouzovém brzdění z velkých rychlostí poměrně hodně zahřívá (teploty kolem $360\text{ }^\circ\text{C}$), a tudíž u něj dochází k rozměrovým změnám. Je tedy zcela nevhodné použít pro spojení disku s nábojem lícované šrouby s přesným uložením, neboť by právě důsledkem oteplení kotouče mohlo dojít k roztržení děr pro šrouby. Z této úvahy plyne tedy fakt, že není možné použít šroubového spoje takovým způsobem, aby byly šrouby namáhány na stříh. Přenos brzdového momentu z dvojkolí na kotouč proto musí být realizován pouze přes třecí sílu mezi třecí částí kotouče, jeho nábojem a příložkou. Vyvolání potřebné třecí síly lze docílit správným utahovacím momentem na šroubech kotouče za pomoci momentového klíče. Pro kotouč je navrženo šroubové pole o dvanácti šroubech $M14$ pevnostní třídy 8.8.

7.1 Výpočet sil působících na šrouby

Nejprve je třeba spočítat sílu, která na šroub působí v tečné rovině. Zde tečná síla na šroub vychází z brzdného momentu na dvojkolí M_{Bdv} a poloměru roztečné kružnice šroubového pole $r_{kš}$:

$$F_{Tš} = \frac{M_{Bdv}}{r_{kš}} = \frac{7\,942}{134 \cdot 10^{-3}} = 59\,268\text{ N} \quad (20)$$

Dále je možné z třecí síly přes součinitel tření pod maticí vyjádřit normálovou sílu $F_{Nš}$, která vznikne po dotažení šroubu. Šroub bude zatěžován tahovou silou, matice silou tlakovou. Potřebná normálová síla se rozdělí mezi počet šroubů v poli $i = 12$.

$$F_{Nš} = \frac{F_{Tš}}{i \cdot f_M} = \frac{59\,268}{12 \cdot 0,2} = 24\,695\text{ N} \quad (21)$$

7.2 Výpočet potřebného utahovacího momentu

Potřebný moment na klíči M_{KK} je roven součtu momentu v závitech M_Z a třecího momentu pod maticí M_{TM} . Stanoví se z následující rovnice:

$$M_{KK} = M_Z + M_{TM} \quad (22)$$

$$M_{KK} = F_{N\dot{s}} \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') + F_{N\dot{s}} \cdot f_M \cdot \rho_M \quad (23)$$

$$M_{KK} = F_{N\dot{s}} \left(\frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') + f_M \cdot 0,75 \cdot s \right)$$

$$M_{KK} = 24\,695 \left(\frac{12,7}{2} \cdot \operatorname{tg}(7,75^\circ + 6,84^\circ) + 0,2 \cdot 0,75 \cdot 21 \right) = 119 \text{ Nm}$$

M_{KK} je předběžný utahovací moment na klíči potřebný k vyvolání minimální třecí síly $F_{T\dot{s}}$, d_2 je střední průměr závitu šroubu $M14 \times 2$, γ úhel stoupání při dané rozteči, φ' třecí úhel a ρ_M třecí poloměr šestihřanné matice 14 .⁵ Pro větší předeprnutí šroubů je možné navýšit moment na klíči přibližně o $(5 \div 10)$ %. Výsledný utahovací moment šroubů bude tedy odpovídat hodnotě:

$$M_{KK} = 130 \text{ Nm}$$

⁵ Třecí poloměr matice je určen jako $\frac{3}{4}$ rozměru pro klíč s , třecí úhel φ' je určen jako *tangens* zvoleného součinitele tření $f' = 0,12$.

8 Závěr

V práci byla provedena rešerše o dvou různých vlcích metra, z nichž každé má rozdílnou koncepci elektropneumatického brzdového systému. V práci bylo též vysvětleno, jakým způsobem elektropneumatické brzdy jednotlivých souprav fungují, ať už se jedná o brzdu provozní, nouzovou nebo zajišťovací a jaké technické parametry musí jednotlivé druhy brzdění splňovat.

Společně s okruhem brzdy byly popsány i další okruhy, které jsou nezbytné pro správnou funkci EPB. Jedná se zejména o přípravu tlakového vzduchu a o vzduchové vypružení, jejichž funkce byla v práci vysvětlena.

Hlavním cílem práce byl výpočet a návrh třecí brzdy pro obecný vůz metra. Zde byla zvolena vhodná brzdová jednotka *DAKO KKBA* a brzdový kotouč *KOVIS*. Následně byl vypočten potřebný tlak v brzdovém válci jednotky, který by vůz potřeboval pro zastavení z rychlosti $v = 80 \text{ km/h}$ na rovném úseku a zábrzdné vzdálenosti $l = 215 \text{ m}$. Nutno však podotknout, že takto vysokým tlakem souprava prakticky brzdit nebude, pouze v případě, dojde-li k výpadku EDB. Tlak při dobrzdování, na které je EPB používána, bývá zpravidla nižší kvůli nižším rychlostem ($v = 10 \text{ km/h}$).

Na závěr práce byl vytvořen sestavný výkres dvojkolí s brzdovým kotoučem a s brzdovou jednotkou, který je uvedený v příloze.



Obrázek 37: Model dvojkolí s brzdovým kotoučem a brzdovou jednotkou

9 Seznam použitých veličin

Značka	Jednotka	Popis
α	[°]	Úhel stoupání tratě
A_B	[J]	Brzdná práce
γ	[°]	Úhel stoupání závitu šroubu
δ	[1]	Součinitel rotačních hmot
d_2	[mm]	Střední průměr závitu šroubu
$d_{k_{max}}$	[mm]	Velký průměr brzdového kotouče
$d_{k_{min}}$	[mm]	Malý průměr brzdového kotouče
$d_{k_{stř}}$	[mm]	Střední průměr brzdového kotouče
η_j	[1]	Účinnost převodu brzdové jednotky
E_k	[J]	Kinetická energie
φ'	[°]	Třecí úhel závitu
f	[1]	Součinitel tření
f'	[1]	Součinitel tření závitu
f_M	[1]	Součinitel tření pod maticí
F_B	[N]	Brzdná síla vozu
F_{BN}	[N]	Normálová brzdná síla
F_{BP}	[N]	Síla působící na píst brzdové jednotky
F_{BT}	[N]	Tečná brzdná síla
F_{Bdv}	[N]	Brzdná síla dvojkolí
$F_{Nš}$	[N]	Normálová tahová síla působící na šroub
$F_{pruž}$	[N]	Síla střadačové pružiny
$F_{Tš}$	[N]	Tečná střižná síla působící na šroub
g	[m · s ⁻¹]	Tíhové zrychlení
G_v	[N]	Tíhová síla vozu
i	[1]	Počet šroubů na brzdovém kotouči
i_j	[1]	Převod brzdové jednotky
l	[m]	Zábrzdná dráha podle UIC
l_0	[m]	Dráha absence brzdného účinku
l_B	[m]	Brzdná dráha
M_{Bdv}	[Nm]	Brzdný moment dvojkolí

M_{KK}	[Nm]	Utahovací moment šroubu
m_{red}	[kg]	Redukovaná hmotnost vozu
M_{TM}	[Nm]	Třecí moment pod maticí
m_v	[kg]	Hmotnost vozu
M_Z	[Nm]	Moment v závitech
O	[N]	Jízdní odpory
p	[kg · m · s ⁻¹]	Hybnost
p_{Bo}	[MPa]	Tlak na brzdové obložení
p_{BV}	[MPa]	Tlak ve válci brzdové jednotky
ρ_M	[mm]	Třecí poloměr matice
r_K	[mm]	Poloměr kola
$r_{kstř}$	[mm]	Střední poloměr brzdového kotouče
$r_{kš}$	[mm]	Poloměr roztečná kružnice šroubového pole
s	[mm]	Rozměr klíče
S_{Bo}	[cm ²]	Třecí plocha brzdového obložení
S_{BP}	[cm ²]	Plocha pístu brzdové jednotky
t_0	[s]	Doba zpoždění brzd
t_p	[s]	Doba plnění brzd
t_r	[s]	Reakční doba
v_{max}	[m · s ⁻¹]	Maximální dovolená rychlost vozu

10 Seznam použité literatury

- [1] KNORR-BREMSE. *Školení na elektropneumatický brzdový systém metro Praha*. Berlín, 2006.
- [2] KNORR-BREMSE. *Stručný technický popis mech. části brzd a přídavných vzduch. zařízení pro pražské metro*.
- [3] KNORR-BREMSE. *Popis technického systému třecí brzdy pro pražské metro*. Mnichov, 1991.
- [4] ČKD. *Schéma pneumatického zapojení M1*. Praha, 1997.
- [5] SIEMENS, s.r.o. *Subsystemy a přístroje vlaku řady M1 – Část 9.2.1 – Popis brzdové řídicí jednotky KBGM-P*. Praha, 2001.
- [6] SIEMENS, s.r.o. *Subsystemy a přístroje vlaku řady M1 – Část 9.2.3 – Brzdové klešťové jednotky – Popis zařízení*. Praha, 2000.
- [7] DAKO-CZ. *Popis k brzdovému schématu 97001-555 – Metro Varšava*. Třemošnice, 2010.
- [8] DAKO-CZ. *Jednopotrubní pneumatická brzda DAKO pro metro Varšava*. Třemošnice, 2010.
- [9] Poznatky, informace a vědomosti získané během konzultace ve společnosti *DAKO-CZ a.s.*
- [10] Zápisky z přednášek. *Úvod do dopravní techniky*. (UDT) – doc. Josef Kolář
- [11] Zápisky z přednášek. *Části a mechanismy strojů 1*. (ČMS 1) – prof. Vojtěch Dinybyl
- [12] KUNA, Michal. *Návrh systému brzd vozidel metra*. Pardubice, 2012. Diplomová práce. Univerzita Pardubice. Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Jiří Pohl.
- [13]
- [14] Katalog JURID – Friction Materials (PDF). BIBUS s.r.o. [online]. Glinde, 2011 [cit. 2018-04-12].
Dostupné z: http://new.bibus.cz/pdf/Jurid/JURID_Friction_Materials.pdf
- [15] KUBEC, Jiří. *Brzdová výstroj nových železničních vozů ČSD*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1981.

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Blokové schéma SIEMENS M1	5
Obrázek 2: Zařízení pro výrobu tlakového vzduchu	6
Obrázek 3: Struktura mikrofiltru [1]	8
Obrázek 5: Zpětný ventil [1]	9
Obrázek 4: Instalace mikrofiltru na podvozku vozu M1	9
Obrázek 6: Bezpečnostní ventil ve dvou pozicích [1].....	10
Obrázek 7: Diagnostická přípojka ve třech pozicích [1].....	11
Obrázek 8: Zařízení pro přípravu tlakového vzduchu M1 [4].....	12
Obrázek 9: Odstředivý vzduchový filtr (v pohledu a v řezu) [1]	13
Obrázek 10: Rozváděč KNORR-BREMSE EP-BGE-48	14
Obrázek 11: Popisek relé ventilu.....	14
Obrázek 12: Obvod řízení brzdy M1 [4]	15
Obrázek 13: Tlakový snímač DG4-TC [1].....	18
Obrázek 14: Magnetický nouzový ventil (nenabuzený a nabuzený).....	19
Obrázek 15: Tlakový ventil DBV-3E.....	20
Obrázek 16: Impulsní magnetický ventil (nenabuzený a nabuzený) [1].....	23
Obrázek 17: Obvod zajišťovací brzdy M1 [4].....	25
Obrázek 18: Brzdová kotoučová jednotka WZ10P02 [6]	26
Obrázek 19: Zařízení brzdy v podvozku M1 [4]	27
Obrázek 20: Funkce jednotky WZ10P02 [1].....	29
Obrázek 21: Detail brzdové jednotky	29
Obrázek 22 - Ventil protismykového zařízení [1].....	31
Obrázek 23: Vypružení podvozku.....	32
Obrázek 24: Ventil vypružení ve třech pozicích (uzavřen, plnění, vypouštění)	32
Obrázek 25: Vypružení ve třech pozicích	33
Obrázek 26: Charakteristika ventilu vypružení	33
Obrázek 27: Systém vypružení podvozku M1	34
Obrázek 28: Obvod vypružení M1 [4].....	35
Obrázek 29: Blokové schéma ŠKODA Varšava	37
Obrázek 30: Obvod řízení brzdy [4].....	40
Obrázek 31: Zařízení brzdy v podvozku a obvod vypružení [4].....	44

Obrázek 32: Třístupňový ventil DAKO DSV-3 [9]	47
Obrázek 33: Brzdový kotouč KOVIS OZ640	55
Obrázek 34: Brzdová jednotka DAKO KKBA 140	55
Obrázek 35: Rozbor sil na brzdovém kotouči a dvojkolí	57
Obrázek 36: Rozbor sil v brzdové jednotce KKBA	58
Obrázek 37: Model dvojkolí s brzdovým kotoučem a brzdovou jednotkou	62

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické parametry mikrofiltru OEF 1 [1]	8
Tabulka 2: Hodnoty pro provozní brzdění vozu M1 – 100 % brzdňý požadavek [5].....	21
Tabulka 3: Hodnoty pro provozní brzdění vozu M1 – 85 % brzdňý požadavek [5].....	21
Tabulka 4: Hodnoty pro stání vozu M1 – 70 % brzdňý požadavek [5]	21
Tabulka 5: Technické parametry materiálu obložení [14].....	28
Tabulka 6: Technické parametry pro výpočet [9]	48
Tabulka 7: Zábrzdňé vzdálenosti podle typu brzdění [10].....	51
Tabulka 8: Technické parametry brzdového kotouče KOVIS OZ640 [9]	53
Tabulka 9: Technické parametry brzdové jednotky DAKO KKBA 140 [9].....	54

13 Seznam grafů

Graf 1: Koroze [1]	7
Graf 2: Charakteristika tlakového snímače [1].....	18

14 Seznam příloh

Sestavný výkres dvojkolí s brzdovým kotoučem a jednotkou	01-437745-BP-00
Kusovník	01-437745-BP-K