



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VÝVOJ MAZACÍ JEDNOTKY PRO MODERNÍ KOLEJOVÁ VOZIDLA

DEVELOPMENT OF A LUBRICATION UNIT FOR ADVANCED ROLLING STOCK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kolínek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Valena, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Jakub Kolínek**
Studijní program: Konstrukční inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Martin Valena, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vývoj mazací jednotky pro moderní kolejová vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Mazání okolků a temene kolejnice je účinnou metodou snížení hluku, tření a opotřebení v kolejové dopravě. U moderních kolejových vozidel (vlakových jednotek, tramvají a vozů metra) jsou kladeny stále větší požadavky na energetickou náročnost a spolehlivost aplikace maziva. Pokročilé systémy řízení zase vyžadují přesné dávkování s proměnlivými parametry. Projekt je zaměřen na vývoj nové generace bezvzduchové mazací jednotky, která bude tyto požadavky splňovat.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je vyvinout palubní jednotku pro mazání okolků kolejového vozidla nebo temene kolejnice bez použití tlakového vzduchu, s možností řízené změny dávky a se zpětnou kontrolou aplikace. Jednotka je určena pro moderní vlakové jednotky ve spojení s inteligentním řízením.

Dílčí cíle diplomové práce:

- rešerše komerčně dostupných jednotek a patentovaných řešení,
- návrh technického řešení,
- experimentální vývoj a volba vhodných komponent,
- příprava vybrané výkresové dokumentace, realizace zařízení na úrovni funkčního vzorku a jeho testování.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

LEWIS, Roger a Ulf OLOFSSON. Wheel-rail interface handbook. 1st pub. Cambridge: Boca Raton: Woodhead ; CRC Press, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.

STOCK, Richard, Louisa STANLAKE, Chris HARDWICK, Marcia YU, Donald EADIE a Roger LEWIS. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. Wear. 2016, roč. 366–367, s. 225–232. ISSN 00431648.

WHITE, Ben, Zing Siang LEE a Roger LEWIS. Towards a Standard Approach for the Twin Disc Testing of Top-Of Rail Friction Management Products. Lubricants. 2022, roč. 10, č. 6, s. 124. ISSN 2075-4442.

KHAN, Saad Ahmed, Jan LUNDBERG, C STENSTROM a Christer STENSTRÖM. Carry distance of top-of-rail friction modifiers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F- Journal of Rail and Rapid Transit. 2018, roč. 232, č. 10, s. 2418–2430. ISSN 20413017.

CURLEY, D, D C ANDERSON, J JIANG a D HANSON. Field Trials of Gauge Face Lubrication and Top-of-Rail Friction Modification for Curve Noise Mitigation. In: Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. 2015, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, s. 449–456.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vývojem bezvzduché mazací jednotky určené hlavně pro mazání okolků tramvajových vozidel. Tramvaje zpravidla nedisponují centrálním rozvodem stlačeného vzduchu, a instalace kompresoru pouze pro účely mazání je v omezeném prostoru podvozku konstrukčně nevýhodná. Bezvzduchá koncepce, která mazivo dává elektromechanicky přímo v mazací hlavě, tuto závislost odstraňuje.

Vývoj jednotky probíhal ve třech fázích, přičemž první dvě zahrnovaly experimentální testování na funkčních vzorcích. První vzorek (Gfunk1) ověřil základní princip dávkování a umožnil stanovení provozního pracovního okna v závislosti na teplotě maziva a geometrii trysky. Druhý vzorek (Gfunk2) rozšířil funkčnost o solenoidový dělič proudu maziva, který umožňuje nezávislé přepínání mezi levou a pravou tryskou pro aplikaci na vnitřní a vnější stranu okolku. Experimentální měření prokázala opakovatelné dávkování v rozsahu 5 až 50 mm³ s minimálním intervalem 0,15 s mezi nástriky, což vytváří předpoklady pro integraci s inteligentními řídicími systémy. Paralelně byly na obou vzorcích testovány dvě metody detekce ucpání trysky. Jako vhodná pro reálné nasazení byla vyhodnocena detekce zdvihu pístu pomocí indukčního snímače; tlaková metoda fyzikální princip potvrdila, avšak membránové snímače nebyly způsobilé pro provoz v podvozku drážního vozidla.

Výsledkem konstrukční fáze je virtuální návrh mazací hlavy Gfunk3 zpracovaný jako detailní 3D CAD model. Návrh je modulární, disponuje systémem vyhřívání zajišťujícím stabilní provozní teplotu maziva a integrovanou indukční zpětnou vazbou. Jednotka je připravena k výrobě po upřesnění uchycovacích rozměrů pro konkrétní vozidlo a umožňuje budoucí připojení k inteligentním palubním řídicím systémům vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA

mazací jednotka, mazání okolků, palubní mazací systém, bezvzduché mazání, zpětná vazba

ABSTRACT

This thesis deals with the development of an airless lubrication unit designed primarily for wheel flange lubrication of tram vehicles. Trams generally do not have a central compressed air distribution system, and installing a compressor solely for lubrication purposes is structurally disadvantageous in the limited space of the bogie. The airless concept, which doses lubricant electromechanically directly in the lubrication head, eliminates this dependency.

The development of the unit proceeded in three phases, the first two of which involved experimental testing on functional prototypes. The first prototype (Gfunk1) verified the basic dosing principle and enabled determination of the operational working window as a function of lubricant temperature and nozzle geometry. The second prototype (Gfunk2) extended the functionality by incorporating a solenoid flow splitter, which allows independent switching between the left and right nozzle for application to the inner and outer side of the wheel flange. Experimental measurements demonstrated repeatable dosing in the range of 5 to 50 mm³ with a minimum interval of 0.15 s between applications, establishing the prerequisites for integration with intelligent control systems. In parallel, two methods of nozzle clogging detection were tested on both prototypes. Detection of piston stroke via an inductive sensor was evaluated as suitable for real-world deployment; the pressure-based method confirmed the physical principle, however the diaphragm sensors tested were not suited for operation in a railway vehicle bogie.

The outcome of the design phase is a virtual model of the lubrication head Gfunk3, developed as a detailed 3D CAD model. The design is modular, features a heating system ensuring stable lubricant operating temperature, and incorporates integrated inductive feedback. The unit is ready for production upon confirmation of the mounting dimensions for a specific vehicle and allows future connection to intelligent on-board vehicle control systems.

KEYWORDS

lubrication unit, wheel flange lubrication, on-board lubrication, airless system, feedback control.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLÍNEK, Jakub. *Vývoj mazací jednotky pro moderní kolejová vozidla*. Diplomová práce. Martin VALENA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu, panu Ing. Martinu Valenovi, Ph.D, za jeho profesionální přístup a vedení. Oceňuji především jeho schopnost poskytnout nadhled v kritických fázích vývoje a nasměrovat mě k efektivnímu vyřešení konstrukčních problémů.

Dále bych rád poděkoval firmě Tribotec s.r.o. za poskytnutí technických podkladů, odborných znalostí a finanční podpory, která mi umožnila realizaci praktické části této práce.

V neposlední řadě děkuji svojí rodině, která mě po celou dobu studia velmi podporovala.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Martina Valeny, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů. Dále prohlašuji, že pro korekci textu bylo využito umělé inteligence Google Gemini a Claude.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Rešeršní metody	14
2.2	Potřeby zákazníka	17
2.3	Rozdělení a principy mazacích systémů	17
2.4	Maziva do kontaktu kola s kolejnicí	22
2.5	Analýza současných mazacích systémů	24
2.6	Senzorika a inteligentní řízení mazacího procesu	28
2.7	Analýza patentů	29
2.8	Shrnutí současného stavu poznání	32
2.9	Identifikace novosti a příležitostí	33
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	34
3.1	Analýza problému	34
3.2	Cíl práce	36
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	37
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	37
4.2	Technická funkční analýza	39
4.3	Návrh alternativních řešení	40
4.4	Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího	43
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	45
5.1	Okrajové podmínky pro návrh	45
5.2	Testované parametry	47
5.3	Konstrukční popis testovací mazací hlavy	51
5.4	Metodika testování	58
5.5	Výsledky	61
5.6	Zpětná vazba a diagnostika	73
6	FINÁLNÍ NÁVRH	77

6.1	Zhodnocení výsledků Gfunk1 a Gfunk2	77
6.2	Konstrukční popis mazací hlavy Gfunk3	80
6.3	Tepelný management	82
6.4	Modularita a přestavitelnost	83
6.5	Tabulka technických parametrů	84
6.6	Odhad výrobních nákladů	85
6.7	Doporučení pro budoucí vývoj	86
7	ZÁVĚR	88
8	VÝSLEDKY DLE RIV	90
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	91
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	94
10.1	Seznam použitých fyzikálních veličin	94
10.2	Seznam použitých zkratk	95
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	96
12	SEZNAM TABULEK	98
13	SEZNAM PŘÍLOH	99

1 ÚVOD

Kolejová doprava patří mezi páteční systémy hromadné přepravy osob a nákladů. Účinnost provozu, životnost komponent vozidla i kolejové infrastruktury a hlučnost při průjezdu obloukem jsou přímo závislé na podmínkách v kontaktu kola s kolejnicí. Bez cílené úpravy součinitele tření dochází k nadměrnému opotřebení okolků kol a temene kolejnice, k růstu energetické náročnosti a ke vzniku akustických projevů, které jsou v městském prostředí provozním limitem zejména u tramvají. Standardním nástrojem ke snížení těchto jevů je palubní mazání okolků (Wheel Flange Lubrication, WFL), které nanáší malé dávky maziva přímo na bok okolku vozidla v průběhu jízdy.

Komerčně dostupné palubní mazací jednotky využívají z naprosté většiny pneumatický princip, kdy stlačený vzduch zajišťuje dopravu maziva i jeho atomizaci v trysce. U kolejových vozidel vybavených centrálním rozvodem stlačeného vzduchu je tato koncepce ověřená a spolehlivá. V případě tramvají centrální vzduchový rozvod zpravidla chybí a instalace samostatného zdroje stlačeného vzduchu pouze pro účely mazání je v stísněném prostoru podvozku konstrukčně i provozně nevýhodná. Bezvzduchá (airless) koncepce, která mazivo dává elektromechanicky přímo v mazací hlavě bez závislosti na vnějším zdroji tlaku, je pro tramvajové a podobné aplikace systémově vhodnější. Komerčně dostupných bezvzduchových systémů je však dosud velmi málo a jejich nabídka pro konkrétní aplikace zůstává omezená.

Cílem diplomové práce je navrhnout a konstrukčně zpracovat novou bezvzduchovou mazací jednotku splňující požadavky na kompaktní integraci do podvozku kolejového vozidla bez nutnosti rozvodu stlačeného vzduchu. Navrhovaná jednotka na bázi elektromagnetického výtlačku zajišťuje přesné dávkování maziva s možností nezávislého rozdělení dávky mezi vnější a vnitřní stranu okolku prostřednictvím integrovaného solenoidového děliče proudu. Součástí návrhu je diagnostický systém využívající indukční snímač polohy pístu, který řídicí jednotce poskytuje zpětnou vazbu o provedené dávce i případném ucpání trysky. Jednotka je navržena jako modulární a pro zajištění konzistentního nástřiku v celém provozním teplotním rozsahu disponuje systémem vyhřívání.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Cílem této kapitoly je zmapování současného stavu poznání v oblasti systémů pro mazání kontaktu kola a kolejnice a vytvořit tak podklad pro vývoj vlastní mazací jednotky. Rešerše je rozdělena do několika částí. V první části je představena metodika vyhledávání informací a použité zdroje. Druhá část se zabývá systematickým rozdělením mazacích zařízení jak podle jejich umístění, tak podle jejich funkce, přičemž hlavní pozornost je věnována bezvzduchým palubním jednotkám. Poslední část se zabývá identifikací novosti a příležitostí.

2.1 Rešeršní metody

Pro úspěšné zpracování vývojové práce bylo nezbytné nejprve definovat strategii vyhledávání a zvolit vhodné vyhledávací nástroje. Nejprve byly definovány 3 rešeršní dotazy, kdy právě technický charakter těchto otázek určoval, jaký typ dokumentu bude pro zodpovězení otázky nejvhodnější a výsledky kterých databází budou nejvíce relevantní.

2.1.1 Definice rešeršních dotazů

1. Jaké mazací jednotky v kolejové dopravě se v současnosti používají a na jakém principu fungují?

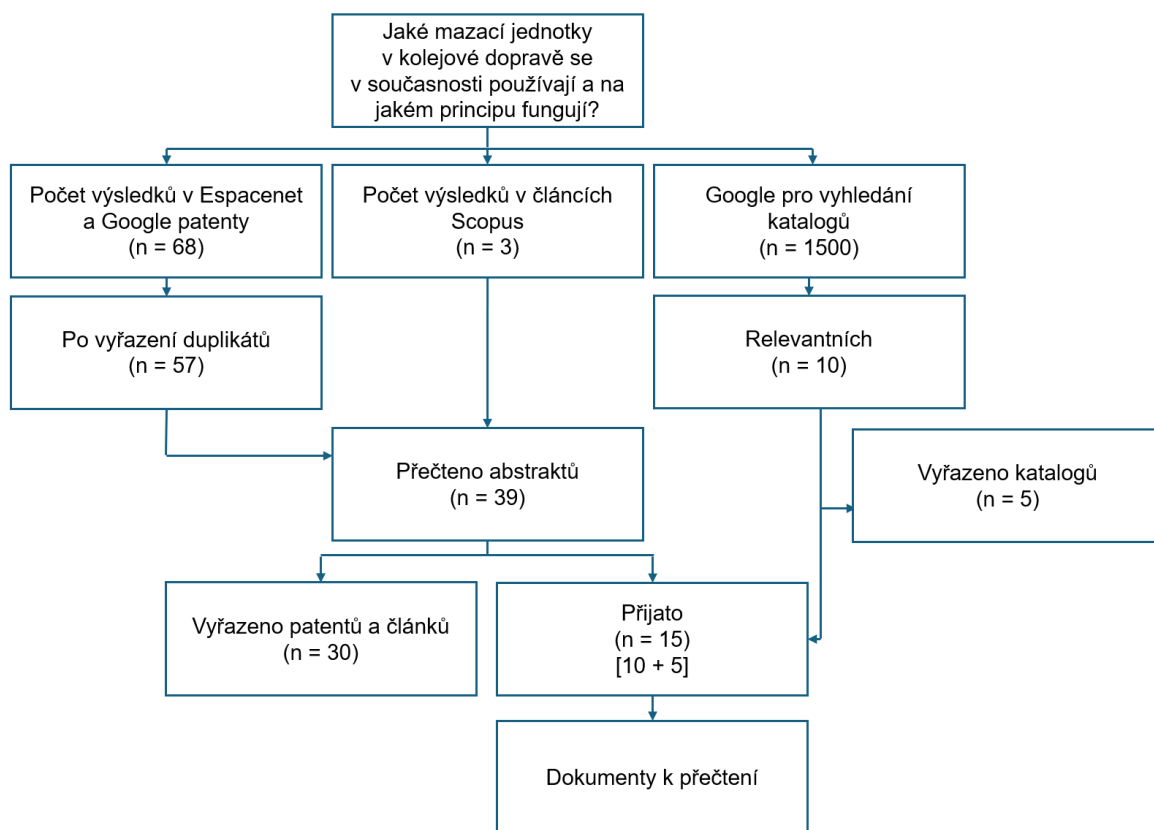
Bylo nutné zmapovat dostupné technologie mazacích jednotek, zaměřit se na jejich hlavní principy a zjistit jejich provozní parametry.

2. Jaká maziva lze vstříkovat do kontaktu kola s kolejnici a jaké mají fyzikální vlastnosti?

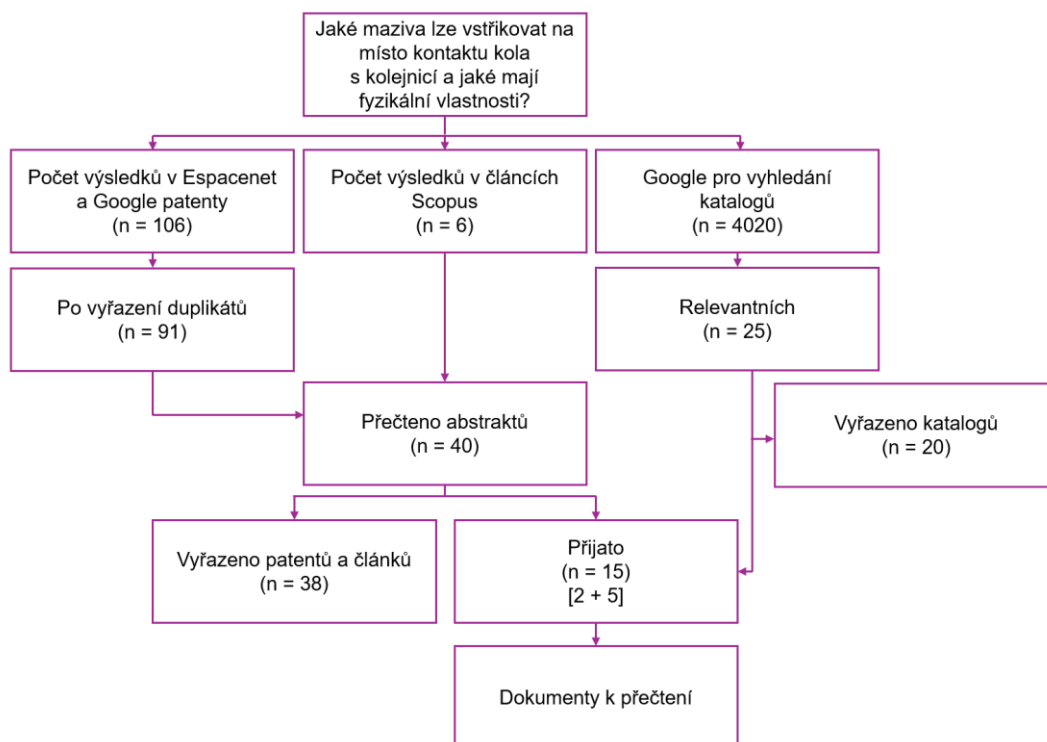
Cílem je získat informace o viskozitě a použitelném teplotním rozsahu maziv pro správný návrh čerpadel, filtrů a trysek. Je důležité také zjistit, jak maziva kontakt ovlivňují.

3. Jaké jsou omezení, jako například rozměry a vibrace, pro konstrukci jednotky do podvozku kolejového vozidla?

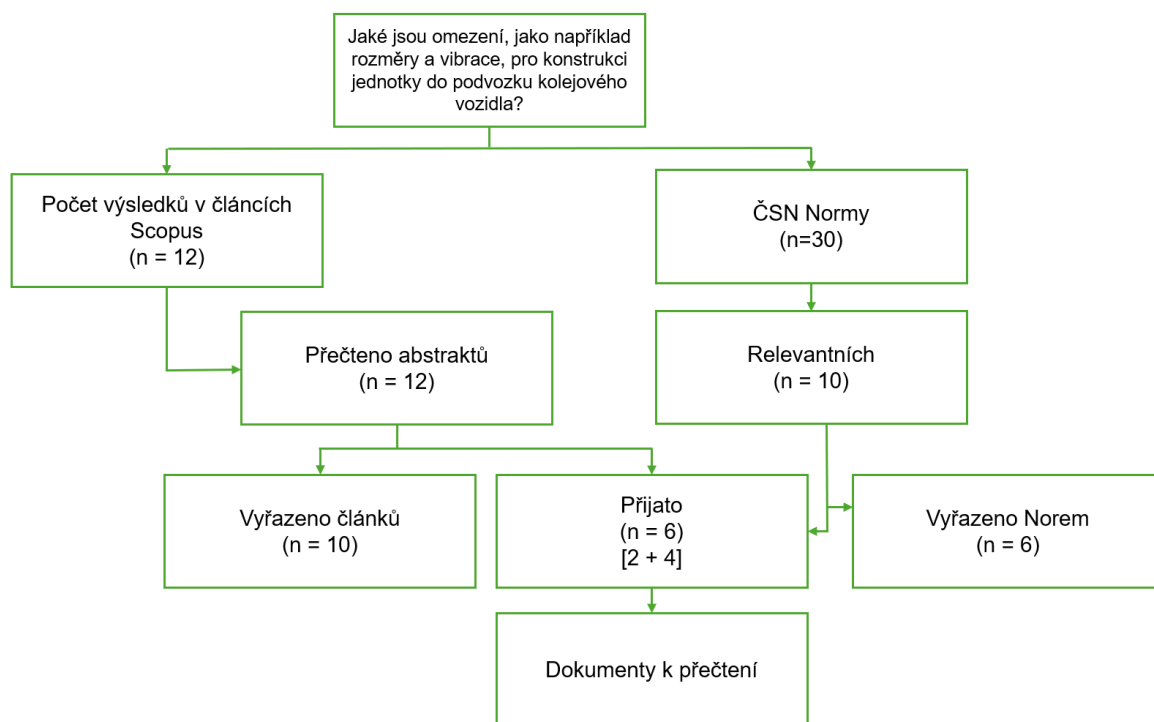
Cílem je definovat provozní limity, zástavbové prostory a požadavky na odolnost vůči vnějšímu zatížení.



Obr. 2-1 Prisma diagram RD1



Obr. 2-2 Prisma diagram RD2



Obr. 2-3 Prisma diagram RD3

2.1.2 Strategie vyhledávání a selekce dokumentů

Pro každý rešeršní dotaz byl aplikován samostatný postup filtrace zdrojů a tyto postupy jsou zaznamenány do PRISMA diagramů (Pro RD1: Obr. 2-1, RD2: Obr. 2-2, RD3: Obr. 2-3).

Jelikož se jedná o vývojovou práci, rešeršní strategie musela odpovídat praktické potřebě konkrétních informací. U každého z výše uvedených dotazů byla provedena rešerše vědeckých článků v databázích Google Scholar a Scopus. Ukázalo se však, že tyto výsledky neposkytovaly potřebné detaily o reálném provedení zařízení.

Bylo nutné se více zaměřit na informační zdroje jako katalogy, patenty a jiné průmyslové podklady. Pro vyhledávání patentů a užitných vzorů byly využity databáze Google Patents a Espacenet. Největší množství dat ovšem plynulo z Google Search, který byl využitý pro hledání technických katalogů výrobců, které popisují funkci a parametry zařízení, avšak konstrukční detaily zpravidla nezveřejňují.

2.2 Potřeby zákazníka

Trend moderních nízkopodlažních vozidel přináší specifické nároky na konstrukci zařízení, které se do podvozku umísťují, zejména s ohledem na stísněné zástavbové prostory a vysoké vibrační zatížení. Z těchto důvodů musí být navrhovaná mazací jednotka maximálně kompaktní, lehká a mechanicky odolná. Významným faktorem je také nezávislost na pneumatických rozvodech vozidla; zatímco u vlaků jsou vzduchové rozvody standardem, u moderních tramvají, pokud je potřeba využít stlačeného vzduchu, musí zařízení disponovat vlastním zdrojem [1]. Volba alternativního (bezvzduchého) systému tak zajišťuje univerzálnost použití napříč různými typy kolejových vozidel a zvyšuje tržní potenciál produktu. Klíčovým funkčním požadavkem je vysoká přesnost dávkování v malých objemech, která je nezbytná pro efektivní využití média a prevenci vůči přemazání kontaktu (tzn. ztráta adheze kvůli velkému množství maziva v kontaktu).

2.3 Rozdělení a principy mazacích systémů

Pro eliminaci tření a hluku v kontaktu kola s kolejnicí existuje celá řada technických přístupů a zařízení. Tyto systémy lze kategorizovat podle tří hlavních hledisek:

- Umístění jednotky
- Fyzikální princip nástřiku
- Cílová oblast aplikace

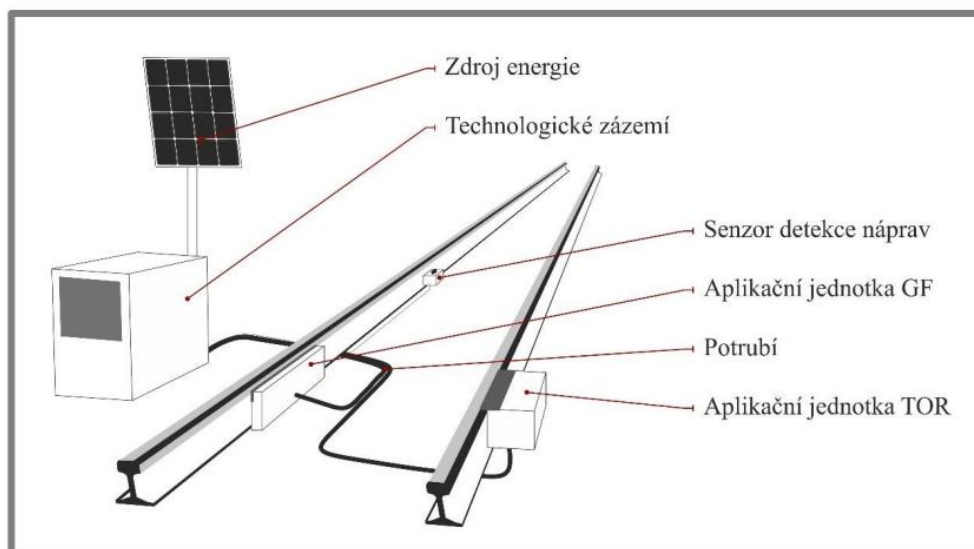
2.3.1 Rozdělení dle umístění jednotky

Základním kritériem mazacích jednotek je umístění, kde se mazací jednotka nachází.

1. Stacionární mazací jednotky (Traťové mazníky / wayside)

Tato zařízení jsou instalována pevně v kolejišti – typicky na začátcích oblouků, v hustě obydlených oblastech nebo na točnách tramvají. Principiálně jednotka funguje tak, že senzor detekuje průjezd vozidla a aktivuje aplikátor, který z větší vzdálenosti nanese mazivo na kolejnici. Dle typů se může jednat o stacionární jednotky nástřikové, nebo s přítlačnou lištou. Právě nástřikové mazací jednotky, tzn. jednotky, které musí mazivo z větší vzdálenosti aplikovat přesně na požadované místo, se pro vývoj navrhované jednotky jeví jako použitelné, jelikož princip nástřiku může být podobný i u on-board jednotek. Stacionární jednotka je zobrazena na Obr. 2-4.

Výhodou těchto jednotek je skutečnost, že v kritickém místě lze aplikovat mazivo pro všechny vozidla, tudíž není nutné vybavit každé jedno vozidlo mazací jednotkou. Nevýhodou je to, že jedna jednotka pokryje pouze jedno kritické místo.

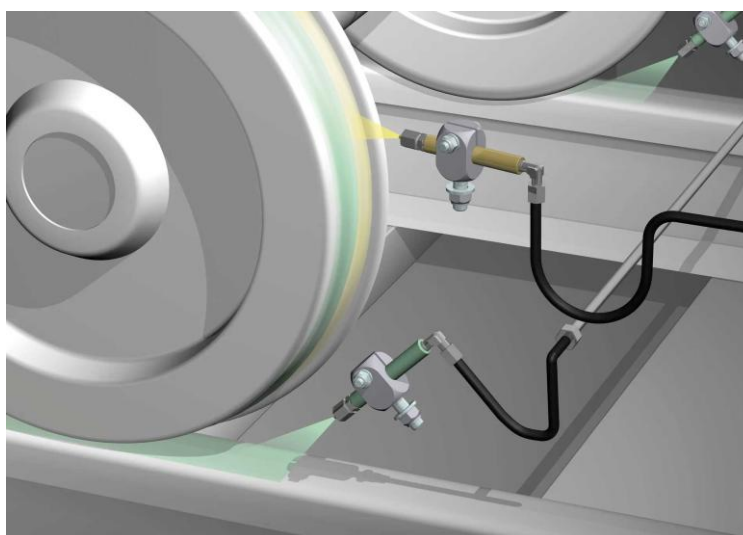


Obr. 2-4 Znáznornění stacionární jednotky [2]

2. Palubní mazací jednotky (On-board)

Jak již z názvu napovídá, jedná se o mazací jednotky integrovány přímo na palubě vozidla. Samotná aplikační jednotka (tryska nebo mazací hlava) je umístěna v prostoru podvozku v těsné blízkosti kola nebo kolejnice, jak lze vidět na Obr. 2-5. Tato jednotka aplikuje mazivo většinou autonomně na základě řídicích signálů (GPS, senzor průjezdu zatáčkou, časový interval).

Z konstrukčního hlediska je důležité zmínit, že z důvodu stísněných prostorových podmínek v podvozku bývá zásobník maziva často umístěn odděleně, například v technických prostorech skříně vozidla nebo na střeše. Převážná část provozovaných palubních systémů pracuje na pneumatickém principu a dle cílové oblasti aplikace se zaměřují buď na mazání okolku, nebo temene kolejnice.



Obr. 2-5 Znáznornění umístění palubní jednotky [3]

2.3.2 Rozdělení dle principu aplikace

U mazacích jednotek, a to hlavně těch palubních, je princip aplikace velmi podstatný. Zvolená technologie totiž přímo určuje, jakým způsobem se mazivo dostane ze zásobníku na kolo nebo kolejnici a jak moc bude celý systém závislý na dalších rozvodech vozidla. V současné praxi se setkáváme se třemi základními koncepcemi, které se liší svou složitostí i přesností dávkování.

1. Pneumatické systémy

V současné době se jedná o nejpoužívanější a technicky nejvíce rozšířené řešení. Tento systém využívá pro transport a následný rozstřík maziva energii stlačeného vzduchu. Funkční princip spočívá v přívodu maziva do směšovací trysky, kde je proudem vzduchu při vysokém tlaku dosaženo tzv. atomizace [4], tedy rozbití kapaliny na velmi jemné částice a vznik aerosolu.

Nespornou výhodou této technologie je vysoká kvalita nástřiku. Díky energii stlačeného vzduchu lze dosáhnout ideálního nástřikového kužele, což zajišťuje vynikající opakovatelnost procesu a rovnoměrné pokrytí cílové plochy. Konstrukce samotné trysky může být velmi kompaktní.

Navzdory vysoké kvalitě aplikace však toto řešení naráží v městském provozu na praktické limity. U moderních tramvají je často problémem absence centrálních vzduchových rozvodů [4]. Instalace pneumatické mazací jednotky pak vyžaduje doplnění vozidla o vlastní kompresor a tlakovou nádobu. Tato přídatná zařízení značně zvětšují prostorové nároky celého systému, což vynucuje jejich umístění do vzdálenějších míst (např. na střechu vozidla), čímž se prodlužují rozvody a komplikuje údržba.

2. Bezvzduché systémy (Airless)

Konstrukce bezvzduchých mazacích jednotek zcela eliminuje potřebu stlačeného vzduchu. V současné době tvoří tento typ menšinový podíl trhu oproti konvenčním pneumatickým jednotkám. Podle způsobu, jakým je dosažen aplikační tlak, se bezvzduché systémy dělí do dvou konstrukčních kategorií.

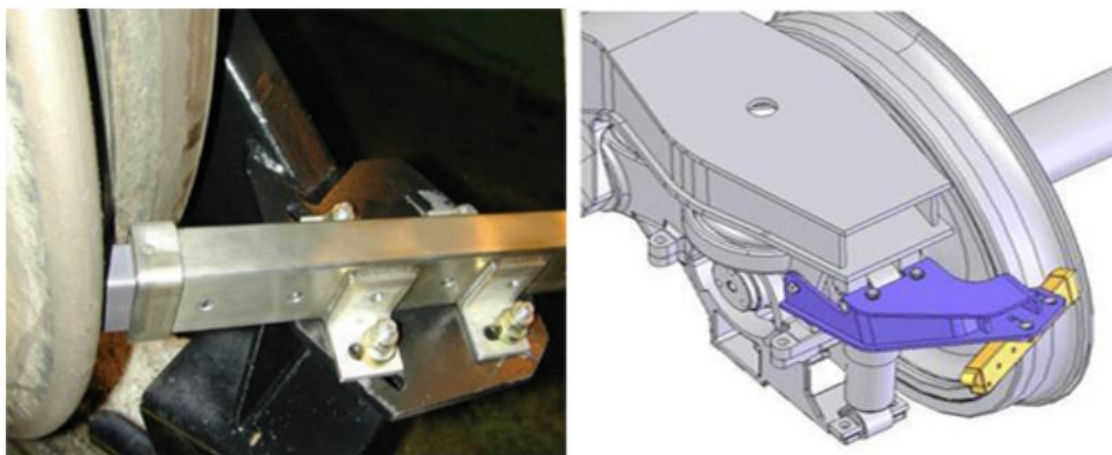
První kategorií jsou systémy se sekundární kompresí v mazací hlavě. Mazivo je čerpadlem dopravováno z nádrže k mazací hlavě pod relativně nízkým tlakem. Teprve v samotné hlavě, která integruje dávkovací mechanismus, dochází k lokálnímu nárůstu tlaku na hodnotu potřebnou pro vznik nástřiku. Výsledkem je konstrukčně komplikovanější a rozměrnější hlava, která ovšem umožňuje umístit zásobník maziva ve větší vzdálenosti od kola.

Druhou kategorií jsou systémy bez sekundární komprese. Čerpadlo zde dodává mazivo již pod pracovním tlakem přímo k trysce. Před tryskou se nachází pouze solenoidový ventil, který se otevře na velmi krátký časový impuls a umožní vystříknutí definované dávky. Mazací hlava je v tomto provedení konstrukčně jednoduchá – v podstatě pouze tryska s ventilem. Nevýhodou je nutnost umístit čerpací techniku co nejbližší k místu aplikace, aby byly minimalizovány tlakové ztráty v rozvodech. Zároveň je třeba dodržovat dostatečné časové rozestupy mezi nástriky, během nichž dojde k obnovení provozního tlaku v systému.

Společným limitem obou přístupů je kvalita rozptylu maziva. Bez atomizace vzduchem je obtížné dosáhnout rozprašovacího kužele – výsledný paprsek má kompaktní, proudový charakter.

3. Tuhé modifikátory tření (Solid Stick)

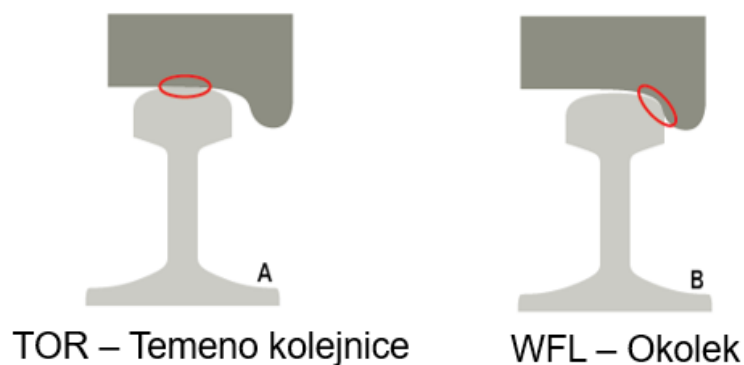
Za on-board jednotku můžeme považovat i tuhý modifikátor tření neboli solid stick. Tato tyčinka je umístěna na nápravě a pomocí pružiny je přitlačovaná na okolek. Výhodou těchto tuhých modifikátorů je jednoduchý systém aplikace, který nevyžaduje žádné rozvody vzduchu, ani složité řídicí jednotky a instalace je oproti ostatním jednotkám velice jednoduchá. Aplikace ovšem probíhá kontinuálně i když není potřeba mazat kontakt. Využívá se biologicky odbouratelných materiálů [5]. Aplikační jednotka je zobrazena na Obr. 2-6.



Obr. 2-6 Tuhé modifikátory tření [6]

2.3.3 Rozdělení dle cílové oblasti aplikace

Posledním a velmi důležitým dělením je určení oblasti, na kterou je mazivo aplikováno. To definuje hlavně typ použitého média, ale i nároky konstrukci jednotky a přesnost a množství aplikovaného maziva. Rozdělení je znázorněno na Obr. 2-7 a Obr. 2-5.



Obr. 2-7 Polohy pro aplikaci maziva [7]

1. Mazání okolků (Wheel Flange Lubrication – WFL)

Tato oblast je stěžejním tématem této diplomové práce. Hlavním účelem WFL systému je minimalizace tření a opotřebení v místě kontaktu mezi okolkem kola a boční stranou hlavy kolejnice. U tramvajových podvozků je situace specifická používáním žlábkových kolejnic, kde může docházet ke kontaktu nejen na vnitřní straně okolků, ale také na vnější. Je tedy často vyžadováno oboustranné mazání, aby se zabránilo nadměrnému hluku a opotřebení v úzkých profilech žlábků.

2. Mazání temene kolejnice (Top of Rail – TOR)

Systémy TOR aplikují médium přímo na jízdní plochu kolejnice. Hlavním cílem je opět snížení opotřebení a hluku, ovšem je zde kladen extrémní důraz na přesnost dávkování, aby nedocházelo k nebezpečnému snížení adheze, což by prodloužilo brzdovou dráhu vozidla [8]. TOR se od WFL liší hlavně použitým mazivem, kde u TOR je mazivo velmi specifické a věnuje se tomu kapitola 2.4.1.

2.3.4 Shrnutí oblastí použití dle rozdělení

Z výše uvedeného rozdělení vyplývá, že každý princip mazacího systému má své opodstatnění v závislosti na typu kolejové dopravy a specifických provozních požadavcích. Společnost SKF přehledně definovala tyto oblasti použití na Obr. 2-8.

Z analýzy dat vyplývá, že pro těžkou nákladní dopravu (Heavy haul) jsou prioritou stacionární jednotky, zatímco u vysokorychlostních tratí se prosazují výhradně palubní systémy s vysokotlakovým vstřikováním. V oblasti osobní a příměstské dopravy je spektrum využitelných technologií nejširší. Zásadním zjištěním pro tuto práci je fakt, že moderní bezvzduché technologie jsou cíleně vyvinuty a doporučovány pro tramvaje a metra.

Obr. 2-8 rovněž potvrzuje univerzálnost palubních jednotek, které jsou schopny pokrýt jak mazání okolků (WFL), tak i TOR aplikace.

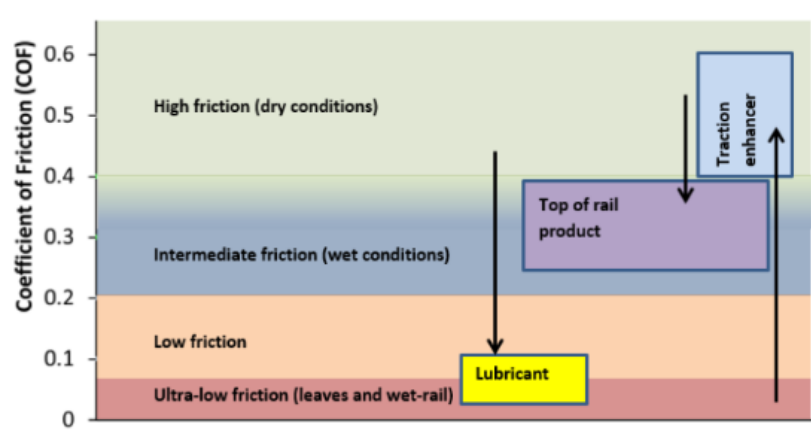
Lubrication system				Rail application						
Gauge face lubrication (GF)	Top-of-rail conditioning (TOR)	Restraining rail lubrication	Wheel flange lubrication (WFL)							
				Heavy haul	Freight traffic	High-speed	Passenger transit	Commuter train	Metro	Tramway
Wayside lubrication with										
Wiper bar	•			•	•		•	•	•	
Contact Applicator		•		•	•		•	•	•	
Restraining rail lubricator			•	•	•		•	•	•	
SLID	•	•			•					•
Lubrication holes	•	•	•				•	•	•	
Onboard lubrication										
EasyRail Airless		•	•						•	•
EasyRail Compact		•	•				•	•	•	•
EasyRail Low-Pressure						•	•	•	•	
EasyRail High-Pressure		•	•				•	•	•	•

Obr. 2-8 Oblasti použití dle SKF [9]

2.4 Maziva do kontaktu kola s kolejnicí

Pro efektivní funkci mazacích systémů je nezbytné použití vhodného maziva. Volba není libovolná, ale závisí na předem definovaném místě aplikace – tedy tím, jestli je cílem mazání temeno kolejnice nebo okolek. Díky tomu, že se jedná o otevřený systém mazání, je kladen důraz i na ekologické vlastnosti maziv. Maziva se mohou snadno dostat mimo trať, a proto musí být biologicky odbouratelná a klade se důraz i na přesnou aplikaci.

Základní dělení maziv je podle skupenství na tuhá (solid stick) a kapalná. Pro účely této práce a vyvíjené jednotky jsou relevantní pouze maziva kapalná. Ta se dělí do dvou hlavních kategorií, které se liší svým složením, vlastnostmi a účelem: modifikátory tření pro temeno kolejnice (TOR maziva) a maziva okolků (WFL). Oblasti použití jsou znázorněny na Obr. 2-9.



Obr. 2-9 Vliv maziv na koeficient tření [8]

2.4.1 Modifikátory tření (TOR-FM)

Pokud je cílem aplikace maziva na temeno kolejnice, hovoříme o tzv. modifikátorech tření. Tyto produkty můžeme rozdělit na TOR-Oil (olejová báze), TOR-Grease a TOR-hybrid (olejová a vodní báze) [10]. U těchto produktů není cílem snížit tření na minimum, to by mohlo vést ke ztrátě adheze, prokluzu kol při rozjezdu a nebezpečnému prodloužení brzdné dráhy.

Cílem TOR maziv je stabilizovat součinitel tření do optimálního rozmezí $\mu = 0,3 - 0,4$ [8]. Této specifické hodnoty je dosahováno díky obsahu pevných částic v nosném médiu. Jedná se o mikročástice (např. hliník, měď, grafit či MoS_2) jejichž velikost se pohybuje v řádu mikrometrů (typicky 1–10 μm , u jemných složek i méně) [11], což jim umožňuje průchod tryskami a vytvoření homogenního filmu, který eliminuje nežádanou hlučnost, ale zachovává trakci.

Ačkoliv je přesnost aplikace důležitá, systém je z hlediska bezpečnosti tolerantnější k chybám migrace. Pokud se TOR mazivo (určené pro temeno) nedopatřením dostane na okolek, nepůsobí to kritickou situací, neboť součinitel tření 0,3 je sice vyšší než požadovaný pro okolek, ale neohrožuje bezpečnost jízdy.

Jako reprezentativní mazivo pro modifikátory tření bylo vybráno mazivo Sintono Terra HLK, jehož parametry jsou v Tab. 1.

Tab. 1 Parametry maziva Sintono Terra HLK [12]

Parametr	Hodnota
Kinematická viskozita při 40 °C	46 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Kinematická viskozita při 100 °C	9,2 $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
Rozsah pracovních teplot	-40 až 120 °C
Třída NLGI	1
Základový olej	Syntetický ester

2.4.2 Maziva pro okolky (WFL)

Poměrně odlišná situace nastává při mazání okolů. Zde nedochází k přenosu trakčních sil, a proto je primárním cílem maximální snížení tření, aby se zamezilo otěru kovu o kov v obloucích. Požadovaná hodnota součinitele tření se zde pohybuje velmi nízko, typicky $\mu < 0,1$ [8].

Na tato maziva jsou kladeny velmi velké nároky z hlediska přesnosti dávkování. Pokud by se vysoce kluzné mazivo z okolku dostalo na temeno kolejnice, mohlo by dojít ke snížení trakce. Z tohoto důvodu musí být mazivo aplikováno:

1. **V malých dávkách:** Aby nedocházelo k vytlačení maziva z kontaktu na jízdní plochu
2. **S vysokou frekvencí:** Pokud chceme dostat dostatečné množství maziva do kontaktu při malých dávkách, je nutné zvýšit frekvenci dávkování.

I v tomto případě platí na maziva striktní požadavky na ekologickou nezávadnost a odbouratelnost. Jako reprezentativní mazivo bylo vybráno mazivo BECHEM Ecorail 2009, jehož parametry jsou v Tab. 2.

Tab. 2 Parametry maziva BECHEM Ecorail 2009 [13]

Parametr	Hodnota
Kinematická viskozita při 40 °C	46 mm ² ·s ⁻¹
Kinematická viskozita při 100 °C	9 mm ² ·s ⁻¹
Rozsah pracovních teplot	-30 až 180 °C
Hustota	0,96 g·cm ⁻³
Třída NLGI	00–000
Základový olej	Ester

2.5 Analýza současných mazacích systémů

2.5.1 Palubní bezvzduché mazací systémy (Airless)

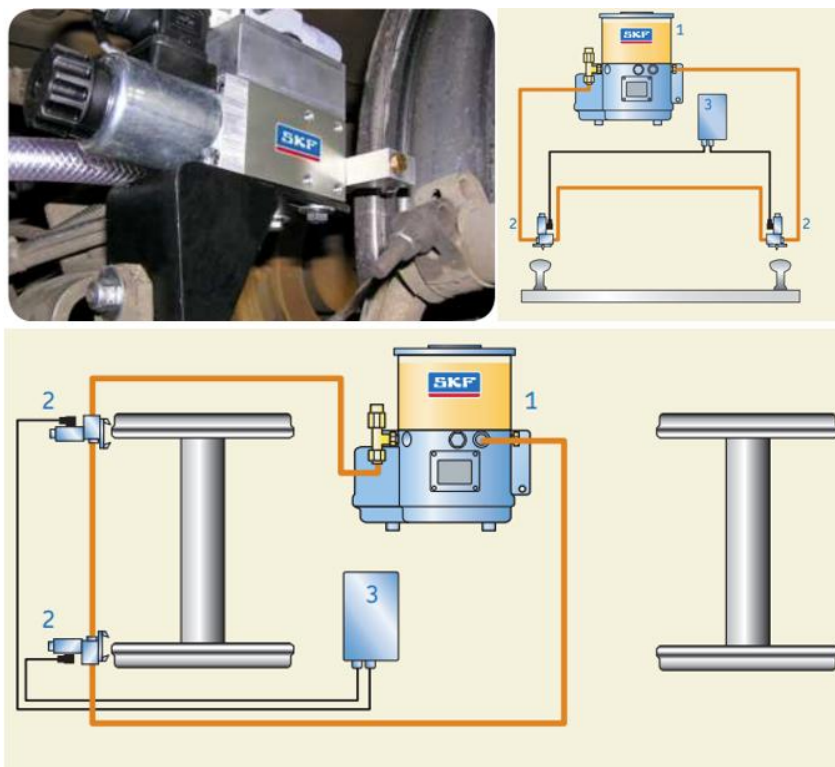
SKF EasyRail Airless

Systém SKF EasyRail Airless představuje v současnosti jedno z nejrozšířenějších řešení pro palubní mazání okolků bez využití stlačeného vzduchu. Tato technologie je primárně určena pro tramvaje, metra a lehké kolejové systémy (LRV), které jsou často koncipovány jako plně elektrické a nedisponují centrálními rozvody vzduchu.

Konstrukční uspořádání a princip funkce:

Jedna mazací jednotka je obvykle tvořena jedním centrálním čerpadlem a dvěma mazacími hlavami – pro levé a pravé kolo nápravy (viz Obr. 2-10, poz. 2). Základem systému je pístové čerpadlo typu KFG (viz Obr. 2-10, poz. 1), které slouží zároveň jako zásobník maziva a zajišťuje cirkulaci v okruhu pod nízkým tlakem (max. 6 bar[14]).

Klíčovým prvkem jsou nanášecí jednotky – mazací hlavy PER, osazené přímo u kol. Zdrojem přitlačné síly pro samotný nástřik je zde solenoid (elektromagnetická cívka s jádrem). Na rozdíl od pneumatických systémů se dosažení vysokého aplikačního tlaku potřebného pro nástřik děje přímo v mazací hlavě, která plní funkci trysky i sekundárního čerpadla. Mazací hlava je kompaktní zařízení s rozměrovou obálkou přibližně 200×150×100 mm.



Obr. 2-10 SKF EasyRail Airless; Poz.1: KFG Čerpadlo, Poz. 2: Mazací hlava, Poz. 3: Řídicí jednotka [15]

Parametry dávkování a limity aplikace:

Systém se vyznačuje několika technickými omezeními, které definují prostor pro další vývoj:

- **Fixní dávka:** Jednotka neumožňuje snadnou regulaci množství maziva během provozu a objem je pevně dán konstrukcí mazací hlavy a to 30 mm³ [16] na jeden zdvih.
- **Časové omezení:** Minimální povolená frekvence mezi jednotlivými nástřiky je u tohoto systému 1 sekunda [16], tudíž pokud je snahou zvýšit množství aplikovatelného maziva v konkrétním úseku trati, tak to nelze provést zvýšením frekvence nástřiku.
- **Závislost trysek:** Standardní jednotka pro mazání okolků je vybavena dvěma tryskami, které aplikují mazivo současně na vnější i vnitřní stranu okolků. Tyto trysky jsou na sobě závislé, což znamená, že nelze volit stranu aplikace – buď se maže celý okolek, nebo aplikace neprobíhá vůbec. Tato vlastnost vede k neefektivní spotřebě maziva, které je aplikováno i na strany, kde to v daném oblouku není nutné.

- **Absence zpětné vazby:** Jednotka nedisponuje mechanismem pro potvrzení provedení nástřiku. V případě ucpání trysky nebo jiné poruchy řídicí systém nedokáže tento problém identifikovat, což může vést k provozu bez mazání bez vědomí obsluhy.

I přes výše uvedené limity může být jednotka částečně modulární. Konstrukce umožňuje nastavení polohy trysek vůči na tělese mazací hlavy, což usnadňuje montáž do stísněných prostorů podvozků. Celý systém lze uspořádat jak pro mazání okolků (WFL), tak pro aplikaci modifikátorů tření na temeno kolejnice (TOR) – nejedná se ale o sdruženou jednotku (tzn. že lze jednotku využívat pouze na jeden druh aplikace při dané konfiguraci). Jednotka disponuje i topnými tělesy pro zajištění opakovatelnosti nástřiku i při nízkých teplotách.

Igralub TrainSys-AL

Švýcarský systém TrainSys-AL představuje alternativní koncepci palubního bezvzduchého mazání, která je optimalizovaná pro aplikaci vysoce viskózních médií a modifikátorů tření, jako je například HeadLub 90. Na rozdíl od bezvzduchého systému SKF, který využívá elektromagnetický impuls přímo v mazací hlavě, využívá Igralub princip aktivního výtlačku pomocí elektrických pístových čerpadel.

Princip a funkce konstrukce: Základem systému je zásobník maziva, na který jsou přímo napojena dvě nezávislá elektrická pístová čerpadla (pro levou a pravou stranu vozidla). Tato čerpadla zajišťují konstantní objemovou dávku maziva, která je nezávislá na okolní teplotě a viskozitě maziva [17]. Mazivo je pod pracovním tlakem vedeno potrubím přímo k aplikačním tryskám.

Klíčovým prvkem je řídicí jednotka, která využívá GPS signály k přesné aktivaci mazání v kritických úsecích trati. Tento systém umožňuje tzv. asymetrické mazání, kdy je aktivováno pouze čerpadlo na té straně, kde je v daném oblouku potřeba mazání.

Velikou konstrukční výhodou je poměrně malá velikost mazací hlavy v porovnání s bezvzduchými systémy. Díky tomu, že nevzniká sekundární tlakování, mazací hlava je v podstatě pouze tryska. Tímto se částečně eliminuje problém malého zástavbového prostoru poblíž kola.

Hlavní nevýhoda tohoto řešení v nutnosti umístění čerpací techniky a zásobníku v blízkosti kol. Protože mazivo není v potrubí unášeno proudem vzduchu ani není tlakováno až v hlavě, vyžaduje doprava médií co nejkratší rozvody, aby se předešlo tlakovým ztrátám a prodlevám v reakci. Tato vlastnost představuje problém zejména pro moderní nízkopodlažní tramvaje, kde je prostor v podvozku a jeho okolí kriticky omezen. Zatímco pneumatické systémy můžou mít zásobník na střeše, a SKF Airless využívá okružní potrubí s nízkým tlakem, Igralub vyžaduje zástavbu čerpadel přímo k nápravám, jak lze vidět i na Obr. 2-11. Jak již z názvu tedy napovídá, tato jednotka se využívá spíše u vlaků.



Obr. 2-11 Igralub TrainSys-AL: Umístění jednotky na podvozku [18]

2.5.2 Palubní pneumatické mazací systémy

Ačkoliv je hlavním cílem této práce vývoj jednotky, která k provozu nepotřebuje stlačený vzduch, součástí rešerše byla i analýza běžně používaných vzduchových systémů. Tyto systémy jsou v praxi dlouhodobě ověřené a nabízejí cenné poznatky o tom, jak efektivně distribuovat mazivo, jaké je vhodné umístění trysek vůči kolu a také byla věnována pozornost tomu, jak tyto jednotky vyhodnocují, kdy má aplikace proběhnout.

SKF EasyRail Compact

Firma SKF – Lincoln má celou řadu vzduchových jednotek a řadí se mezi největší výrobce na světě. Jako příklad je zde uvedený systém EasyRail Compact, který se v současnosti velmi frekventovaně využívá. Mazivo je zásobníku dávkováno pístovým čerpadlem do směšovacího bloku, kde je unášeno proudem stlačeného vzduchu až 10 bar [19]. Směs následně putuje potrubím k děliči průtoku, který ji rovnoměrně distribuuje k tryskám namířeným na okolky kol. Zásadní výhodou je absence jakýchkoliv pohyblivých částí v tryskách, což snižuje nároky na údržbu a zvyšuje spolehlivost. Systém umožňuje nezávislé ovládání levé a pravé strany, což šetří mazivo při průjezdu obloukem. Frekvence jednoho cyklu je dle výrobce 8 až 12 s [19].

REBS Turbolub

Německá společnost REBS používá pro oboustranné mazání okolků patentovanou technologii TURBOLUB®. Systém využívá pneumaticky poháněné pístové čerpadlo, které dopravuje mazivo z beztlakové nádrže do směšovacího bloku. Odtud je médium unášeno turbulentním proudem vzduchu, přičemž se v potrubí pohybuje jako tenký film přilnutý k vnitřní stěně trubky [20]. Patentovaný systém Turbolub následně dělí tento tok rovnoměrně do jednotlivých větví k tryskám, které urychlují proud směsi oleje a vzduchu. Tím dochází k odtržení maziva od stěny a vytvoření jemných kapek, které na okolkou tvoří extrémně tenký film. Celý proces řídí elektronické zařízení REMATIC, které má v sobě GPS systém pro detekci oblouku [20]. Jednotka dodává konstantní objem maziva a to 0,05 cm³ pro okolek a 0,5 cm³ pro temeno kolejnice[3] Díky absenci pohyblivých částí v distributoru i tryskách je jednotka mimořádně odolná proti ucpávání a je ideální pro aplikaci moderních maziv s vysokým obsahem pevných částic (až 25 % [20]).

2.6 Senzorika a inteligentní řízení mazacího procesu

Efektivita moderních mazacích systémů je přímo závislá na schopnosti přesně detekovat kritická místa trati. Cílem inteligentního řízení je zajistit, aby se aplikovalo optimální množství maziva (tj. co nejmenší, ale dostačující množství), aby aplikace proběhla ve správný moment a také aby jednotka dokázala tyto cíle zpětně vyhodnotit. Právě schopnost zpětné vazby vyhodnotit průběh aplikace je klíčová pro dosažení skutečné „inteligentní“ jednotky.

2.6.1 Metody detekce trati a aktivace mazání

Současné systémy využívají k identifikaci kritických míst a následnému spuštění mazacího cyklu několik základních technických principů:

- **Detekce oblouku pomocí gyroskopu:** Řídící jednotky jako je SKF LCG2, využívají integrovaný senzor úhlové rychlosti (gyroskop), který rozpozná vjezd vozidla do oblouku. Citlivost tohoto senzoru lze nastavit tak, aby mazání spouštěl pouze při dosažení určitého poloměru zatáčky.
- **Lokalizace pomocí GPS:** Pokročilé systémy, například od Igralub nebo REBS, pracují s GPS lokalizací, které umožňuje aktivovat mazání v přesně definovaných souřadnicích trati. Výhodou je možnost předvídat kritické body ještě před vjezdem do kontaktu.
- **Odometrie a časové intervaly:** Standardní metodou zůstává aktivace na základě ujeté vzdálenosti nebo v pevných časových intervalech. Tento přístup může vést buď k nadměrné, nebo nedostatečné aplikaci maziva.

2.6.2 Diagnostika a zpětná vazba

Prostor podvozku kolejového vozidla představuje extrémně náročné provozní prostředí, kde znečištění, prach a vlhkost mohou snadno způsobit ucpání aplikační trysky nebo poškození vedení. Pro zajištění spolehlivého chodu je proto klíčová diagnostika. Většina současných komerčních jednotek se však spoléhá spíše na nepřímé metody kontroly a často nedisponuje komplexní zpětnou vazbou o tom, zda mazivo trysku skutečně opustilo. Z hlediska monitoringu se v praxi využívají nebo vyvíjejí následující přístupy:

- **Sledování poklesu tlaku:** Diagnostická metoda, která vyhodnocuje úspěšnost nástřiku na základě charakteristické změny (poklesu) tlaku v hydraulickém systému bezprostředně po výstřiku maziva.
- **Snímání polohy pístů v rozvaděčích:** Nepřímá metoda, kterou využívají některé moderní systémy (např. jednotka od REBS [20]). Integrované snímače vyhodnotí, zda písty v rozvaděcí kostce vykonaly zdvih, což u současných systémů indikuje, jakou větví mazivo prochází.

- **Kontrola hladiny maziva v nádrži:** Jedná se o běžný standard chránicí systém před zavzdušněním a vyčerpáním média. Pro ověření samotného nástřiku je však tato metoda nedostatečná, jelikož okamžitý úbytek extrémně malých dávek maziva nelze v nádrži senzorem v reálném čase vůbec zaznamenat. Tato metoda se dá využít z dlouhodobějšího hlediska, pokud by senzor nehlásil žádný úbytek maziva po předpokládaném intervalu.
- **Využití průtokoměrů:** Potvrzení pomocí mikro-průtokoměrů umístěných co nejbližže trysce, které řídicímu systému přímo potvrdí, že definovaný objem skutečně prošel tryskou. Je ale nutné zmínit, že u žádné komerčně dostupné jednotky nebylo potvrzeno využití takového systému.

2.7 Analýza patentů

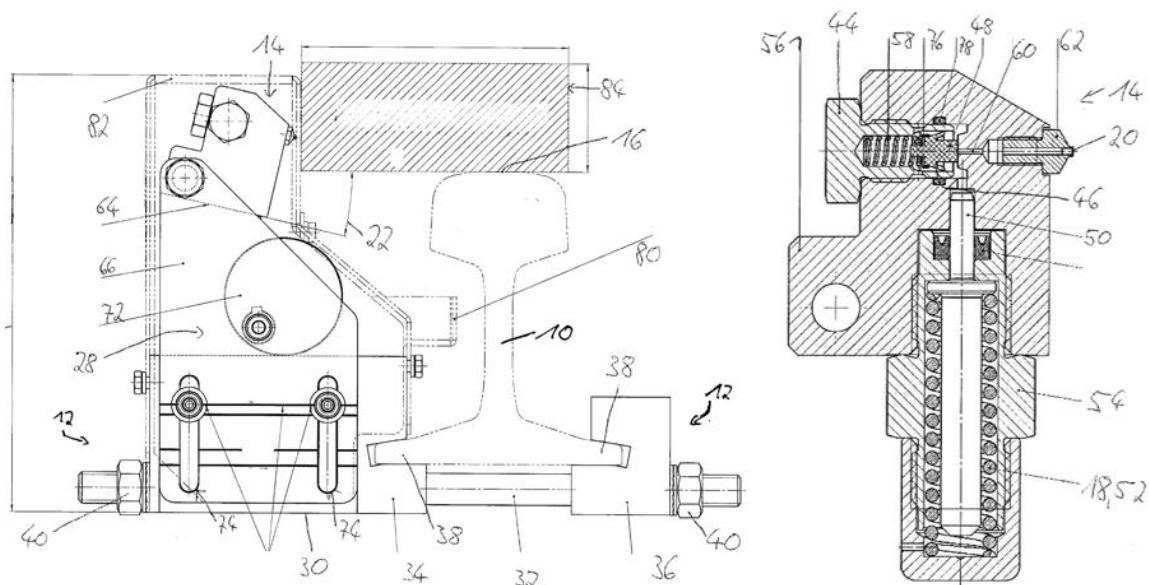
V rámci rešerše bylo analyzováno větší množství patentů. Primární pozornost byla věnována konstrukci samotných mazacích hlav, které představují pro tuto práci nejkritičtější uzel. Dále byly zkoumány i další technické prvky využitelné pro vývoj nové jednotky, jako jsou například způsoby vyhodnocení a kontroly provedení nástřiku. Podobně jako u přehledu komerčních řešení se rešerše zabývala nejen palubními bezvzduchými systémy, ale také patenty zaměřené na pneumatické a stacionární traťové mazací jednotky.

2.7.1 Mazací hlavy

Mazací hlava je nejdůležitější komponentou mazací jednotky, jelikož v ní probíhá sekundární komprese maziva, časování nástřiku, změna dávky, ohřev maziva a od její funkčnosti se odvíjí celá kvalita nástřiku. Výrobci v katalogu nejčastěji nezveřejňují samostatný princip mazací hlavy, tudíž většina informací pochází z patentové rešerše.

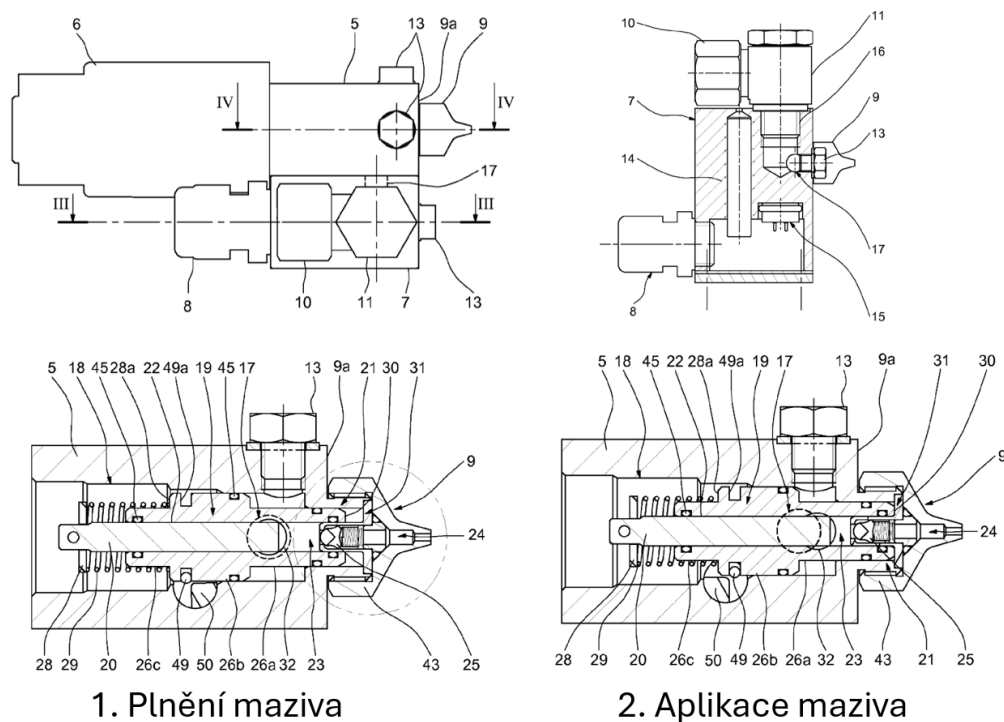
Jako vhodné a funkční se pro bez vzduchovou aplikaci jeví patenty *Lubrication Device* [21] a *Lubricating device and its use for lubricating a wheel flange of a railway vehicle* [22]

U patentu *Lubrication device* se jedná o mazací hlavu pro stacionární jednotku, kterou ovládá hydraulické čerpadlo a následně píst s pružinou, který zaručí konstantní objem maziva v kompresní komoře. U této jednotky je ovšem obtížné řídit změnu objemu aplikované dávky. Tato jednotka je znázorněna na Obr. 2-12.



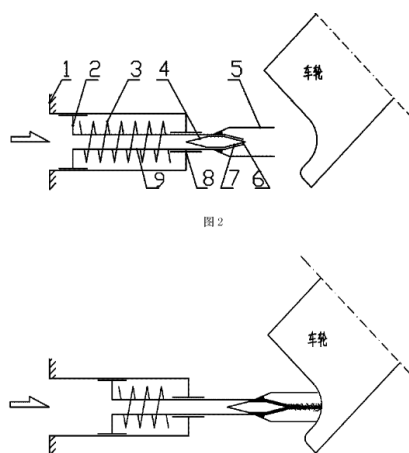
Obr. 2-12 Mazací hlava stacionární jednotky [21]

Patent *Lubricating device and its use for lubricating a wheel flange of a railway vehicle* popisuje mazací hlavu s integrovaným ohřevem maziva a nastavitelným objemem vstřikované dávky. Z konstrukčního hlediska mazivo nejprve putuje z čerpadla do ohřívacího bloku, kde dosáhne požadované provozní teploty. Odtud je kanálem 17 přiváděno do kompresní komory, ve které tažný elektromagnet stlačí píst 20 a mazivo je pod tlakem protlačeno výstupní tryskou. Obě fáze pracovního cyklu – poloha pístu před stlačením a po stlačení – jsou znázorněny na Obr. 2-13.



Obr. 2-13 Mazací hlava [22]

Další patent, konkrétně *CN102431573A*, se nezabývá vnitřní konstrukcí mazací hlavy, ale zaměřuje se na řešení problému přesnosti aplikace při vysokých rychlostech vozidla. U současných mazacích systémů se při vyšších rychlostech (zpravidla nad 60 km/h) výrazně zhoršuje přesnost nástřiku, což je způsobeno silným prouděním vzduchu v okolí rotujícího kola, které vychyluje paprsek maziva z jeho dráhy. Tento patent situaci řeší elegantním mechanismem tzv. přísuvné trysky, která se v momentě samotného mazacího cyklu přiblíží těsně k okolků kola. Výrazným zkrácením vzdálenosti, kterou musí mazivo překonat, se minimalizuje vliv aerodynamických sil a turbulencí, čímž je zajištěn přesný dopad média na požadované místo i za podmínek vysokorychlostního provozu. Znázornění tohoto principu lze vidět na Obr. 2-14.



Obr. 2-14 Přísuvná tryska [23]

2.7.2 Metody diagnostiky a řízení

Patent EP 2868546A1 – *Wheel flange lubrication for railway vehicles* [24]

Tento patent popisuje inteligentní systém pro řízení mazání okolků (WFL) na základě reálných provozních podmínek. Využívá optický monitorovací systém (digitální kamera s LED přisvícením) namířený přímo na kontaktní zónu mezi okolkem a kolejnicí. Integrovaný algoritmus v reálném čase vyhodnocuje horizontální mezeru mezi profilem okolků a hranou kolejnice [24]. K aktivaci aplikační trysky dochází pouze v okamžiku, kdy systém detekuje blížící se fyzický kontakt obou ploch (typicky při nájezdu do oblouku).

Patent US 2014/0142791 A1 – *Systém správy flotilového mazání a hluku* [25]

Tento patent zavádí koncept tzv. kolektivní inteligence pro řízení mazání napříč vozovou flotilou. Jednotlivá vozidla jsou vybavena mikrofony a senzory vibrací, které monitorují hluk (kvílení kol) v obloucích. Pokud vozidlo detekuje v konkrétním úseku zvýšenou hladinu hluku, odešle GPS souřadnice místa na centrální server. Ten data vyhodnotí a zašle instrukci vozidlům, která do úseku teprve vjíždějí, aby zde s předstihem cíleně navýšila dávkování maziva. Z hlediska řešerše patent ukazuje moderní trend nadřazeného řízení, kde

se systém nespokojí jen s autonomním dávkováním, ale dynamicky reaguje na reálnou odezvu infrastruktury a sdílí data mezi vozidly.

2.8 Shrnutí současného stavu poznání

Provedená rešerše ukazuje, že ačkoliv je mazání kontaktu kola a kolejnice intenzivně řešenou problematikou, komerčně dostupná řešení vykazují ve vztahu k tramvajovým aplikacím výrazné technologické limity.

Pneumatické systémy dominují trhu a jsou standardem u vlakových souprav, kde existují centrální rozvody stlačeného vzduchu. Jejich předností je vysoká kvalita atomizace maziva a kompaktní aplikační hlava bez pohyblivých částí. Pro tramvaje bez vzduchových rozvodů jsou však nevhodné – instalace vyžaduje přídavný kompresor a tlakovou nádobu, což zvyšuje rozměry systému a komplikuje jeho zástavbu.

Bezvzduché systémy jsou pro tramvajové aplikace koncepcí vhodnější, na trhu jsou však zastoupeny omezeně. Systémy se sekundární kompresí v mazací hlavě (SKF EasyRail Airless) umožňují vzdálenější zástavbu zásobníku, ale za cenu větší a těžší mazací hlavy s rozměrovou obálkou přibližně $200 \times 150 \times 100$ mm, která je na hranici dostupného prostoru v tramvajových podvozcích. Systémy bez sekundární komprese (Igralub TrainSys-AL) mají naopak jednoduchou hlavu, ale vyžadují umístění čerpadla v bezprostřední blízkosti kola, což je u nízkopodlažních tramvají obtížně realizovatelné.

Společným limitem všech analyzovaných systémů je absence přímé zpětné vazby o provedeném nástřiku. Přestože patentová literatura popisuje přístupy jako optické monitorování kontaktu nebo sledování zdvihu pístu, žádný komerční systém tyto metody neimplementuje. Extrémně malé dávky (řádově desítky mm³) a náročné prostředí podvozku realizaci spolehlivé zpětné vazby technologicky ztěžují. Tento stav je však v rozporu s trendem prediktivní údržby moderních drážních vozidel.

Z hlediska řízení mazání převažují reaktivní přístupy – gyroskopická detekce oblouku nebo pevné časové intervaly. Gyroskop reaguje až na skutečný nájezd do zatáčky, což může být u krátkých tramvajových oblouků příliš pozdní pro vytvoření souvislého mazacího filmu. Prediktivní GPS řízení, dostupné u jednotek Igralub a REBS, umožňuje aktivaci mazání před samotným nájezdem do oblouku, ale není standardem.

Z pohledu dávkování bylo zjištěno, že žádný komerční systém neumožňuje nezávislé přepínání dávky mezi vnitřní a vnější stranou okolku z jedné mazací hlavy. Stávající dvoutryskové systémy aplikují mazivo na obě strany současně bez ohledu na skutečný směr oblouku, což vede ke dvojnásobné spotřebě maziva. Dávka je navíc u většiny systémů pevně daná konstrukcí hlavy a minimální frekvence nástřiku kolem 1 s limituje maximální množství maziva aplikovatelné v krátkém úseku trati.

2.9 Identifikace novosti a příležitostí

Z provedené analýzy vyplývá, že zamýšlené řešení má potenciál technické i aplikační novosti zejména v následujících oblastech:

Technická a technologická novost

- Kompaktní bezvzduchá mazací jednotka optimalizovaná primárně pro tramvaje, kde absence pneumatických rozvodů činí airless koncepci logickou volbou.
- Modulární konstrukce umožňující přizpůsobení různým typům podvozků (nastavitelná poloha trysek, variabilní konfigurace).
- Možnost definovat nejmenší potřebnou dávku dle konkrétní tratě konstrukčně, nikoliv pouze intervalem, a kombinovat ji s vyšší frekvencí nástřiku než 1 s.
- Potenciální řešení dělení maziva mezi vnitřní a vnější stranu okolku z jedné hlavy, což by výrazně zvýšilo efektivitu oboustranného mazání.
- Integrace prediktivního GPS řízení místo čistě reaktivních metod.
- Lepší diagnostikovatelnost a potenciál budoucí integrace do systémů inteligentní údržby.

Ekonomická příležitost

- Snížení energetické náročnosti oproti pneumatickým systémům bez kompresoru.
- Úspora maziva díky přesnějšímu dávkování a asymetrickému řízení.
- Vyšší univerzálnost a tím širší tržní uplatnění u různých typů tramvajových podvozků.

Celkově lze konstatovat, že ačkoliv jednotlivé principy (airless aplikace, GPS řízení, ohřev maziva, asymetrické mazání) existují samostatně, jejich systematická integrace do kompaktní, modulární jednotky určené primárně pro tramvajové podvozky představuje reálnou technickou příležitost. Navrhované řešení reaguje přímo na identifikované limity současného stavu techniky a vytváří prostor pro inovaci v oblasti městské kolejové dopravy.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Předmětem práce je vývoj palubní mazací jednotky pro kolejová vozidla aplikující mazivo do kontaktu kola s kolejnicí. Mazání snižuje opotřebení obou povrchů a eliminuje hluk při průjezdu obloukem, který je zvláště problematický v tramvajovém provozu v zastavěných oblastech. Tramvaje na rozdíl od vlaků nedisponují centrálními vzduchovými rozvody, z čehož přímo plyne požadavek na bezvzduchý princip mazání.

Přesné dávkování maziva je klíčovým požadavkem, jelikož při špatném a nepřesném dávkování může dojít například ke ztrátě nebo zhoršení trakce a také ke zvětšení brzdné dráhy [8]. Mazací jednotky se podle místa aplikace dělí na dva typy. Jednotky pro mazání temene kolejnice (TOR) aplikují speciální modifikátory tření udržující součinitel tření v hodnotách $\mu = 0,3\text{--}0,4$ [8]; tato maziva obsahují tuhé částice, které zabraňují přemazání kontaktu. Jednotky pro mazání okolku (WFL) naopak usilují o minimalizaci tření – norma ČSN EN 15427 [26] stanovuje pro kontakt okolku s kolejnicí maximální hodnotu $\mu < 0,25$, přičemž optimálních výsledků se dosahuje při hodnotách kolem $\mu \approx 0,1$ [8]. Přesnost nástřiku je u WFL aplikace kritická: mazivo s nízkým součinitelem tření nesmí vytékat z kontaktu na temeno kolejnice, kde by snížilo adhezi a prodloužilo brzdnu dráhu.

Nejvíce používané pneumatické jednotky jsou sice technicky spolehlivé, ale pro tramvajový provoz nevhodné. Bez centrálních vzduchových rozvodů vyžadují instalaci vlastního kompresoru a tlakové nádoby, které kvůli nedostatku místa v podvozku bývají umísťovány na střechu vozidla. Tím se prodlužují rozvody a komplikuje údržba celého systému.

Bezvzduché jednotky jsou pro tramvajový provoz koncepcí vhodnější, ale jejich mazací hlava je oproti pneumatické konstrukčně složitější, větší a těžší, protože integruje mechanismus pro vytvoření aplikačního tlaku přímo v místě nástřiku. Dosažení dostatečné kompaktnosti pro zástavbu do omezeného prostoru tramvajového podvozku je tak hlavní konstrukční výzvou. Dalším problémem je opakovatelnost nástřiku – bez atomizace vzduchem paprsek netvoří rozprašovací kužel a jeho charakter je silně závislý na viskozitě maziva. Viskozita se přitom s teplotou výrazně mění, proto je pro zajištění konstantního objemu dávky nezbytné aktivní vyhřívání maziva.

U mazání okolku jsou již na trhu dostupné dvoutryskové hlavy aplikující mazivo na obě strany okolku, avšak u žádného komerčního řešení nebylo nalezeno nezávislé řízení trysek v závislosti na směru průjezdu obloukem. Obě strany jsou mazány vždy současně, čímž dochází ke dvojnásobné spotřebě maziva oproti teoreticky potřebnému množství a tím i k vyšším provozním nákladům.

Současné systémy rovněž neumožňují změnu objemu dávky po uvedení do provozu – konfigurace je pevně daná konstrukcí hlavy a upravuje se pouze výměnou komponent. Jednotky jsou navrhovány na míru konkrétnímu dopravci, takže pro každý typ podvozku je nutný samostatný návrh. Modulární konstrukce umožňující nastavení dávky, polohy trysek i způsobu uchycení by tuto nevýhodu částečně odstranila.

Název a klasifikace produktu

Předmětem této práce je mazací jednotka pro kolejová vozidla, určená k automatické aplikaci maziva na kolejnice a okolky kol. Zařízení pracuje na principu bezvzduchého dávkovacího systému a tvoří mechatronický prvek mazací soustavy.

Z hlediska klasifikace podle CZ-CPA lze výrobek zařadit do skupiny 29.20 – Lokomotivy a kolejová vozidla, podskupiny 29.20.30 – Části a příslušenství kolejových vozidel. Podle ČSN EN ISO 12100 se jedná o strojní zařízení splňující požadavky na bezpečnost konstrukce a provozu.

Zákazník

Zákazníkem navrhované mazací jednotky je výrobce nebo provozovatel kolejových vozidel, který požaduje systém pro automatické mazání okolků a kolejnic. Zařízení je určeno zejména pro dopravní podniky, servisní organizace a výrobce drážních vozidel, jejichž cílem je snížení opotřebení kol a kolejnic, hlučnosti provozu a zajištění dlouhodobé provozní spolehlivosti.

Spotřebitel

Spotřebitelem zařízení je provozní a údržbový personál kolejových vozidel, který zajišťuje jeho obsluhu, dohled nad činností a pravidelnou údržbu.

Návaznost na projekt

Tato diplomová práce navazuje na projekt Božek Vehicle Engineering National Center of Competence (BOVENAC). Projekt se mimo jiné zaměřuje na rozvoj vědeckých kompetencí a spolupráci v oblasti technických inovací železniční dopravy, s cílem nalézt optimální rovnováhu mezi technickými, ekologickými a ekonomickými hledisky. Využívá přirozené synergie mezi silniční a železniční dopravou.

Tab. 3 Tabulka atributů

Atribut	Charakter
Navrhované zařízení je mazací hlava s použitím vhodného čerpadla	Cíl
Bez využití stlačeného vzduchu	Cíl
Kompaktní rozměry (200 x 150 x 100 mm)	Omezení
Regulovatelná aplikovaná dávka maziva (20-50 mm ³)	Funkce
Provozní teploty od -25 °C do +50 °C	Omezení
Odolnost vůči prachu a vlhkosti	Cíl
Dvoutrysková konstrukce na vnitřní i vnější stranu okolku	Cíl
Nezávislé trysky při vstřikování na okolek	Funkce
Zpětná kontrola provedení aplikace	Cíl
Automatická aplikace maziva	Funkce
Konstrukce splňující normy ČSN pro drážní vozidla	Omezení
Vyhřívání maziva pro konzistentní aplikaci nástřiku	Funkce

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem této diplomové práce je vývoj palubní jednotky určené pro mazání okolků kolejových vozidel. Zásadním požadavkem je realizace bezvzduchého (airless) systému s možností změny dávky maziva a zpětnou kontrolou aplikace. Jednotka bude umožňovat budoucí integraci do inteligentních řídicích systému kolejových vozidel.

Dílčí cíle

- navrhnout mazací hlavu schopnou aplikovat mazivo nezávisle na vnitřní a vnější stranu okolku kola,
- zajistit regulovatelný objem dávky maziva v rozsahu 5 až 50 mm³,
- dosáhnout minimálního intervalu mezi nástřiky kratšího než 1 s,
- Navrhnout systém vyhřívání mazací hlavy zajišťující stabilní a opakovatelné dávkování nezávisle na okolní teplotě.
- ověřit funkčnost navrženého řešení experimentálním testováním funkčního vzorku.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Návrh koncepčních variant vychází z požadavků definovaných v kapitole 3 a z Tab. 3. Cílem koncepční fáze bylo navrhnout a porovnat varianty principu dávkování maziva v mazací hlavě. Pro každý koncept byl zpracován popis funkčního principu spolu s analýzou jeho předností a omezení z hlediska stanovených požadavků. Závěrem bylo provedeno vzájemné porovnání konceptů metodou Best-of-Class Chart a na jeho základě vybrán nejvhodnější koncept pro další vývoj.

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

Analýza cílů

Na základě definovaných požadavků a analýzy problému byly navrženy koncepční varianty mazací jednotky. Hlavním cílem bylo navrhnout bezvzduchovou mazací hlavu určenou pro automatickou aplikaci maziva do oblasti kontaktu okolku a kolejnice. Tento hlavní cíl byl rozdělen do dílčích cílů (Obr. 4-1), které jsou dále podrobněji rozepsány:

1. Funkční cíle

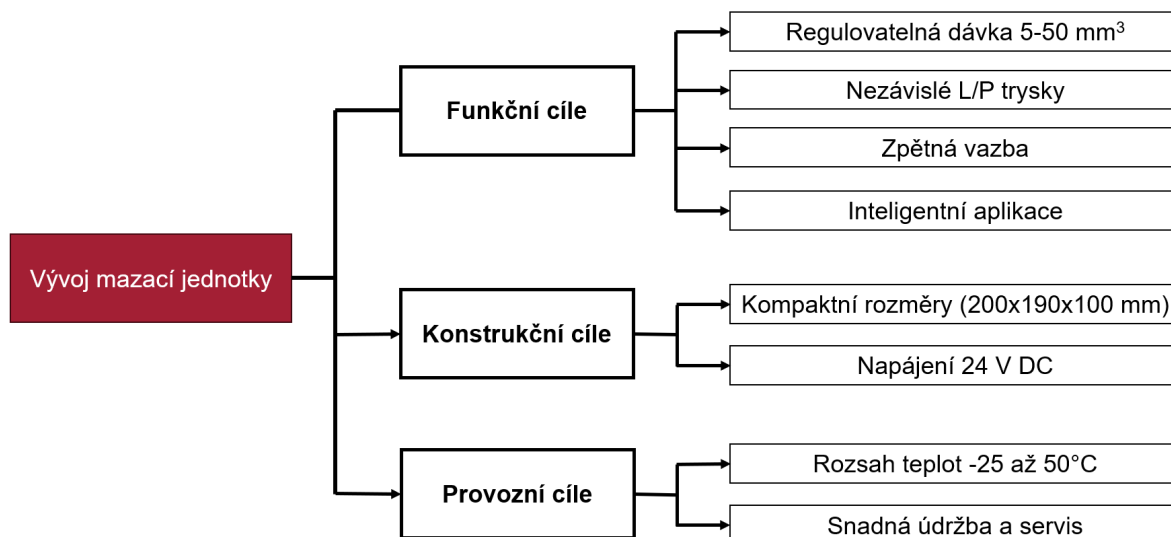
- Zajistit přesnou a řízenou aplikaci maziva na základě provozních podmínek
- Umožnit nezávislé ovládání jednotlivých trysek
- Implementovat zpětnou kontrolu o provedení aplikace
- Zajistit konstantní opakovatelnou kvalitu nástřiku

2. Konstrukční cíle

- Dosáhnout kompaktní konstrukce mazací hlavy umožňující montáž do prostoru podvozku
- Minimalizovat hmotnost a počet komponent za účelem zvýšení spolehlivosti
- Navrhnout modulární konstrukci umožňující jednoduchou výměnu nebo rozšíření systému – například změnu polohy trysek nebo poloha ustavení v podvozku

3. Provozní cíle

- Zajistit spolehlivý provoz v rozmezí teplot -25 až 50 °C
- Zajistit odolnost vůči prachu, vodě a nepříznivým podmínkám v podvozku kolejového vozidla
- Umožnit snadnou obsluhu a servis



Obr. 4-1: Strom cílů

Specifikace omezení

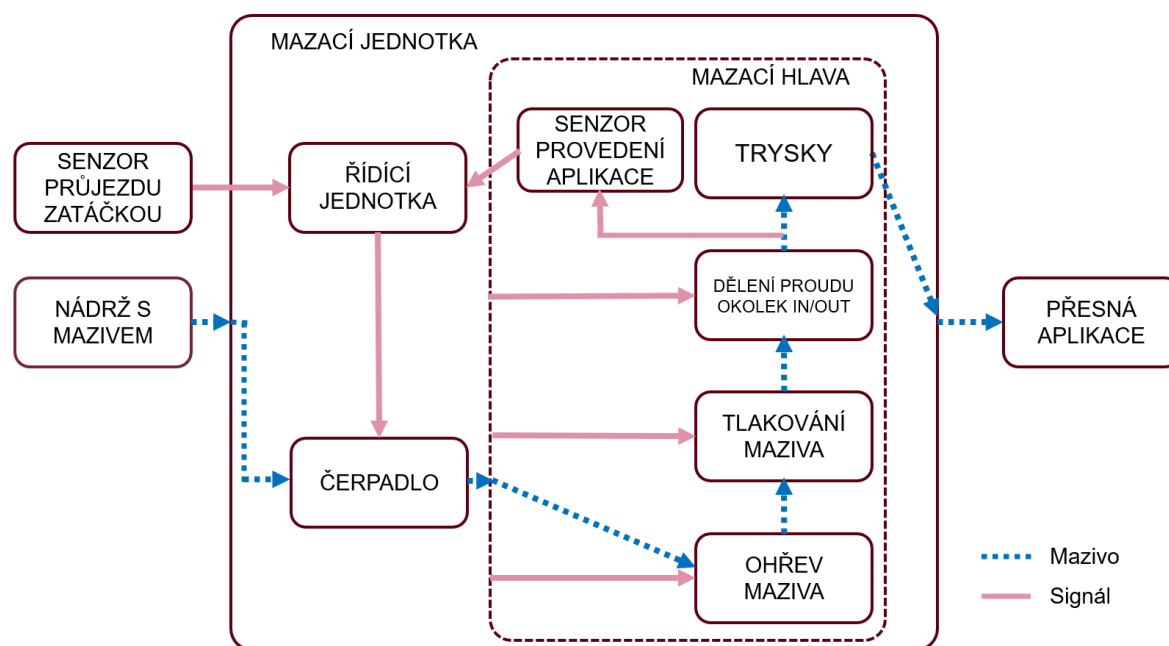
- Konstrukce musí splňovat požadavky norem ČSN EN 50155 - Drážní zařízení – Elektronická zařízení drážních vozidel [27] a ČSN EN 61373 - Drážní zařízení – Zkoušky rázy a vibracemi [28].
- Zástavbové rozměry jsou dány prostorem podvozku konkrétního kolejového vozidla.
- Napájecí napětí je omezeno na 24 V DC.
- Použitá maziva musí být kompatibilní se standardními druhy maziv pro okolky.

4.2 Technická funkční analýza

Mazací jednotka slouží k automatickému dávkování maziva do místa kontaktu okolku [a kolejnice. Zásobník maziva nelze kvůli omezenému prostoru umístit přímo do podvozku, mazivo je proto dopravováno nízkotlakým čerpadlem z nádrže umístěné jinde na vozidle. Mazací hlava vytváří aplikační tlak pro vystřikování přesně definovaných dávek v krátkých impulzech. Dávkování v malých objemech je nezbytné pro vyloučení přemazání kontaktu, při kterém dochází ke ztrátě trakce a prodloužení brzdné dráhy. Mazací hlava je umístěna v podvozku nad kolem, v poloze umožňující přesné směřování trysek na okolek.

Pro popis funkčních vazeb a principu činnosti zařízení je dále provedena technická funkční analýza pomocí metody glass box, která znázorňuje systém z hlediska vstupů, výstupů a vnitřní funkční struktury.

Pomocí metody glass box lze systém rozložit na jednotlivé dílčí funkce, jak je znázorněno na Obr. 4-2. Hlavním prvkem systému je mazací jednotka přijímající na vstupu mazivo z nádrže a signál ze senzoru průjezdu obloukem. Signál z tohoto senzoru spouští celý mazací cyklus – řídicí jednotka aktivuje čerpadlo, které dopraví mazivo do mazací hlavy. Mazací hlava vytváří aplikační tlak pro vystřikování přesně definovaných dávek v krátkých impulzech. Dávkování v malých objemech je nezbytné pro vyloučení přemazání kontaktu, při kterém dochází ke ztrátě trakce a prodloužení brzdné dráhy. Mazací hlava je umístěna v podvozku nad kolem, v poloze umožňující přesné směřování trysek na okolek.



Obr. 4-2: Glass box

V mazací hlavě se mazivo ohřívá na provozní teplotu pomocí vyhřívacího systému. Teplotní čidlo zároveň vyhodnocuje aktuální teplotu a zajišťuje, aby mazivo mělo správnou viskozitu pro aplikaci. Následně je mazivo stlačeno dávkovacím pístem na aplikační tlak.

Po dosažení aplikačního tlaku je mazivo vystřikováno přes vybranou trysku na vnitřní nebo vnější stranu okolku podle signálu z řídicí jednotky. Provedení nástřiku je zpětně vyhodnocováno senzorem na základě charakteristického poklesu tlaku v systému po výstřiku a aktuální teploty maziva. Pokud naměřené hodnoty neodpovídají očekávanému průběhu, řídicí jednotka detekuje poruchu nástřiku.

4.3 Návrh alternativních řešení

Na základě provedené funkční analýzy byly zpracovány návrhy konkrétních koncepčních variant mazací jednotky. Cílem této fáze bylo nalézt vhodné technické principy pro realizaci klíčových funkcí, zejména generování aplikačního tlaku a přesné dávkování maziva v omezeném prostoru podvozku. Následující podkapitoly popisují různá koncepční řešení, která se liší jak způsobem pohonu, tak celkovou funkčností a složitostí mechanismu. Každý koncept je popsán z hlediska principu činnosti a následně zhodnocen s ohledem na stanovené požadavky.

4.3.1 Mazací jednotka s nízkotlakým čerpadlem a pístem

Na Obr. 4-3 je znázorněn princip mazací jednotky, která využívá pístový mechanismus poháněný krokovým elektromotorem k vytvoření aplikačního tlaku potřebného pro přesné dávkování maziva. Tento koncept je navržen jako plně elektrický systém, nezávislý na pneumatickém rozvodu, s důrazem na přesnost a opakovatelnost dávkování.

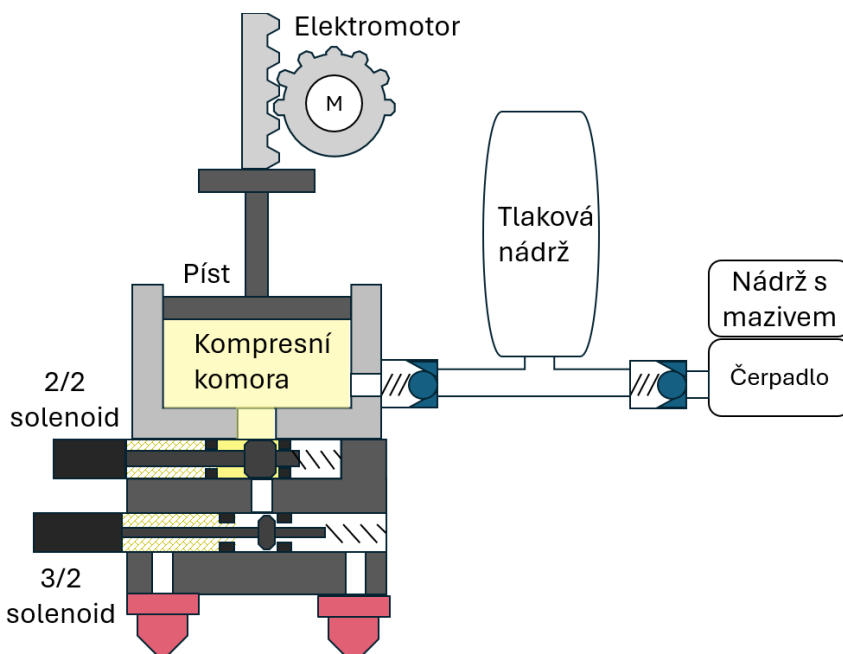
Mazivo je z hlavní nádrže dopravováno nízkotlakým čerpadlem do mezilehlé tlakové nádoby umístěné v blízkosti mazací hlavy. Tlaková nádoba zajišťuje stabilní přívod maziva do dávkovací části a kompenzuje krátkodobý pokles dodávky při rychlém sledu aplikací, kdy by čerpadlo nedokázalo reagovat dostatečně rychle. Tlak v této části systému slouží pouze k dopravě média.

Z tlakové nádoby proudí mazivo do kompresní komory, ve které se nachází píst ovládaný ozubeným hříbenem spojeným s krokovým elektromotorem. Pohybem pístu dochází k mechanickému stlačení maziva v komoře a vytvoření požadovaného aplikačního tlaku. Ovládání pístu lze navíc nastavit tak, aby při otevření ventilu motor běžel konstantní rychlostí, čímž se udržuje rovnoměrný tlak po celou dobu nástřiku.

Po dosažení požadovaného tlaku vyšle řídicí jednotka signál k přesunu 3/2 ventilu do polohy odpovídající požadované straně aplikace, poté se otevře elektromagnetický 2/2 ventil, který je v klidovém stavu uzavřen (NC). Ventil zůstává otevřen po dobu několika desetin sekundy, během nichž je na místo kontaktu okolku a kolejnice vystříknuto přesně definované

množství maziva. Po ukončení dávky se ventil uzavře a píst se vrátí do výchozí polohy, čímž se kompresní komora opět naplní mazivem z přívodního potrubí.

Tento koncept umožňuje velmi přesnou kontrolu objemu a tlaku aplikovaného maziva a eliminuje tlakové ztráty v hadicovém vedení, díky čemuž může být nádrž s mazivem umístěna i ve větší vzdálenosti od mazací hlavy. Konstrukční uspořádání zároveň umožňuje nezávislé řízení dávkování i snadnou adaptaci parametrů podle provozních podmínek.

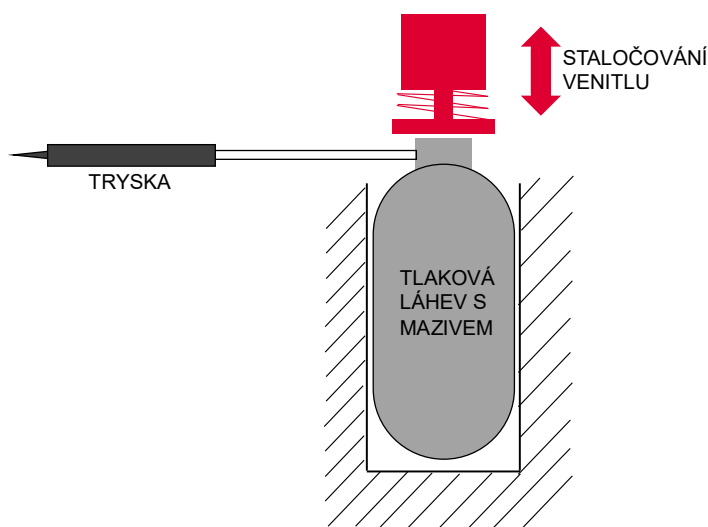


Obr. 4-3 Koncept 1

Zásadním nedostatkem této koncepce je vysoká konstrukční složitost daná počtem pohyblivých součástí – krokový motor, ozubený hřebec, píst a ventily. Pohyb pístu musí být synchronizován s otevřením ventilu, což zvyšuje nároky na řídicí software i mechanickou přesnost. S počtem součástí narůstají výrobní náklady a riziko mechanické poruchy. Výsledná sestava je rozměrově nadměrná, což je v přímém rozporu s požadavkem na kompaktnost

4.3.2 Vstřikování pomocí vyměnitelné tlakové lahve

Tento koncept využívá princip tlakové lahve s předem natlakovaným mazivem, která je umístěna přímo v blízkosti trysky. V tlakové nádobě je mazivo uloženo pod stálým přetlakem plynu, který zajišťuje potřebnou energii pro jeho aplikaci. Po přijetí povelu od řídicí jednotky dojde k otevření ventilu tlakové lahve, čímž se mazivo vytlačí přes trysku na místo kontaktu okolku a kolejnice. Schéma tohoto konceptu je znázorněno na Obr. 4-4



Obr. 4-4 Koncept 2

Aktuátor ventilu může být řešen různými způsoby – například krokovým elektromotorem, servomechanismem nebo solenoidovým spínačem, který pouze krátce uvolní výstup z tlakové nádoby. Výhodou tohoto systému je velmi jednoduché konstrukční uspořádání, které nevyžaduje čerpadlo, kompresní komoru ani pístový mechanismus. Mazivo je navíc v trysce okamžitě připraveno k aplikaci, což zajišťuje rychlou odezvu a minimální zpoždění po aktivaci mazání.

Díky tomu, že je celá jednotka kompaktní, lze ji umístit přímo do prostoru podvozku nebo v jeho blízkosti, přičemž propojení s tryskou je realizováno krátkým hadicovým vedením. Tím se minimalizují tlakové ztráty a zjednodušuje montáž i servis.

Nevýhodou tohoto řešení je malý objem tlakové lahve, který omezuje množství aplikovatelného maziva a vyžaduje častější výměnu lahví. Dalším problémem je nutnost volby maziva s vhodnými reologickými vlastnostmi, které umožní dlouhodobé skladování pod tlakem bez separace nebo změny viskozity. Vzhledem k omezenému prostoru v podvozku by tak bylo nutné použít specifické, menší tlakové zásobníky, jejichž výměna by musela být řešena z hlediska dostupnosti a bezpečnosti obsluhy.

4.3.3 Mazací jednotka se solenoidovým stlačovačem

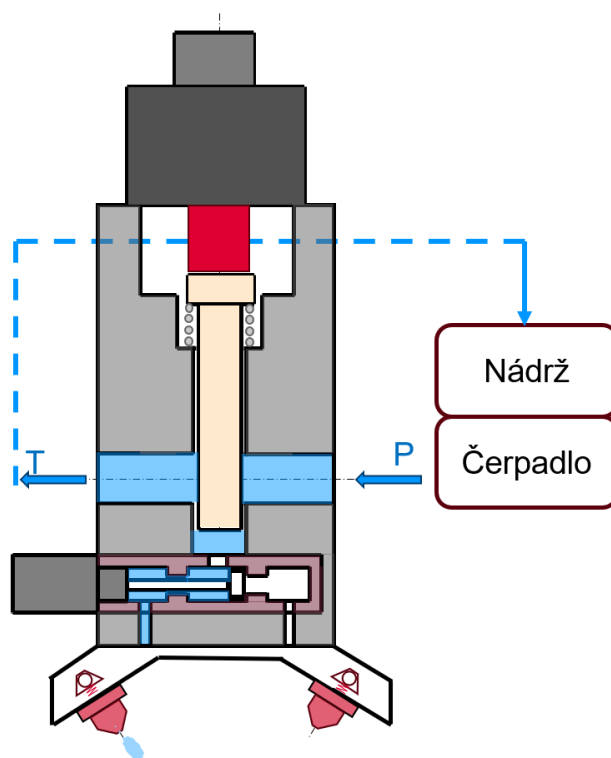
Tento koncept je založen na přímém dávkování maziva prostřednictvím solenoidově ovládaného pístu, který vytváří aplikační tlak přímo v mazací hlavě bez nutnosti pomocné tlakové nádoby. Toto technické řešení přirozeně vede k výraznému zjednodušení konstrukce a minimalizaci rozměrů, přičemž zůstává zachována přesnost dávkování.

Mazivo je nízkotlakým čerpadlem kontinuálně přiváděno do mazací hlavy z přírodního potrubí. Při aktivaci dávkovacího cyklu solenoid uvede píst do pohybu – ten nejprve uzavře přívod maziva a současně oddělí přesně definovaný objem v dávkovací komoře. Dalším pohybem pístu dojde ke stlačení izolované dávky na aplikační tlak.

Natlakované mazivo je následně vytlačeno přes zpětný ventil směrem k trysce a aplikováno na okolek. Po ukončení elektrického impulsu se solenoid deaktivuje a píst se pomocí pružiny vrátí do výchozí polohy, čímž se znovu otevře přívod maziva do dávkovací komory a systém je připraven k dalšímu cyklu.

Tento princip umožňuje rychlé a přesné dávkování malých objemů maziva s krátkou reakční dobou. Absence tlakové nádoby a přídavného čerpadla v mazací hlavě vede ke kompaktnímu a jednoduše integrovatelnému provedení.

Nevýhodou konceptu jsou zvýšené nároky na těsnění dávkovací komory a přesnost vedení pístu, jejichž nedodržení by vedlo k únikům maziva nebo kolísání objemu dávky. Systém je také citlivější na nečistoty v mazivu, které mohou ovlivnit funkci zpětného ventilu nebo způsobovat opotřebení pístu. Schéma konceptu je znázorněno na Obr. 4-5.



Obr. 4-5 Koncept 3

4.4 Analýza alternativních řešení a výběr nejlepšího

Pro porovnání jednotlivých koncepčních variant byla zvolena metoda Best-of-Class Chart, která umožňuje objektivně vyhodnotit míru splnění stanovených cílů a omezení.

Velmi důležitým parametrem je přesnost aplikace maziva, která má zásadní vliv na účinnost celého systému. V této fázi vývoje však bylo možné její hodnotu pouze odhadnout teoreticky, jelikož by pro přesné posouzení bylo nutné fyzicky vyrobit a otestovat všechny koncepty. Z tohoto důvodu má přesnost v hodnocení nižší váhu, i když se jedná o klíčový funkční parametr.

Největší váha je přiřazena kompaktnosti a jednoduchosti konstrukce, jelikož mazací jednotka musí být umístěna v omezeném prostoru kolejového podvozku. Konstrukce proto nesmí obsahovat zbytečně rozměrné ani složité komponenty a je nutné minimalizovat počet pohyblivých dílů. Tyto požadavky se promítají i do spolehlivosti zařízení, která s kompaktností úzce souvisí – jednoduchá konstrukce bývá obecně méně poruchová, ale zároveň vyžaduje správnou volbu komponent a materiálů.

Kritérium možnosti regulace dávky má střední význam, jelikož dávkování lze v praxi upravovat více způsoby – například změnou zdvihu pístu nebo změnou frekvence aplikování (konstantní dávka s proměnným intervalem opakování). Nároky na údržbu a servis představují parametr, který se promítá přímo do provozních nákladů – cílem je minimalizovat četnost zásahů, zejména doplňování maziva a čištění trysek.

Na základě těchto skutečností byly stanoveny váhové faktory, které umožňují objektivní porovnání tří navržených koncepčních variant z hlediska jejich konstrukční, funkční a provozní vhodnosti.

Tab. 4 Porovnání konceptů

Atribut	Váha	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
Přesnost a opakovatelnost dávkování	3	4	4	3
Kompaktnost a jednoduchost konstrukce	5	3	5	4
Spolehlivost a odolnost	5	3	2	4
Možnost regulace dávky	3	5	2	4
Údržba a servis	2	3	1	4
Výrobní náročnost	2	2	4	3
Celkem		67	64	78

Z analýzy alternativních řešení a Tab. 4 vychází jako nejlepší řešení koncept č. 3 s celkovým skóre 78 bodů, oproti konceptu 1 (67 bodů) a konceptu 2 (64 bodů). Koncept 3 dosahuje vyváženého hodnocení napříč všemi kritérii a jako jediný splňuje požadavek na kompaktnost bez zásadního ústupku v přesnosti nebo spolehlivosti. Byl proto vybrán jako základ pro další vývoj.

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Tato kapitola popisuje předběžný návrh řešení, který vzešel z předchozí kapitoly – Koncepční řešení. Předběžný návrh se zabývá návrhem dvou testovacích funkčních vzorků, na kterých se následně testovala celková funkčnost aplikace.

5.1 Okrajové podmínky pro návrh

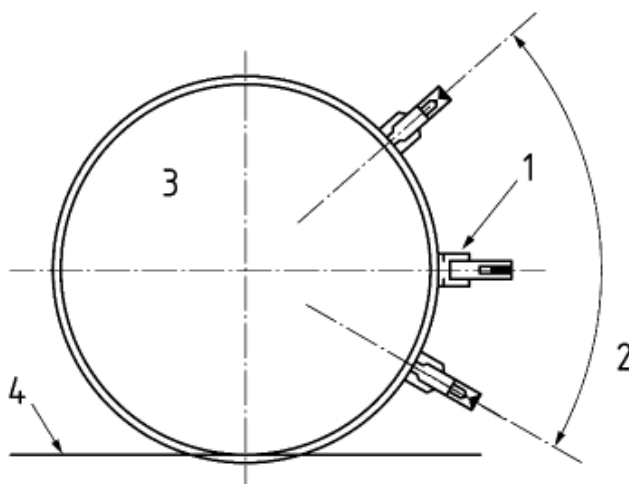
5.1.1 Zástavbové prostory

Prostorové možnosti v podvozkové části kolejových vozidel jsou značně limitované a vysoce variabilní. Konkrétní dispozice pro zástavbu se vždy odvíjí od konstrukce daného typu tramvaje, rozmístění kotvicích bodů a umístění dalších zařízení, jako například pískování nebo brzdová výstroj. Z tohoto důvodu je obecným konstrukčním cílem minimalizace vnějších rozměrů, což zvyšuje univerzálnost použití jednotky napříč různými vozidly.

Pro účely tohoto návrhu, kde není specifikován konkrétní typ vozidla, byla maximální zástavbová obálka stanovena na základě rešerše konkurenčních řešení. Jako referenční limit byly zvoleny rozměry $200 \times 150 \times 100$ mm, které vychází z konkurenční jednotky SKF.

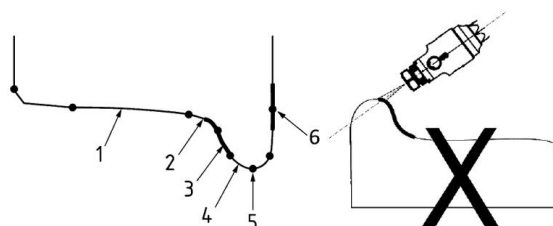
Umístění aplikátoru

Normy ČSN EN 15427-1-1 udávají také nejúčinnější polohy aplikátoru vůči samotnému kolu. Nejlépe by se mělo jednat o umístění ve vodorovné linii jako je zobrazeno na Obr. 5-1 poz. 1. Pokud je tento prostor zastavěný například brzdovou výstrojí, je možné uchycení zvolit v rozsahu 30° pod vodorovnou linií a 45° nad vodorovnou linií.



Obr. 5-1 Umístění mazací hlavy vůči vodorovné ose kola [26]

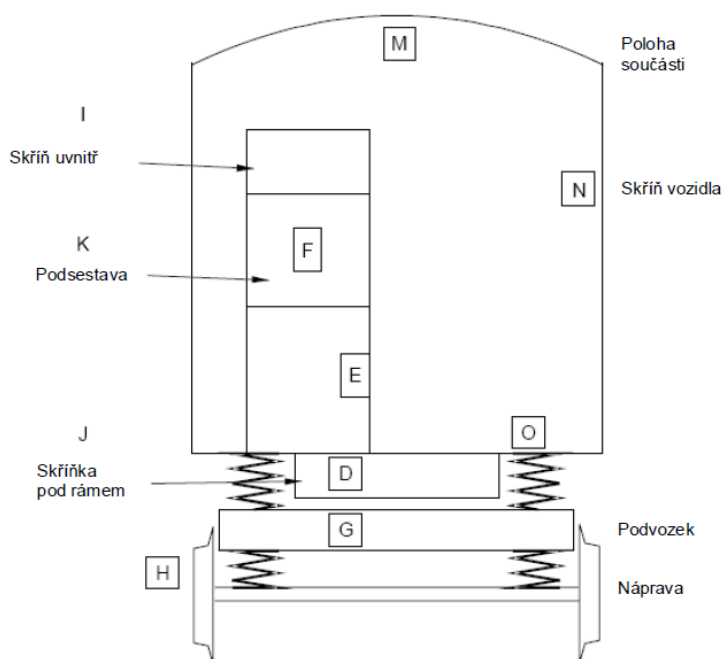
Normy dále uvádějí polohu aplikace na okolek. Jelikož v případě této práce se jedná o dvoutryskovou aplikační jednotku, která nanáší mazivo na přední i zadní bok okolků, je nutné tomu přizpůsobit natočení a polohu trysek tak, aby se mazivo nanášelo na pozici 2 a 3 (z Obr. 5-2) v případě předního boku a na pozici 6 v případě zadního boku. Konkrétní konstrukční rozměry, jako je vzájemná poloha trysek, nelze stanovit bez znalosti reálného chování paprsku maziva. Prvním krokem proto muselo být testování kvality rozstříku. Získaná data následně posloužily k přesnému nastavení vzdálenosti a úhlu aplikace tak, aby bylo zamezeno chybnému nástřiku.



Obr. 5-2 Požadovaná poloha nástřiku [26]

5.1.2 Analýza dynamického zatížení a rázů

Konstrukce mazacího zařízení musí z hlediska pevnostního návrhu odpovídat standardům, které udávají normy ČSN EN 61373-2 (Drážní zařízení – Zkoušky rázy a vibracemi) [28]. Tato norma klasifikuje zařízení pro drážní vozidla podle místa, kde se na vozidle nacházejí. S ohledem na umístění mazací hlavy na podvozku se jedná o Kategorii 2, umístění G. Toto umístění je znázorněno na Obr. 5-3.



Obr. 5-3: Kategorie vůči umístění [28]

Podle umístění se pozice dělí na kategorie, určují samotné zkoušky rázy a vibracemi. Dle normy musí být zařízení dimenzováno tak, aby odolalo zkušebním rázům, které simulují ojedinělé podmínky:

- Špičkové zrychlení (A): $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Doba trvání impulsu (D): 18 ms
- Charakter impulsu: Polosinusový průběh
- Směr působení: Nezávisle ve všech třech vzájemně kolmých osách (podélná, příčná, svislá)

Dále musí být zařízení navrženo tak, aby odolalo provozním vibracím, které simulují běžné provozní podmínky:

- Zrychlení ve svislém směru: $30,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Zrychlení ve příčném směru: $26,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Zrychlení v podélném směru: $14,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- Doba trvání: 15 h ($3 \times 5 \text{ h}$)

U návrhu Gfunk1, který slouží hlavně k testování celkové funkčnosti se samotná analýza neprovedla, jelikož to v této části práce není předmětné. U zkoušek vibracemi a přetížení má velmi velký vliv na únosnost hmotnost a předpokládá se, že u finálního funkčního vzorku se hmotnost změní. Dalším důvodem byla skutečnost, že jsou tyto rázy a vibrace kritické pro kotevní body, které uchycují mazací zařízení k vozidlu a kotevní body slouží u Gfunk1 pouze pro uchycení do stojanu.

5.2 Testované parametry

Klíčovým požadavkem mazací jednotky je přesná a opakovatelná aplikace velmi malého množství maziva (v řádech desítek mm^3). Vzhledem k dynamické povaze dávkovacího procesu vstupuje do návrhu řada parametrů, jejichž vliv na kvalitu výstřiku nebylo možné v této fázi spolehlivě stanovit pouze konstrukčním výpočtem. Aby bylo možné definovat přesné požadavky pro finální zařízení, byla zvolena strategie výroby univerzální testovací jednotky (Gfunk1). Tento vzorek slouží jako testovací zařízení, jehož primárním účelem je ověření funkčnosti principu vstřikování a testování variant použitých komponent.

Následně byla vytvořena druhá testovací mazací hlava (Gfunk2), která se od prvního vzorku (Gfunk1) liší výhradně integrací ventilu pro dělení maziva do dvou trysek. Tento metodický postup byl zvolen za účelem zajištění maximální validity experimentálních dat. Samotný mechanismus dělení maziva pomocí solenoidového ventilu může mít velký vliv na výslednou kvalitu nástřiku. Pokud by testování probíhalo rovnou na složitější variantě s dělením a došlo ke zhoršení, případně celkové nefunkčnosti, nebylo by možné jednoznačně identifikovat hlavní příčinu problému. Vytvořením dvou takřka identických mazacích

hlav - jedné přímé a druhé s dělicím mechanismem – došlo k izolaci této proměnné. Tento přístup spolehlivě eliminuje riziko zkreslení výsledků a umožňuje exaktně vyhodnotit, jaký reálný vliv má přítomnost dělicího ventilu na celkovou kvalitu a parametry dávkování.

Konstrukce Gfunk1 byla navržena tak, aby umožňovala v rámci jednoho tělesa snadno měnit klíčové komponenty a provozní nastavení viz kapitola 5.2.1. Tímto postupem lze efektivně nalézt optimální konfiguraci celého zařízení bez nutnosti nákladné výroby několika různých funkčních vzorků. Získaná data a ověřené parametry následně sloužily jako závazný podklad pro konstrukci finálního zařízení.

5.2.1 Definice ověřovaných parametrů

Pro testování a validaci systému byly stanoveny následující klíčové parametry, které je potřeba prakticky ověřit.

- Rozsah a velikost aplikovatelné dávky
- Charakter výstupního paprsku a geometrie trysky
- Funkce zpětných ventilů
- Provozní podmínky

Rozsah a velikost aplikovatelné dávky

Ačkoliv je objem dávky v průběhu provozního cyklu konstantní, různé typy drážních vozidel a odlišné provozní podmínky vyžadují možnost individuálního nastavení tohoto parametru před uvedením do provozu. Aby byla finální jednotka univerzálně použitelná, musí umožňovat statickou konfiguraci objemu v určitém rozsahu.

Konkrétním cílem bylo ověření stabilní funkčnosti v rozsahu dávek 5-50 mm³ a určení ideálního rozsahu. Vzhledem k frekvenci opakování bylo nutné ověřit, že se kompresní komora stihne doplnit mazivem od externího čerpadla. Aplikovaná dávka musí zůstat konstantní napříč všemi cykly po dobu aplikace. Nedílnou součástí zkoušek bylo i ověření reálné aplikované dávky v porovnáním s objemem kompresní komory.

Charakter výstupního paprsku a geometrie trysky

Zařízení pracuje na principu bezvzduché aplikace, kde na rozdíl od pneumatických systémů nelze využít stlačeného vzduchu k atomizaci maziva. U viskózního maziva je v tomto režimu velice náročné dosáhnout typického rozprašovacího kužele bez použití velmi vysokých tlaků. Vzhledem k těmto technickým a fyzikálním limitům nelze s jistotou předem určit výsledné chování nástřiku a tvar paprsku. V rámci vývoje bylo proto zahrnuto testování různých trysek s různými průměry a geometrií s cílem experimentálně určit konfiguraci, která nejlépe splňuje kritéria optimálního nástřiku definovaná v kapitole 5.2.2.

Funkce zpětných ventilů

V navržené konstrukci jsou zpětné ventily umístěny až za kompresní komorou, kde plní klíčovou funkční roli. V klidovém stavu musí ventil bezpečně oddělit trysku od přívodního okruhu a zabránit tak samovolnému průchodu maziva, které je v tělese neustále pod tlakem od podávacího čerpadla. Druhou funkcí je zajištění správné dynamiky výstřiku – ventil musí zůstat uzavřený během počáteční fáze pohybu pístu, čímž umožní nárůst tlaku v komoře, a otevřít se skokově až po dosažení požadované pracovní hodnoty.

Cílem praktického ověření bylo nalézt optimální otevírací tlak (tzv. cracking pressure), který vyhoví oběma těmto požadavkům. Bylo nutné otestovat různé charakteristiky pružin s cílem identifikovat nastavení, které spolehlivě udrží plnicí tlak čerpadla, ale zároveň nebude představovat neúměrnou zátěž pro elektromagnet při pracovním zdvihu. Záměrem bylo dosáhnout stavu, kdy se ventil otevře až v momentě dostatečného natlakování dávky, což zajistí prudký a čistý výstřik namísto pozvolného vytékání.

Provozní podmínky

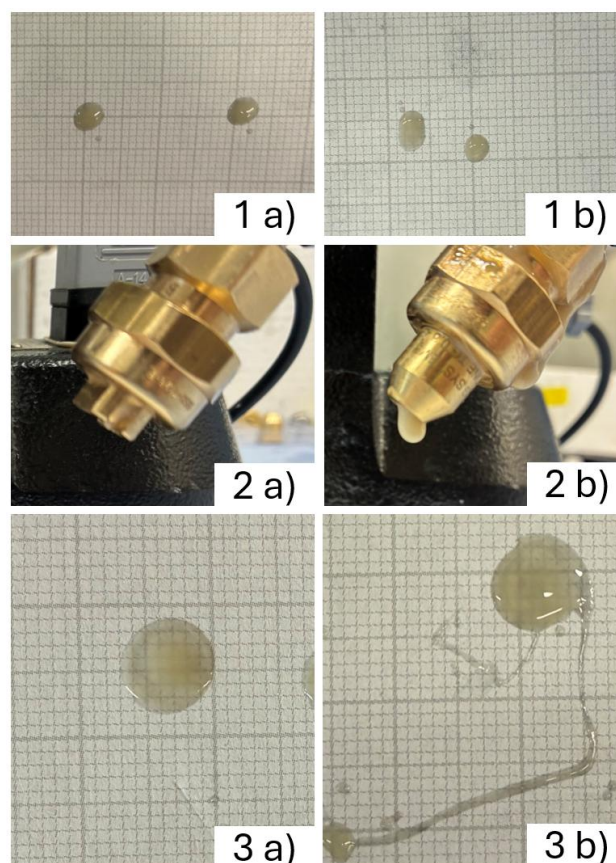
Spolehlivost aplikační hlavice v reálném drážním provozu je přímo závislá na stabilitě fyzikálních vlastností maziva. Jelikož se viskozita plastických maziv NLGI 00/000 s klesající teplotou výrazně zvyšuje, byla pro zajištění konstantních podmínek zvolena koncepce s aktivním vyhříváním. Pro návrh topného elementu a regulace je však nezbytné experimentálně stanovit cílovou provozní teplotu.

Cílem měření bylo nalézt ideální teplotu, při které má mazivo již dostatečně nízkou viskozitu pro bezproblémový průchod systémem a kvalitní rozstřík, ale který je zároveň energeticky a konstrukčně dosažitelný.

Druhým klíčovým parametrem je tlak maziva na vstupu do jednotky. Ten musí být dostatečný k tomu, aby v krátkém čase mezi jednotlivými cykly dokázal protlačit viskózní mazivo do pracovní komory a plně ji zaplnit. Cílem měření bylo stanovit minimální nutnou hodnotu tohoto tlaku pro danou pracovní teplotu, která zaručí spolehlivou funkci i při maximální frekvenci spínání.

5.2.2 Definice optimálního nástřiku

Pro objektivní hodnocení výsledků testování bylo nezbytné předem stanovit kritéria optimálního nástřiku, vůči kterým jsou výsledky porovnávány. Na Obr. 5-4 jsou znázorněny vždy dvě varianty – optimální (a) a nevyhovující (b).



Obr. 5-4 Porovnání optimálního a nevhodného nástřiku

Prvním kritériem je opakovatelnost dávky při aplikaci. Objem aplikovaného maziva musí zůstat konstantní napříč všemi cykly, přičemž tvar a plocha dopadu paprsku musí být při zachování shodných okrajových podmínek identické. Na Obr. 5-4 pozice 1 a) jsou oba nástřiky shodné, zatímco snímek pozice 1 b) ukazuje nevyhovující stav, kdy se velikost dopadové plochy mezi jednotlivými cykly liší.

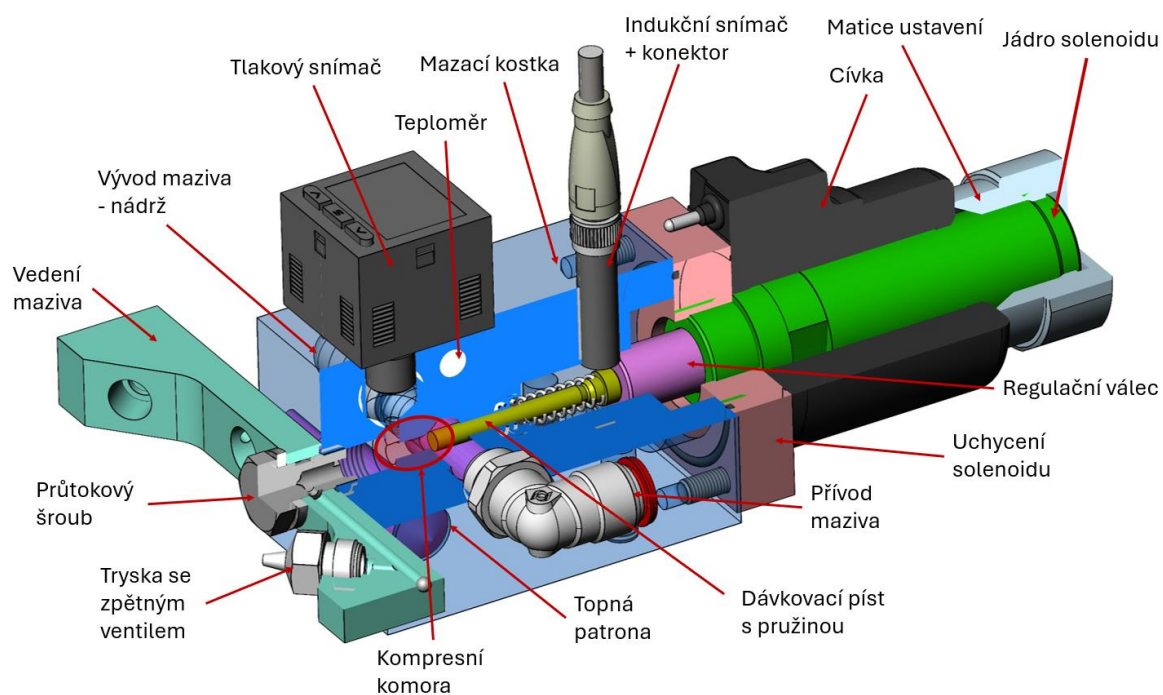
Druhým kritériem je absence úkapů. Při aplikaci maziva nesmí docházet k zachytávání maziva na konci trysky. Na Obr. 5-4 pozice 2 a) zachycuje trysku v klidovém stavu bez residuálního maziva, zatímco pozice 2 b) dokumentuje nevyhovující stav, kdy se mazivo zachytává na výstupu trysky. Takto akumulované mazivo následně ovlivňuje geometrii i objem nástřiku, který dopadá na okolek.

Třetím kritériem je jednoduita paprsku. Z trysky musí vystupovat jeden kompaktní paprsek s geometrií odpovídající typu použité trysky, bez štěpení do více proudů nebo chaotického rozstříku mimo předpokládanou oblast dopadu. Na Obr. 5-4 pozice 3 a) ukazuje optimální stav s kompaktní kruhovou dopadovou plochou, pozice 3 b) pak nevyhovující případ vláknění maziva, kdy se táhne v chaotických vláknech mimo cílovou oblast.

5.3 Konstrukční popis testovací mazací hlavy

Funkční vzorek 1 (Gfunk1)

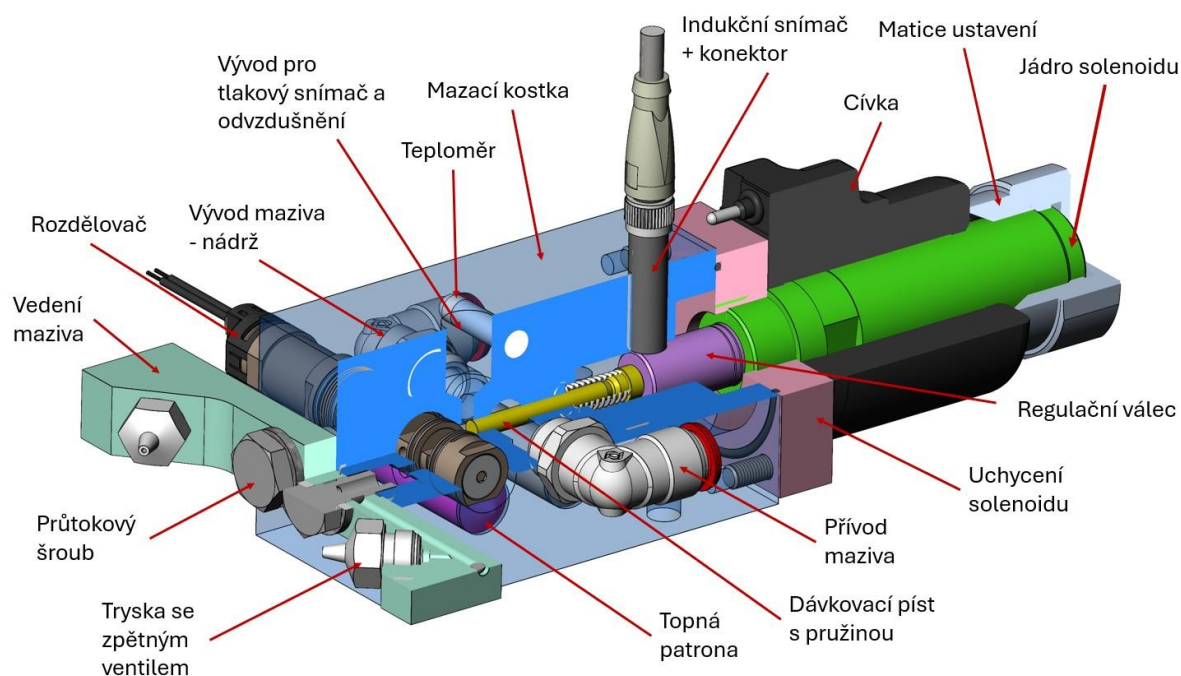
Funkční vzorek 1 byl navržen a vyroben jako primární testovací platforma pro experimentální ověření parametrů definovaných v předchozí kapitole. Jedná se o jednotryskovou jednotku s jediným funkčním vývodem maziva. Nosné těleso je řešeno jako hydraulický monoblok – mazací kostka (viz Obr. 5 4) z hliníkové slitiny EN AW-2017, která integruje většinu funkčních prvků: dávkovací píst, vyhřívání, senzor tlaku, vratnou pružinu, systém rozvodných kanálů i výstupní trysku do jednoho celku. Zařízení je navrženo tak, aby umožňovalo snadnou demontáž a výměnu kritických komponent, což je nezbytné pro testování různých variant v průběhu vývoje bez nutnosti výroby nového nosného tělesa. Volba hliníkové slitiny EN AW-2017 byla podřízena požadavku na nízkou hmotnost a snadnou obrobitelnost – ta umožňuje operativní provádění dodatečných úprav, jako je převrtání kanálů či úprava závitů pro různé typy trysek, přímo v průběhu testování. Masivní hliníkové těleso zároveň zajišťuje dostatečnou tuhost pro zachycení tlakových špiček v hydraulickém obvodu.



Obr. 5-5 Konstrukce mazací hlavy funkčního vzorku 1

Funkční vzorek 2 (Gfunk2)

Po úspěšné validaci funkčních principů u Gfunk1 byl navržen Funkční vzorek 2, jehož základ je konstrukčně totožný s Gfunk1. Oproti němu přibývá jediný nový prvek – solenoidový ventil pro dělení toku maziva, který přepíná mezi levou a pravou výstupní tryskou. Zavedení tohoto ventilu do hydraulického obvodu nevyhnutelně mění jeho odpor, a tím i podmínky nástřiku. Aby byl tento vliv měřitelný a jednoznačně přiřaditelný právě ventilu, bylo nezbytné zajistit, že Gfunk1 a Gfunk2 se budou lišit výhradně jeho přítomností. Z tohoto důvodu byla komponenta vedení maziva zpětně instalována i na Gfunk1 s jedním zaslepeným vývodem, čímž se sjednotila geometrie hydraulické trasy obou vzorků. Při porovnání nástřiku Gfunk1 a Gfunk2 za shodných okrajových podmínek tak jakýkoliv rozdíl ve výsledcích přímo odráží vliv dělicího ventilu. Propojení nosného tělesa s vedením maziva zajišťují průtokové šrouby, které distribuují mazivo z centrální kostky do kanálů trysek. Mazací hlava Gfunk2 je znázorněna na Obr. 5-6.



Obr. 5-6 Konstrukce mazací hlavy funkčního vzorku 2

5.3.1 Elektromagnetický pohon a mechanismus regulace zdvihu

Zdrojem pohybové energie pro vytlačení maziva je lineární elektromagnet (solenoid) s napájecím napětím 24 V DC. Ten působí na ocelový dávkovací píst o průměru 4 mm, který zprostředkovává přenos síly na kapalinu v kompresní komoře. Návrat pístu do výchozí polohy po skončení elektrického impulsu (fáze sání) zajišťuje vinutá tlačná pružina, umístěná koaxiálně na dřívku pístu.

Solenoidové jádro s cívkou bylo zvoleno na základě doporučení společnosti Tribotec, která s touto komponentou disponovala provozními zkušenostmi z aplikace bezvzduché mazání řetězů. V uvedené aplikaci plnil solenoid funkci aktuátoru v soustavě s progresivním rozdělovačem maziva: při sepnutí mechanicky stlačoval pístky rozdělovače, čímž zajišťoval dávkování maziva do jednotlivých mazacích míst. Princip funkce je s navrhovanou mazací hlavou analogický, neboť v obou případech solenoid generuje přímočarý pohyb pístu proti hydraulickému odporu maziva. Tato shoda v provozním principu poskytovala dostatečnou jistotu, že komponenta bude způsobit pro zamýšlenou aplikaci.

Spojení mazací kostky s jádrem a tělesem solenoidu zajišťuje komponenta uchycení solenoidu a matice ustavení. Důležitým funkčním prvkem, který vymezuje prostor mezi dávkovacím pístem s pružinou a pístem v jádře solenoidu, je regulační válec. Změnu délky tohoto válce lze regulovat aplikovatelné množství maziva.

- Princip nastavení: Regulační válec plní funkci distančního prvku mezi sestavou dávkovacího pístu a jádrem solenoidu. Jeho délka určuje výchozí polohu pístu vůči hraně kompresní komory. Zdvih jádra solenoidu je při každém pracovním cyklu konstantní (6 mm), přičemž efektivní část tohoto zdvihu, po kterou dochází ke skutečnému stlačování maziva v kompresní komoře, závisí právě na délce regulačního válce. Kratší válec znamená, že píst startuje dále od hrany kompresní komory a část zdvihu se spotřebuje na překonání této vzdálenosti – do kompresní komory se tak dostane pouze menší část zdvihu a objem dávky je menší. Delší válec posune výchozí polohu pístu blíže k hraně a větší část zdvihu probíhá přímo v kompresní komoře, čímž se objem dávky zvětšuje.

Výpočet objemu dávky a délky regulačního válce

Objem vytlačeného maziva je definován plochou pístu a jeho efektivním zdvihovým rozsahem v kompresní komoře. Geometrické uspořádání mechanismu, ze kterého výpočet vychází, je znázorněno na Obr. 5-7. Pro stanovení nastavitelného rozsahu dávkování jsou určeny následující vztahy:

Plocha průřezu dávkovacího pístu S_p určí ze zadaného průměru:

$$S_p = \frac{\pi d_p^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} = 12,57 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

Poloha těsnicí hrany L_{seal} (vzdálenost od nulové polohy jádra, od které píst uzavře přívod a začíná stlačovat mazivo) je dána polohou osy přívodního kanálu a jeho průměrem:

$$L_{seal} = L_A + \frac{D}{2} = 63 + \frac{8,8}{2} = 67,4 \text{ mm} \quad (2)$$

Efektivní zdvih pístu h_{eff} (dráha, po kterou dochází ke stlačování):

$$h_{eff} = (L_R + l_p + h) - L_{seal} = (L_R + 36 + 6) - 67,4 = L_R - 25,4 \text{ mm} \quad (3)$$

Výsledná rovnice pro délku regulačního válce L_R při požadovaném objemu dávky V :

$$L_R = \frac{V}{S_p} + 25,4 = \frac{V(\text{mm}^3)}{12,57 \text{ mm}^2} + 25,4 \text{ mm} \quad (4)$$

Kde:

V – požadovaný objem vytlačené dávky maziva v mm^3 ,

d_p – průměr dávkovacího pístu (4 mm)

L_a – vzdálenost osy přívodního kanálu od nulové polohy (63 mm)

D – průměr přívodního kanálu maziva (8,8 mm)

l_p – délka dávkovacího pístu (36 mm)

h – zdvih pístu v elektromagnetu (6 mm)

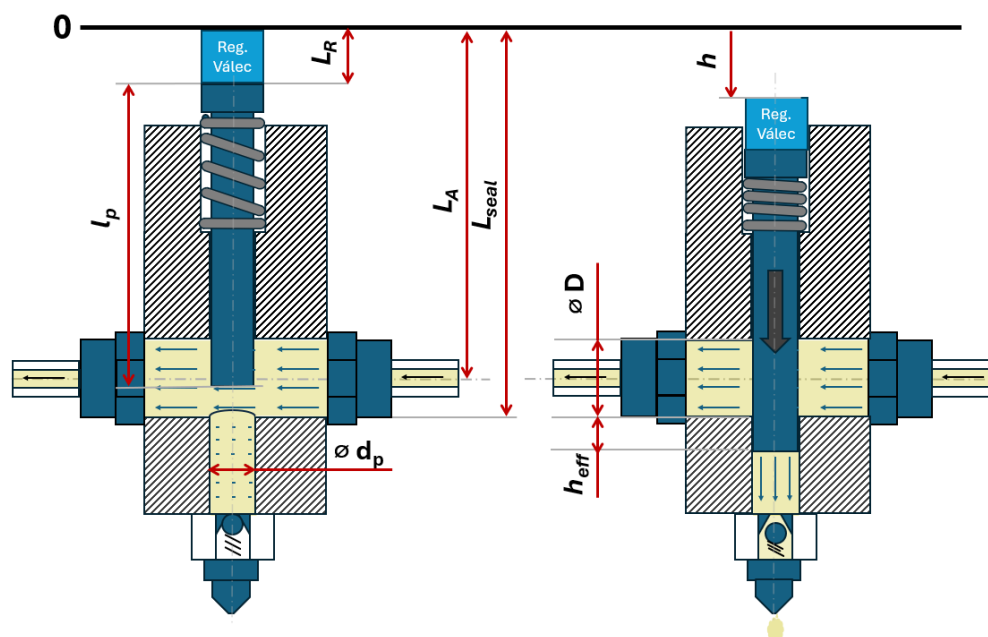
Stanovení funkčního intervalu

Dosazením mezních hodnot objemu dávky $V_{\min} = 5 \text{ mm}^3$ a $V_{\max} = 50 \text{ mm}^3$ do vztahu (4) získáme limitní délky regulačního válce:

$$L_{R,\min} = \frac{5}{12,57} + 25,4 = 25,8 \text{ mm} \quad (5)$$

$$L_{R,\max} = \frac{50}{12,57} + 25,4 = 29,4 \text{ mm} \quad (6)$$

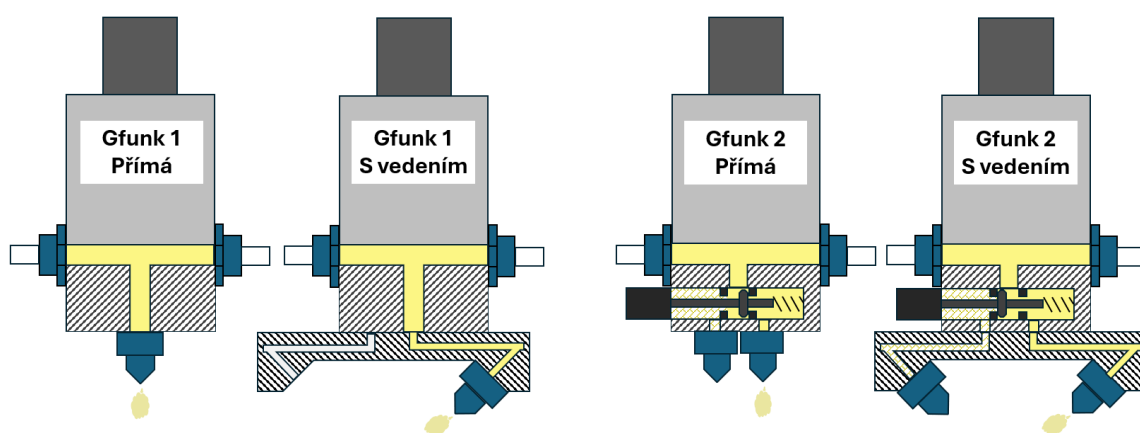
Po zjištění požadovaného rozsahu dávkování musí být délka regulačního válce nastavitelná v intervalu: $L_R \in <25,8; 29,4> \text{ mm}$.



Obr. 5-7 Znázornění uspořádání mechanismu

5.3.2 Výstupní trysky

Obě mazací hlavy byly nejprve testovány v přímé konfiguraci, tedy s tryskou připojenou přímo k mazací kostce bez komponenty vedení maziva, jak je znázorněno na Obr. 5-8. Po ověření základní funkčnosti bylo vedení maziva instalováno na obě hlavy, přičemž na Gfunk1 byl druhý kanál hluchý. Testováním Gfunk1 s vedením maziva se zajistilo, že hydraulická trasa obou vzorků se liší pouze přítomností dělicího ventilu a lze snadno ověřit, jaký má rozdělovač vliv na nástřik. Testování pak pokračovalo v této konfiguraci odpovídající reálnému nasazení. Za pravou trysku je považována větev aktivní při vypnutém solenoidu děliče, levá tryska je aktivována jeho sepnutím.



Obr. 5-8 Konfigurace výstupních trysek

Pro uchycení trysek je těleso opatřeno standardním závitem **M10x1**. Tento rozměr byl zvolen s ohledem na širokou dostupnost průmyslových trysek v této velikostní kategorii, což usnadňuje testování různých typů bez nutnosti výroby redukci. V druhé řadě tento závit umožňuje v krajním případě částečně zašroubovat i trysku se závitem G1/8.

Konstrukce výstupní části je navržena s variabilitou umístění zpětných ventilů:

- Varianta A (Zobrazená): Použití trysek, které mají zpětný ventil již integrován přímo v tělese. Toto řešení minimalizuje mrtvý objem za ventilem. (Viz tryska na Obr. 5-5.
- Varianta B (Alternativní): V případě, že by integrované ventily nevykazovaly požadované parametry (např. nevhodný otevírací tlak), bylo by možné vyvrtat odsazení pro nalisování zpětného ventilu přímo do mazací kostky

5.3.3 Senzorika a elektroinstalace

Pro zajištění stabilních podmínek a jejich ověření je testovací mazací hlava vybavena prvky pro regulaci teploty a snímání tlaku a indukčním snímačem polohy.

- **Vyhřívání a měření teploty:** Funkční vzorek 1 a 2 obsahuje dvě elektrická topná tělesa patronového typu a výkonu 2 x 20 W, která slouží k ohřevu celého bloku a tím

i protékajícího maziva na požadovanou provozní teplotu. Pro zpětnovazební regulaci je do tělesa zaveden i teplotní senzor. Za použití těchto prvků s jednoduchou mikroprocesorovou deskou (Arduino UNO) byl následně vytvořen jednoduchý termostat, který reguluje napájení vytápění na požadovanou teplotu.

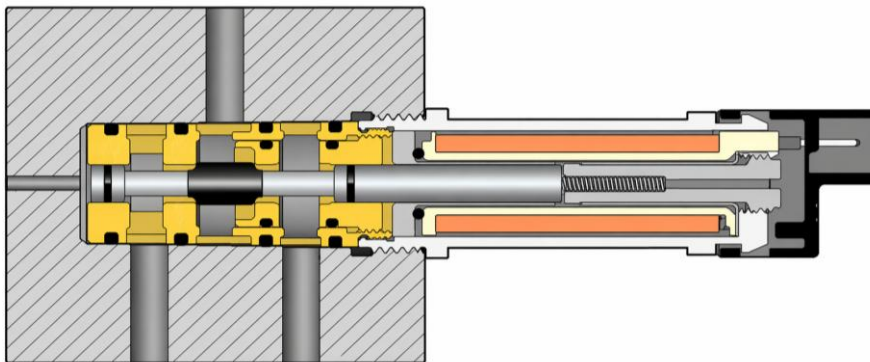
- **Snímání tlaku:** Hydraulický obvod je opatřený snímačem tlaku v místě kompresní komory. Tento senzor slouží k analýze změny tlaku během pracovního cyklu a následném vyhodnocení průběhu nástřiku. Sleduje zejména pokles tlaku při aplikaci a hodnotu maximálního tlaku při ideálním nástřiku.
- **Indukční snímač:** Na Obr. 5-5 je znázorněna i poloha indukčního snímače, který slouží ke snímání polohy regulačního válce. Tento indukční snímač slouží podobně jako senzor tlaku pro vyhodnocení nástřiku. Jeho poloha je nastavena tak, že dokáže snímat polohu všech regulačních válců bez překrytí.

5.3.4 Dělení proudu

Pro zajištění dělení toku maziva mezi levou a pravou trysku byl u Gfunk2 integrován solenoidový ventil 3/2 (dvupolohový se třemi vývody). Konkrétně se jedná o ventil typu Bullet Valve® od výrobce MAC®, který se vyznačuje paralelním uspořádáním vývodů a automatickým utěsněním nevyužitě větve po přepnutí. Ventil pracuje při tlaku až 120 psi (8,3 bar) a je napájen 24 V DC. Uvedené informace pocházejí přímo z komunikace s dodavatelem.

Těleso ventilu vyžaduje specifickou geometrii vrtání v rozváděcí kostce a jeho instalace předpokládá speciální nástroj dodávaný výrobcem. Proto byl ventil objednan spolu s výrobcem dodaným polotovarem kostky s přesným vrtáním.

Pro účely testování byla zvolena katalogová varianta ventilu s klasickou koncovkou. Bylo ověřeno, že výrobce na vyžádání dodává varianty určené pro kolejovou dopravu s certifikovanými a vibračně odolnými koncovkami. Pro potřeby funkčního vzorku však katalogová varianta postačuje. Ventil je znázorněn na Obr. 5-9. Uvedené informace pocházejí přímo z komunikace s dodavatelem.



Obr. 5-9 3/2 Solenoidový ventil Bullet Valve® [29]

5.3.5 Čerpadlo s nádrží a mazivem

Pro zajištění kontinuálního přívodu maziva do testovacího monobloku byl zvolen více vývodový mazací přístroj řady PMP od společnosti Tribotec, spol. s.r.o. Integrované čerpadlo s nádrží lze vidět na Obr. 5-10.



Obr. 5-10 PMP Čerpadlo s nádrží [30]

Významnou konstrukční výhodou tohoto zařízení je jeho integrovaná koncepce, kdy jednotka plní současně funkci zásobníku maziva i zdroje tlaku. Díky tomu, že čerpadlo a nádrž tvoří jeden kompaktní celek, nebylo nutné pro potřeby testování budovat složitý hydraulický okruh s externí nádrží, což výrazně zjednodušilo přípravu zkušebního stanoviště a ušetřilo zástavbový prostor.

Z technického hlediska byly pro výběr tohoto agregátu rozhodující následující parametry:

- Regulovatelnost průtoku: Čerpací jednotka umožňuje plynulé nastavení množství dodávaného maziva v závislosti na použité pracovní jednotce (nominálně v rozsahu $0,8-7,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$). Tato vlastnost je klíčová pro experimentální část, kdy je nutné ověřit schopnost plnění komory solenoidového dávkovače při různých rychlostech přítoku.
- Kompatibilita napájení: Elektromotor čerpadla pracuje s napětím 24 V DC, což koresponduje s napájecí soustavou navrženého solenoidu i s palubní sítí tramvaje.
- Vhodnost pro viskózní média: Přístroj je konstruován pro čerpání plastických maziv až do třídy NLGI 2, což s rezervou pokrývá požadavky na testované mazivo NLGI 00/000.

Pro dimenzování čerpadla vycházel požadovaný průtok z předpokládaných provozních podmínek. Při standardní frekvenci aplikace s intervalem 1 s a maximální dávce V5 (50 mm^3) je požadovaný průtok $Q_I = 3,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Pro pokrytí tohoto průtoku byly pro prvotní testování na funkčních vzorcích zvoleny dvě pracovní jednotky, každá s průtokem $1,5 \text{ cm}^3/\text{min}$, jejichž vývody byly sloučeny do jedné výstupní hadice.

Po ověření, že mazací jednotka dokáže spolehlivě fungovat i ve zkráceném aplikačním režimu s intervalem 0,15 s (viz kapitola 5.4.3) bylo nutné přehodnotit požadovaný průtok čerpadla. Při maximální dávce V5 a zkráceném intervalu odpovídá požadovaný průtok $Q_2 = 20,0 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Pro pokrytí tohoto průtoku byly do hydraulického okruhu zařazeny tři pracovní jednotky čerpadla PMP, každá s průtokem $7,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Pro účely testování byla použita nádrž o objemu 2 dm^3 , která byla podle potřeby ručně doplňována mazivem. Volba nádrže a čerpadla pro finální produkt je předmětem kapitoly 6.

Nasazení tohoto sériově vyráběného komponentu bylo rovněž podpořeno úzkou spoluprací se společností Tribotec. Využití již existujícího a ověřeného řešení tak představovalo nejen technický přínos, ale i značnou ekonomickou úsporu, neboť eliminovalo náklady na vývoj a výrobu vlastního plnicího agregátu.

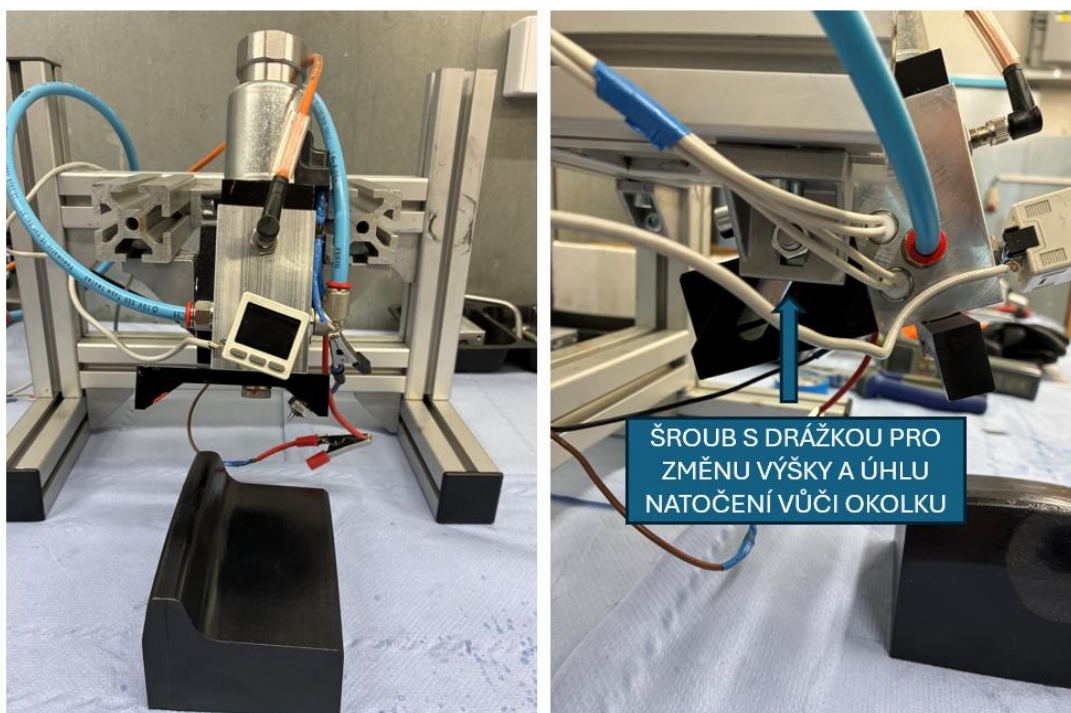
Jako mazivo bylo zvoleno BECHEM EcoRail 2009, které se ve velké míře využívá pro mazání okolků u firmy Tribotec. Jeho parametry jsou popsány v kapitole 2.4.2.

5.4 Metodika testování

Experimentální ověřování probíhalo ve dvou fázích odpovídajících oběma funkčním vzorkům. Na Gfunk1 byl systematicky zkoumán vliv geometrie trysky, aplikované dávky a teploty maziva na kvalitu nástřiku. Gfunk2 byl následně testován za účelem ověření, zda implementace solenoidového děliče proudu zachová parametry nástřiku v rozsahu obou výstupních větví. Výsledky jsou hodnoceny kombinací kvantitativních měření hmotnosti dávky a kvalitativního posouzení nástřiku dle kritérií definovaných 5.2.2.

5.4.1 Testovací stojan a konfigurace testování

Pro zajištění opakovatelnosti a srovnatelnosti výsledků byl navržen a vyroben univerzální testovací stojan z hliníkových profilů, znázorněný na Obr. 5-11. Stojan umožňuje plynulé nastavení výšky a natočení mazací hlavy vůči simulovanému okolků. Jako referenční vzdálenost trysky od okolků bylo zvoleno 40 mm. Jelikož každá tryska má odlišnou vzdálenost konce od vedení maziva umožnil stojan posunout celou mazací jednotku tak, aby vzdálenost od ústí trysky k okolků byla vždy 40 mm. Součástí stojanu je také segment simulovaného okolků, který zajišťuje reálný úhel dopadu maziva.



Obr. 5-11 Testovací stojan s maketou okolku při montáži Gfunk1

Testování probíhalo ve čtyřech konfiguracích popsaných v kapitole 5.3.2, přehledně znázorněných na Obr. 5-8. Přímá konfigurace (bez vedení maziva) sloužila výhradně k prvotnímu ověření základní funkčnosti obou vzorků. Veškeré výsledky prezentované v následujících kapitolách vychází z konfigurací s instalovaným vedením maziva. Z hlediska metodiky je klíčové, že Gfunk1 s vedením maziva a Gfunk2 sdílí identickou hydraulickou trasu s výjimkou přítomnosti dělicího ventilu, čímž je možné jeho vliv na parametry nástřiku přímo kvantifikovat.

Pro testování vlivu geometrie trysky na nástřik byly zvoleny tři trysky stavebnicového systému UniJet (viz Obr. 5-12) a jedna tryska od alternativního výrobce. Systém UniJet umožňuje kombinovat jedno tělo s převlečenou maticí s různými koncovkami a zpětnými ventily, takže není nutné pořizovat každou variantu trysky jako samostatný celek. Celkem byly testovány 4 trysky dle Tab. 5.

Tab. 5 Testované trysky

Tryska	Koncovka	Propustný tlak
Tryska 1	Flat	1,4 bar
Tryska 2	Full Cone	1,4 bar
Tryska 3	Hollow Cone	1,4 bar
Tryska 4	-	5 bar



Obr. 5-12 UniJet tryska stavebnicového typu [31]

5.4.2 Použité měřicí nástroje

Pro vyhodnocování měření byly použity tyto nástroje

Měření hmotnosti dávky: Analytická váha Momert 6000 s rozlišitelností 0,1 g.

Měření a regulace teploty: Voděodolný teploměr pro jednodeskové počítače DS18B20 s termostatem na bázi Arduino UNO, který řídil napájení patronových topných těles v bloku mazací hlavy.

Snímání tlaku: Snímač SMC ZSE20A zapojený v kompresní komoře. Snímač má funkci zobrazení maximálního dosaženého tlaku.

Indukční snímač polohy: Snímač IE5457 umístěný kolmo k ose regulačního válce (viz Obr. 5-5). Měří míru zákrytu citlivé plochy hranou válce, výstupní hodnoty tedy neodpovídají lineárnímu posuvu v mm. Snímač pracuje při frekvenci 600 Hz, přičemž přenos přes IO-Link je omezen na 10 Hz. Pro účely záznamu průběhu bylo proto sepnutí solenoidu prodlouženo na 1 s.

5.4.3 Postup měření a hodnocení metriky

Veškerá experimentální měření v rámci této práce byla prováděna s plastickým mazivem BECHEM EcoRail 2009, jehož složení, klasifikace a teplotní charakteristika jsou podrobně popsány v rešeršní kapitole 2.4.2. Pro účely převodu mezi hmotností a objemem aplikované dávky byla použita hustota maziva $\rho = 0,96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Vzhledem k tomu, že rozlišení použité analytické váhy (0,1 g) neumožňuje přímé vážení jednotlivé dávky o objemu řádově jednotek až desítek mm^3 , byla pro každou měřenou konfiguraci provedena série $N = 100$ nástřiků na podložku a následně zvážena celková aplikovaná hmotnost. Průměrná hmotnost jedné dávky byla získána jako podíl celkové hmotnosti a počtu nástřiků. Pro kontrolní

ověření byla provedena nezávislá série $N = 50$ nástřiků. Hodnoty objemu uvedené v tabulkách dále v této kapitole jsou přepočítány z naměřené hmotnosti dle vztahu $V = m / \rho$.

Kvalita nástřiku byla hodnocena dle kritérií optimálního nástřiku definovaných v kapitole 5.2.2, konkrétně přítomnost úkapu, výskyt sekundárního rozstřiku, symetrie a koncentrace paprsku a stálost dávky během opakovaného nástřiku.

Měření probíhalo ve dvou časových režimech, které jsou definovány následovně:

- **Referenční interval** (1 s) - odpovídá předpokládané dávkovací frekvenci a slouží jako výchozí pracovní bod pro veškerá srovnávací měření.
- **Zkrácený interval** (0,15 s) – byl zvolen jako dolní mez intervalu, kterou systém dokáže ovládat. Tato hodnota není teoretickým limitem mechanické konstrukce, ale praktickým limitem použité spínací elektroniky (relé).

V rámci zkráceného intervalu byla posuzována zejména opakovatelnost aplikace, tedy schopnost systému udržet konstantní tvar, rozměr a hmotnost nástřiku i při krátkém intervalu mezi cykly.

5.5 Výsledky

V této kapitole jsou shrnuty výsledky experimentálního testování funkčních vzorků 1 a 2.

5.5.1 Výsledky testování Gfunk1

Celková funkčnost

Základní oživení a odvzdušnění: Při prvotním spuštění se jako kritický faktor ukázala nutnost dokonalého odvzdušnění celého traktu, a to jak u trysky, tak u tlakového snímače. Vzhledem k dávkování malých objemů způsobovala i malá vzduchová bublina celkovou ztrátu funkčnosti. Po důkladném odvzdušnění jednotka vykazovala spolehlivý a stabilní chod.

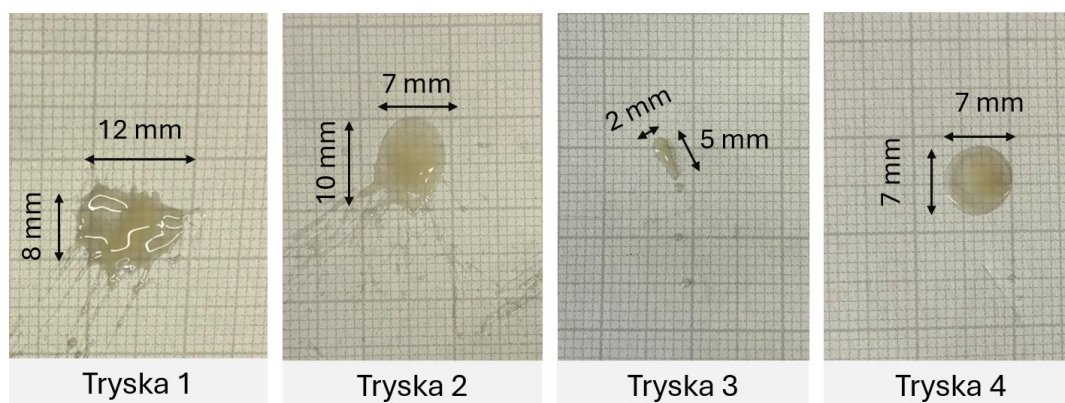
Vliv vedení maziva na nástřik: Po instalaci komponenty vedení maziva (viz kapitola 5.3.2) bylo ověřeno, že zvýšení hydraulických ztrát vzniklé vybočením kanálků vůči ose pístu nijak zásadně neovlivnilo nástřik. Nastavená přitlačná síla pružiny je pro kompenzaci těchto ztrát dostatečná.

Vliv trysky na nástřik

Součástí testování bylo i ověření vhodnosti zpětných ventilů pro systém UniJet. Zkoušky potvrdily, že použití zpětného ventilu je nezbytné, protože bez něj docházelo k nechtěným úkapům a nepravidelnosti nástřiku. Ačkoliv jsou pro systém UniJet dostupné zpětné ventily

s různými otevíracími tlaky, výrobcem doporučená hodnota 1,4 bar (20 psi) se ukázala jako ideální. Tryska č. 4 od alternativního výrobce má pevný otevírací tlak 5 bar, který nelze měnit.

Na Obr. 5-13 je zachycen reprezentativní vzorek nástřiku pro každou trysku při teplotě 30 °C a dávce 3 (odpovídá objemu 20-25 mm³ v závislosti na trysce). Tryska 1 s koncovkou Flat vykazuje největší plochu nástřiku (12 × 8 mm) s mírně zploštělým tvarem. Tryska 2 s koncovkou Full Cone vytváří kompaktnější a symetričtější stopu (7 × 10 mm). Tryska 4 pak produkuje nejkoncentrovanější nástřik s kruhovou stopou průměru 7 mm, který se blíží přímému paprsku. Jelikož tyto trysky nejsou primárně určeny pro bezvzduchovou aplikaci, jsou rozdíly mezi jednotlivými geometriemi méně výrazné než u pneumatických systémů a tvar nástřiku není primárním kritériem výběru.



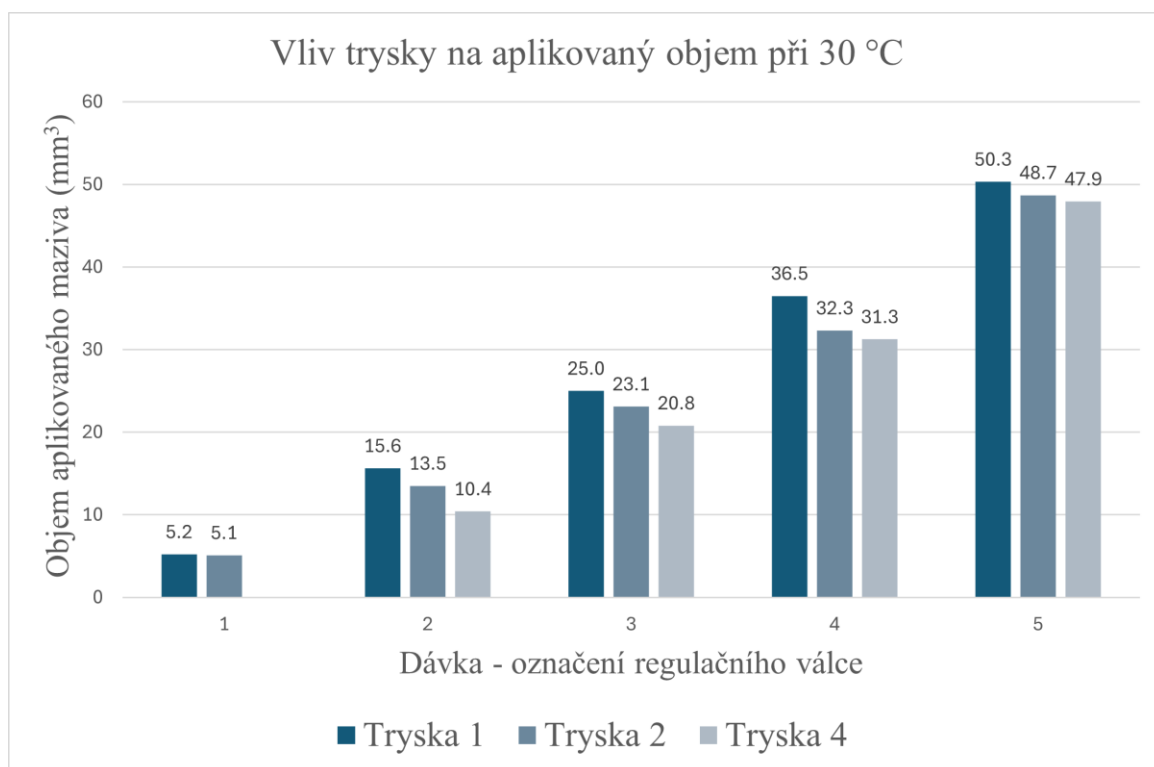
Obr. 5-13 Vliv trysky při 30 °C a dávce 3

Tryska 3 s dutým kuzelem se při zkouškách ukázala jako zcela nevhodná pro bezvzduchovou aplikaci. Mazivo z trysky téměř nevystřikovalo a z výstupu pouze slzelo a tvořilo úkap. V ojedinělých případech došlo k náhodnému výstřiku, jehož objem byl výrazně menší než očekávaná dávka. Opakovatelnost byla zcela nedostatečná, přičemž po výstupu maziva typicky následovalo 10 až 15 cyklů bez jakékoliv aplikace. Toto chování bylo pozorováno napříč celým rozsahem testovaných dávek i teplot, tryška 3 proto byla z dalšího testování zcela vyřazena a ve výsledcích dále nefiguruje.

Vliv aplikované dávky jednoho cyklu na nástřik

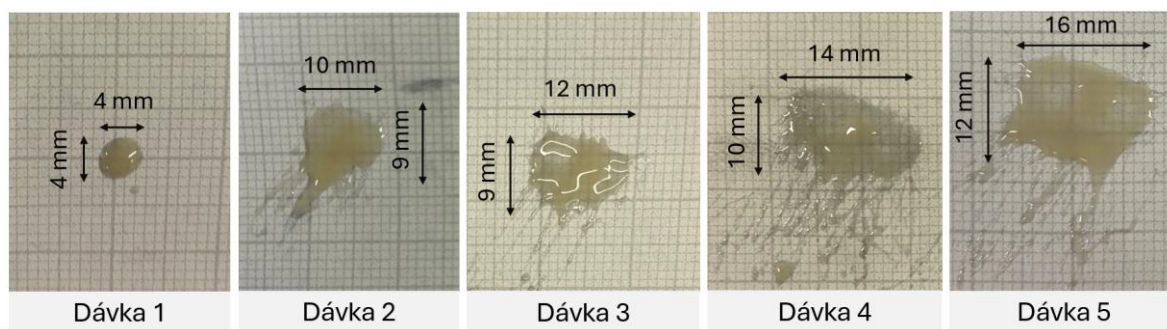
Cílem této části testování bylo experimentálně ověřit schopnost mazací jednotky regulovat objem aplikované dávky v rozsahu definovaném v kapitole 5.3.1 Regulace byla realizována pomocí pěti regulačních válců (V1–V5) s lineárně se zvětšující délkou. Měření proběhlo pro tři funkční trysky (T1, T2, T4); tryška T3 byla vyřazena z důvodů uvedených v kapitole Vliv trysky na nástřik. Veškerá měření v této podkapitole byla provedena při referenční teplotě 30 °C; vliv teploty na aplikovaný objem je rozebrán v následující kapitole Vliv teploty maziva na nástřik. Postup vážení dávky odpovídá metodice popsané v kapitole 5.4.3

Z naměřených hodnot (Obr. 5-14) vyplývá, že navržené řešení splňuje cílový rozsah regulace dávky 5–50 mm³. Mezi jednotlivými tryskami je patrný systematický rozdíl v absolutních hodnotách objemu v pořadí T1 > T2 > T4, který přímo koresponduje s otevíracím tlakem integrovaných zpětných ventilů (T1 a T2 – 1,4 bar; T4 – 5 bar). Vyšší otevírací tlak T4 znamená, že při daném zdvihu pístu musí být v komoře vyvolán větší tlakový gradient, čímž se část energie spotřebuje na otevření ventilu místo na vlastní vytlačení maziva. U největšího válce V5 je rozdíl mezi T1 a T4 přibližně 2,4 mm³ (cca 5 % relativně), u středního válce V3 dosahuje 4,2 mm³ (17 %). Krajním případem je kombinace T4 / V1, kde nedošlo k funkční aplikaci ani po opakovaném důkladném odvzdušnění systému; aplikovaná dávka byla pravděpodobně absorbována v hydraulickém vedení, takže tlakový ráz nepřekonal otevírací tlak ventilu.



Obr. 5-14 Vliv trysky na aplikovaný objem maziva při 30 °C

*Hodnoty představují průměr ze 100 nástřiků dělený 100, přepočtený na objem dle hustoty maziva; Při kombinaci T4 / V1 nedošlo k aplikaci dávky

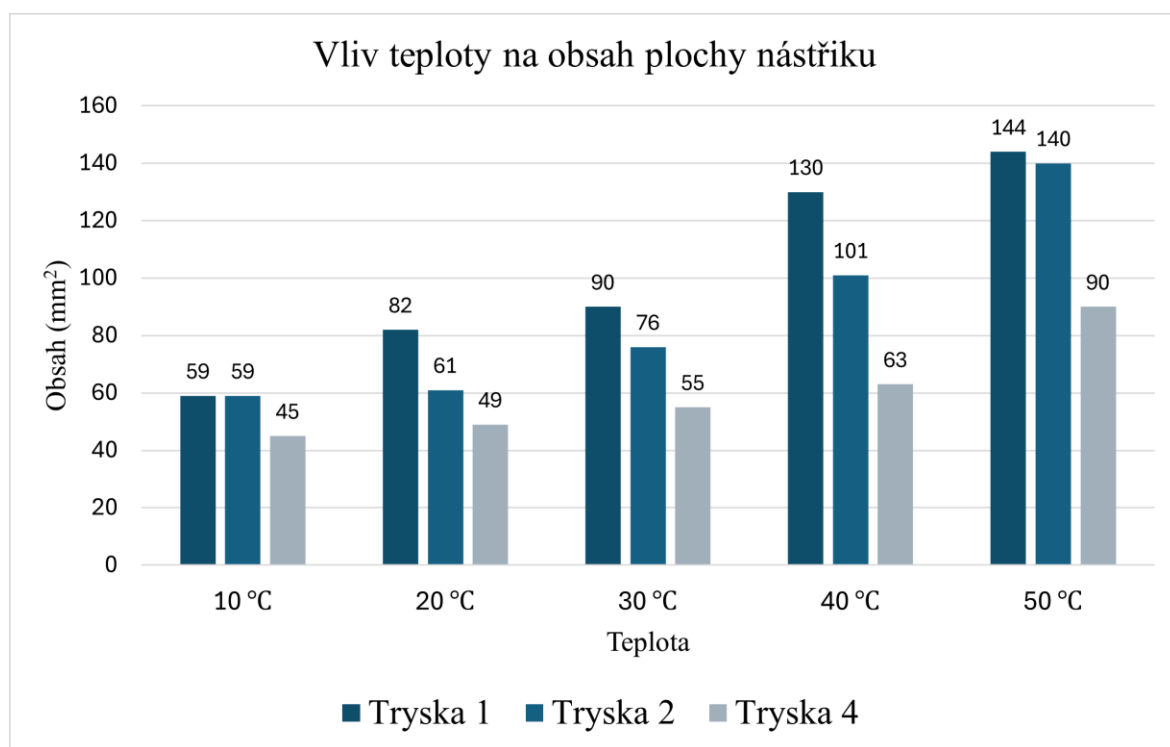


Obr. 5-15 Vliv dávky na nástřik při trysce 1 a teplotě 30 °C

Vliv teploty maziva na nástřík

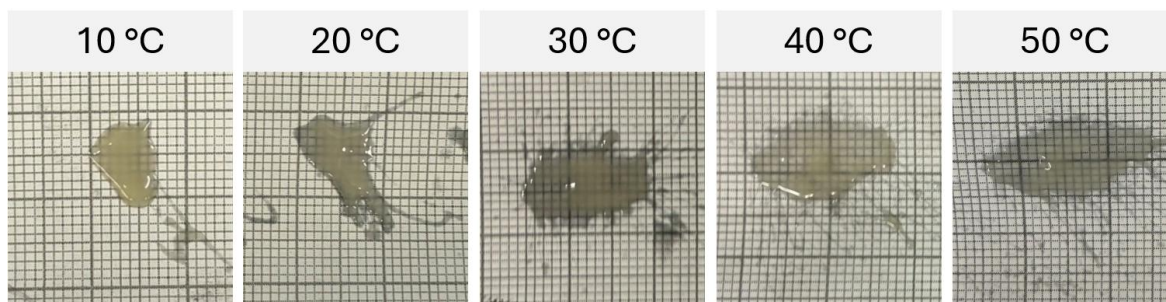
Vlastnosti plastického maziva BECHEM EcoRail 2009 jsou silně závislé na jeho aktuální teplotě – se zvyšující se teplotou klesá viskozita a mění se schopnost trysky formovat požadovaný paprsek. Tato závislost má přímý dopad na velikost a charakter aplikované plochy nástříku.

Měření vlivu teploty bylo provedeno v rozsahu 10–50 °C s krokem 10 °C pro všechny tři funkční trysky (T1, T2 a T4) a pro celý rozsah regulačních válců (V1 až V5). Pro detailní vyhodnocení byla vybrána reprezentativní dávka V3, pro kterou byla z fotografií nástříků na milimetrovém papíru vyhodnocena plocha pokryté oblasti (Obr. 5-16). Vizuální srovnání reálného vzhledu nástříku v závislosti na teplotě je pro jednu trysku zobrazeno na Obr. 5-17. Souhrnné hodnocení kvality nástříku pro všechny kombinace válec × teplota × tryska je prezentováno formou map využitelnosti (viz Obr. 5-19). Záporné teploty nebyly do experimentu zařazeny, protože je jednotka vybavena vyhříváním, které má za cíl udržet stabilní pracovní teplotu nezávisle na okolním prostředí.



Obr. 5-16 Vliv teploty na obsah plochy nástříku (pro dávku V3)

Při testování v celém teplotním rozsahu byla u krajních hodnot ověřena stabilita dávkovaného množství; změna teploty tedy neovlivňuje kvantitu naneseného maziva, nýbrž jeho schopnost pokrýt plochu. Z Obr. 5-16 plyne, že rostoucí teplotou dochází k výraznému nárůstu obsahu plochy nástříku, což je nejvíce patrné u trysky T1 (2,7násobný nárůst) a T2 (2,8násobný nárůst). Tryska T4 vykazuje v tomto ohledu stabilnější chování s nárůstem plochy cca 2,3krát.



Obr. 5-17 Vliv teploty na nástřik pro Trysku 1 s dávkou V3

Teplota 10 °C: Viskozita maziva je nejvyšší v testovaném rozsahu. Plocha nástřiku je nejmenší – 59 mm² pro T1 a T2, 45 mm² pro T4. Mazivo opouští trysku v kompaktním tvaru, geometrie koncovky se v něm neuplatňuje. Tlakový ráz nedokáže rozptýlit mazivo s vysokou viskozitou.

Teplota 20 °C: Viskozita klesá natolik, že u T1 plocha narůstá na 82 mm² (+47 % proti 10 °C). U T2 a T4 je nárůst mírný (61 a 49 mm²). Geometrie koncovky T1 začíná být viditelná, nástřik je stabilní, bez úkapu i bez rozstříku.

Teplota 30 °C: Plocha nástřiku je 90 mm² pro T1, 76 mm² pro T2 a 55 mm² pro T4. Nástřik je u všech trysek plně stabilní a opakovatelný, geometrie koncovek je jasně rozpoznatelná. Tato teplota je dále použita jako referenční pro vyhodnocení vlivu dávky a opakovatelnosti.

Teplota 40 °C: Plocha nástřiku roste výrazně u T1 (130 mm², +50 % proti 30 °C) a T2 (101 mm²). U T4 je nárůst stále mírnější (63 mm²). Paprsek se začíná rozšiřovat nad cílovou plochu, u T1 jsou viditelné jednotlivé kapky odrážené mimo hlavní oblast nástřiku.

Teplota 50 °C: Plocha dosahuje maxima u všech trysek – T1 = 144 mm², T2 = 145 mm², T4 = 90 mm². Při této teplotě se objevuje jev vláknění (stringing): mazivo opouští trysku v podobě tenkých vláken, která se v letu trhají na dopadají různě mimo požadovanou oblast. Současně topná patrona při zkráceném intervalu aplikace nestíhá udržovat cílovou teplotu maziva v komoře – chladnější mazivo přiváděné z nádrže odebírá tepelnou energii rychleji, než ji topný systém dodává.

Stabilní a kvalitní výsledky nástřiku byly v rámci měření pozorovány v rozsahu 20–40 °C. Jako cílová provozní teplota systému byla stanovena hodnota 30 °C s tolerancí ± 5 °C. Tato volba představuje ideální kompromis, neboť při 30 °C tryška dosahuje optimálních parametrů, přičemž lze předpokládat, že i v rámci stanoveného tolerančního pásma zůstane kvalita nástřiku na vysoké úrovni. Tato teplota je navíc v letních měsících často dosažitelná i bez nutnosti vyhřívání systému.

Opakovatelnost

Pro provozní nasazení mazací jednotky je kromě správné velikosti a kvality dávky podstatná také opakovatelnost aplikace – schopnost systému při stejných okrajových podmínkách opakovaně dodávat dávky shodného objemu, plochy nástřiku a kvality paprsku. Cílem této

podkapitoly je ověřit opakovatelnost při dvou intervalech aplikace: referenčním intervalu 1 s a zkráceném intervalu 0,15 s, který odpovídá dolní mezi spínání popsané v kapitole 5.4.3.

Pro ověření vlivu zkráceného intervalu na objem aplikované dávky byla provedena doplňující měření v krajních bodech regulačního rozsahu, tj. pro nejmenší a největší regulační válec. U trysky T4 byl namísto válce V1 použit válec V2, neboť kombinace T4/V1 nevykazuje funkční aplikaci (viz **Vliv trysky na nástřík**). Pro každou kombinaci byla provedena série N = 100 nástřiků, které se zvážily a přepočítly na objem jednoho nástřiku. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Objem dávky v krajních bodech rozsahu při referenčním a zkráceném intervalu (T=30 °C)

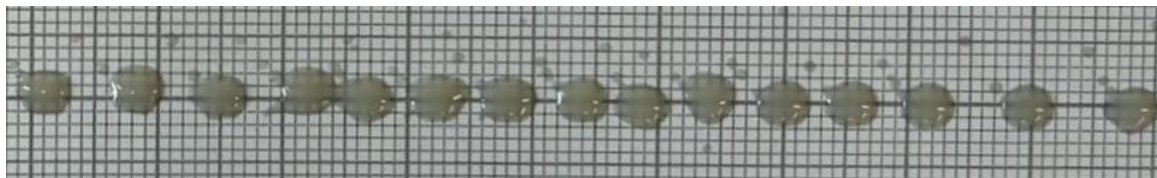
Tryska	Válec	Interval	Objem dávky (mm ³)	Odchylka (%)
T1	V1	1 s	5,2	—
T1	V1	0,15 s	5,2	0 %
T1	V5	1 s	50,3	—
T1	V5	0,15 s	49,3	-2 %
T2	V1	1 s	5,1	—
T2	V1	0,15 s	5,2	+2 %
T2	V5	1 s	48,7	—
T2	V5	0,15 s	46,9	-4 %
T4	V2	1 s	10,4	—
T4	V2	0,15 s	10,4	0 %
T4	V5	1 s	47,9	—
T4	V5	0,15 s	46,8	-2 %

Z dat v Tab. 6 vyplývá, že hmotnost dávky se mezi referenčním a zkráceným intervalem nemění o více než ± 4 %, a to ani pro nejmenší ani pro největší konfiguraci regulačního rozsahu. Pozorované odchylky mohou být částečně způsobeny odrazem maziva od stěn sběrné nádoby při vyšším počtu nástřiků, kdy se kalíšek plní a malé množství maziva se může odrazit ven.

Z hlediska hydrauliky systém při intervalu 0,15 s pracuje bez omezení. Podávací čerpadlo PMP stíhá doplnit kompresní komoru v době mezi nástřiky. Tlakové poměry v okruhu se před zahájením dalšího cyklu plně obnoví a otevírací tlak zpětných ventilů je překonán v obou provozních režimech.

Vedle hmotnosti dávky byla v rámci zkráceného intervalu sledována také vizuální stálost nástřiku. Při aplikaci série 15 dávek vedle sebe v intervalu 0,15 s byla sledována velikost

a tvar plochy pokryté mazivem v rámci série. Vyhodnocení probíhalo opticky, bez kvantifikace plochy jednotlivých dávek – odchylky se posuzovaly z pohledu, zda některá z dávek vykazuje zjevně menší nebo větší pokrytí oproti ostatním v sérii (viz Obr. 5-18). Při této formě hodnocení nebyly v žádné z testovaných konfigurací (zobrazeny v Tab. 6) pozorovány významné rozdíly mezi jednotlivými nástřiky v rámci série. Stálost nástřiku byla zohledněna při bodovém hodnocení v rámci map využitelnosti.



Obr. 5-18 Série nástřiků ve zkráceném intervalu (Tryska 1, V1, 30 °C)

Systém prokázal schopnost aplikovat opakovatelné dávky v rozsahu intervalů od 1 s (referenční stav) po 0,15 s (dolní mez spínací elektroniky). Hmotnost dávky se mezi oběma režimy mění o méně než $\pm 4\%$ v krajních bodech regulačního rozsahu a vizuální stálost nástřiku v rámci série zkráceného intervalu byla potvrzena. Výhody aplikace ve zkráceném intervalu jsou popsány v kapitole 6.1.3.

Komplexní mapy využitelnosti

Předchozí dvě podkapitoly hodnotily vliv velikosti dávky a vliv teploty na nástřik samostatně. Skutečné provozní podmínky však kombinují oba parametry současně, a proto byl proveden komplexní sběr dat, při kterém byla pro každou trysku, každý regulační válec a každou teplotu vyhodnocena celková kvalita nástřiku. Cílem této podkapitoly je identifikovat pro každou trysku rozsah provozních podmínek (tzv. pracovní okno), ve kterých vykazuje stabilní a opakovatelný nástřik, a porovnat tyto oblasti mezi jednotlivými tryskami.

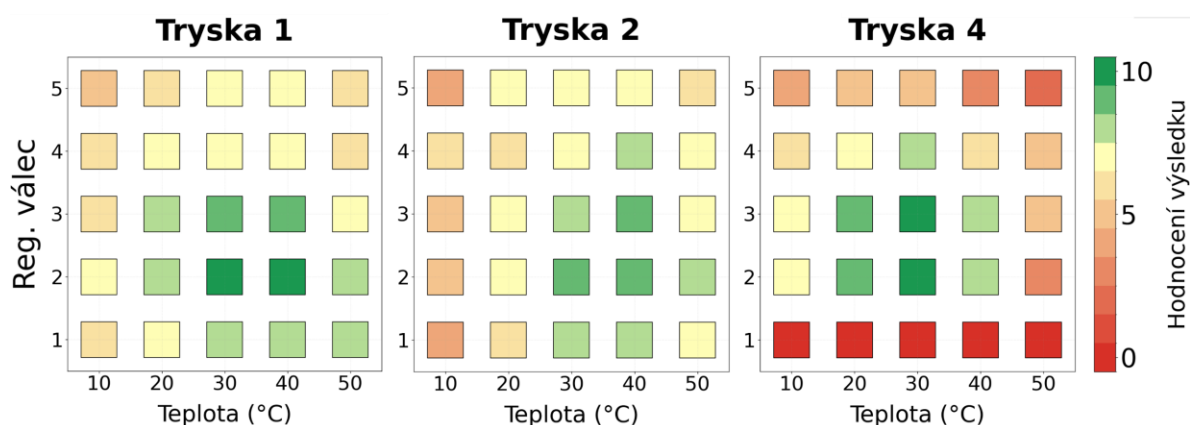
Každá kombinace tryška $\times$ válec $\times$ teplota byla ohodnocena celočíselným skóre v rozsahu 0–10, kde hodnota 10 odpovídá ideálnímu nástřiku splňujícímu všechna kritéria definice optimálního nástřiku (viz kapitola 5.2.2), zatímco hodnota 0 značí, že systém v dané konfiguraci nevykazoval funkční aplikaci. Hodnocení probíhalo na základě:

- stálosti nástřiku při prodlevě mezi nástřiky 1 s a 0,15 s
- přítomnosti úkapů
- výskytu provázkování (tzv. rozdělení jednolitého proudu maziva na více proudů)
- odrazu maziva a rozstříku

Testování bylo provedeno pro dávky V1, V2, V3, V4, V5 a teploty 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C.

Získané bodové hodnocení bylo následně vneseno do tzv. map využitelnosti (heat map). Tyto diagramy definují, v jaké oblasti jednotlivá tryška nejlépe pracuje a také oblasti, ve

kterých využití trysek už není vhodné. Bodové hodnocení pro všechny trysky je uvedeno v příloze 1.



Obr. 5-19 Mapy využitelnosti trysek

Tryska 1: Vyznačuje se nejširším spolehlivým pracovním oknem. Bezproblémově a vysoce opakovatelně funguje v širokém spektru teplot od cca 20 °C až do 40 °C, a to při nastavení nižších až středních dávek (dávka 1–3).

Tryska 2: V oblasti, kde dominuje Tryska 1, vykazuje sice stabilní a konzistentní chování, avšak kvalita nástřiku není excelentní. Její silná stránka se naopak projevuje v odlišném pracovním okně – jeví se jako vysoce spolehlivá a vhodná pro aplikaci vyšších dávek v teplotním rozmezí 30 až 40 °C.

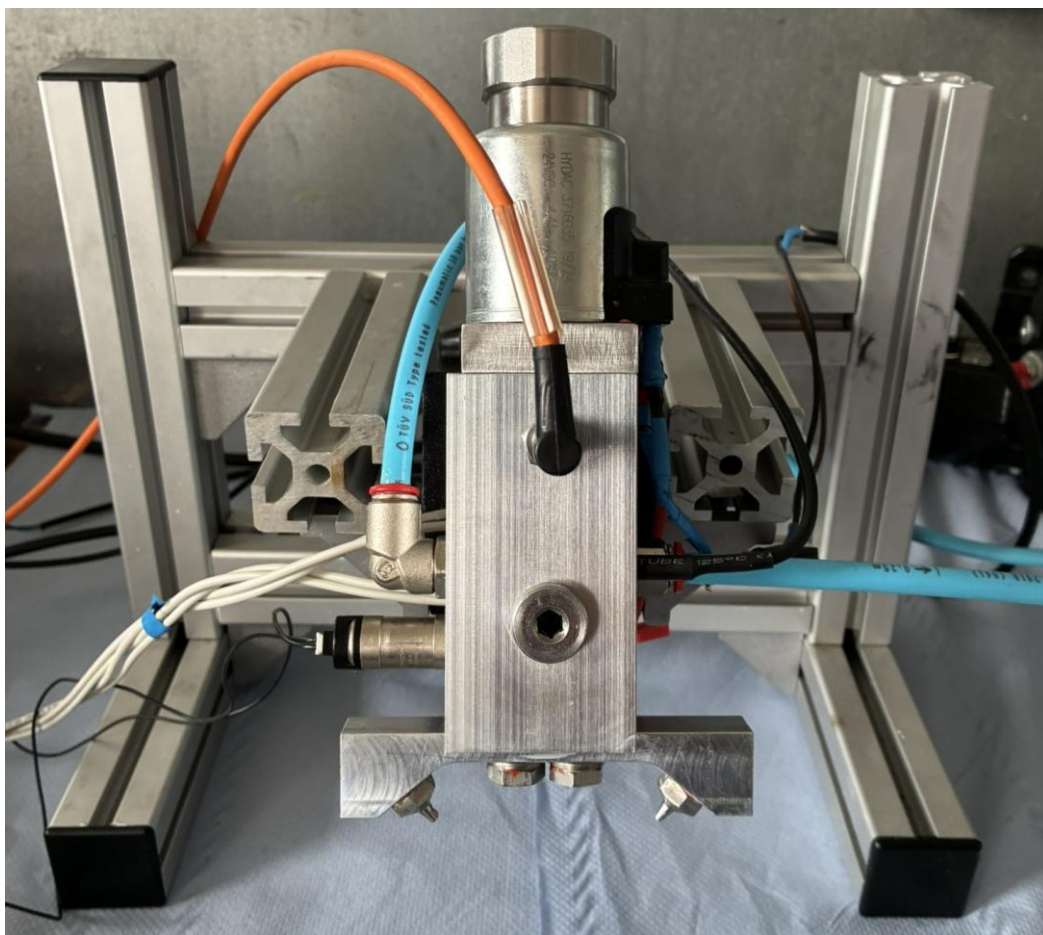
Tryska 4: Má nejmenší oblast využití, avšak v daném bodě nabízí bezkonkurenční vlastnosti. Její optimální provozní rozsah leží mezi 25–35 °C při středních dávkách. Pokud je tryska provozována v tomto okně, generuje nejvyšší a nejpreciznější nástřik ze všech testovaných variant. Mimo tuto oblast však naráží na své limity. Při nejnižších dávkách systém s touto tryskou vůbec nespustí funkční aplikaci. Naopak při vysokých dávkách nebo vysokých teplotách dochází k destabilizaci paprsku. Ten se může začít trhat, nebo se odrážet od cílové plochy, čímž mazivo nebezpečně dopadá i na temeno kolejnice, jak je znázorněno na Obr. 5-20.



Obr. 5-20 Příklad méně kvalitního nástřiku, kde dochází k odrážení maziva (Tryska 4, 40 °C, dávka 5)

5.5.2 Výsledky Gfunk2

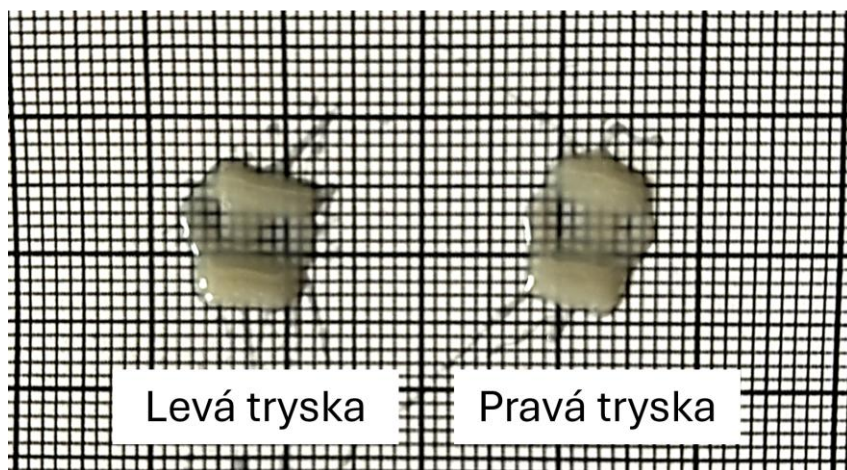
Po komplexním ověření základních parametrů nástřiku u Gfunk1 byla provedena série testů na prototypu Gfunk2. Cílem testování bylo ověřit symetrii dávkování mezi levou a pravou tryskou, potvrdit srovnatelnost výsledků s Gfunk1 a posoudit spolehlivost přepínání mezi větvemi. Uspořádání mazací hlavy Gfunk2 při testování je zobrazeno na Obr. 5-21.



Obr. 5-21 Funkční vzorek 2 při testování

Symetrie dávkování

Prvním krokem testování bylo ověření, zda levá a pravá tryska dávkuje srovnatelné množství maziva. Měření probíhalo s aplikací maziva na rovnou plochu kolmou na osu trysky. Tato konfigurace byla zvolena záměrně – levá tryska míří na vnější stranu okolků a pravá na vnitřní, přičemž profil kola není symetrický. Při aplikaci na okolek by proto nástřik levé a pravé trysky vykazoval odlišný tvar stopy i při jinak identických podmínkách, což by vzájemné porovnání znehodnotilo. Měření na rovné ploše tuto proměnnou eliminuje a umožňuje přímé srovnání obou větví. Na Obr. 5-22 je znázorněn příklad symetrie levé a pravé trysky.



Obr. 5-22 Porovnání L/P trysky (30 °C, dávka 3)

Měření bylo provedeno pro regulační válec V3 při teplotě 30 °C pro všechny testované trysky (T1, T2, T4). Válec V3 byl zvolen jako střední bod rozsahu poskytující pro všechny trysky dostatečně velký nástřik k optickému vyhodnocení. Pro každou větev zvlášť bylo provedeno N = 50 nástřiků. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Porovnání objemů dávek pro pravou a levou trysku u Gfunk2

Tryska	Gfunk2 (PT) (mm ³)	Gfunk2 (LT) (mm ³)	Rozdíl (%)
T1	25	24,3	-2,8 %
T2	21,9	22,4	+2,3 %
T4	20,8	20,1	-3,4 %

Z Tab. 7 vyplývá, že rozdíl mezi levou a pravou tryskou se u všech testovaných trysek pohybuje v rozsahu 2,8 až 3,4 %. Tato odchylka je srovnatelná s přirozenou opakovatelností metody vážení a nepřekračuje hodnoty naměřené u Gfunk1. Solenoidový dělič proudu tedy nezpůsobuje měřitelnou asymetrii dávkování a obě větve lze považovat za funkčně rovnocenné. Symetrie dávkování na úrovni pod 3,5 % představuje pro aplikaci mazání okolků velmi dobrý výsledek, neboť v reálném provozu jsou přípustné odchylky dávky výrazně vyšší.

Při prvotním měření byl zaznamenán rozdíl objemu dávky mezi větvemi přibližně 25 %, přičemž levá větev dávkovala výrazně méně. Analýza příčiny ukázala, že rozdíl nebyl způsoben asymetrií děliče proudu, ale zavzdušněním levé větve hydraulického okruhu. Po důkladném odvzdušnění byly výsledky obou větví symetrické. Tento případ poukazuje na kritickou citlivost bezvzduché aplikace na přítomnost vzduchu v okruhu: i malé množství zachyceného vzduchu může výrazně ovlivnit objem dávky a zkreslit výsledky měření. Odvzdušnění hydraulického okruhu před měřením i před reálným provozem je proto nezbytným krokem při uvádění jednotky do provozu.

Srovnání chování s Gfunk1

Po ověření symetrie bylo provedeno kvantitativní srovnání výsledků Gfunk2 s referenčními hodnotami Gfunk1. Měření probíhalo za stejných okrajových podmínek jako u Gfunk1: aplikace maziva na vnitřní stranu makety okolku ze vzdálenosti 40 mm při teplotě 30 °C. Srovnání bylo provedeno pro všechny testované trysky (T1, T2, T4) a regulační válce V1, V3, V5. Výsledky objemu dávky jsou shrnuty v Tab. 8.

Tab. 8 Srovnání objemu dávky Gfunk1 a Gfunk2 pro trysky T1, T2, T4 a regulační válce V1, V3, V5

Tryska	Reg. válec	Gfunk1 (mm ³)	Gfunk2 PT (mm ³)	Gfunk2 LT (mm ³)
T1	V1	5,2	5,2	4,9
	V3	25	25	24,3
	V5	50,3	50,3	49,8
T2	V1	5,1	5,0	5,2
	V3	22,9	21,9	22,4
	V5	48,7	48,1	49,2
T4	V2	10,4	11	10,4
	V3	20,8	20,8	20,1
	V5	47,9	47,2	46,8

Z Tab. 8 vyplývá, že parametry nástřiku Gfunk2 jsou ve srovnání s Gfunk1 prakticky totožné. Odchyłky hodnot Gfunk2 PT od referenčních hodnot Gfunk1 se pohybují v rozsahu $\pm 5\%$ s výjimkou krajních bodů regulačního rozsahu, kde je přesnost měřicí metody nejnižší. Při vyloučení těchto krajních bodů nepřekračuje odchylka $\pm 2\%$ u žádné z testovaných konfigurací. U větve LT (levá tryska, solenoid zapnut) je patrný mírný systematický trend k nižším hodnotám oproti referenci – průměrná odchylka LT je přibližně -2% až -3% . Tento rozdíl je srovnatelný s přesností metody měření a nevykazuje závislost na použité trysce ani regulačním válci. Přítomnost tělesa děliče v hydraulické trase tedy nemá zásadní vliv na objem dávky a obě větve Gfunk2 jsou s Gfunk1 plně srovnatelné.

Protože hmotnostní výsledky potvrdily srovnatelnost Gfunk2 a Gfunk1, bylo optické hodnocení plochy nástřiku provedeno pouze pro válec V3 při 30 °C jako reprezentativní bod rozsahu. Výsledky jsou v Tab. 9

Tab. 9 Srovnání plochy nástřiku Gfunk1 a Gfunk2 při 30 °C a dávce 3

Tryska	Gfunk1 (mm ²)	Gfunk2 PT (mm ²)	Gfunk2 LT (mm ²)
T1	80	78	72
T2	66	68	65
T4	45	44	42

Z Tab. 9 vyplývá, že plochy nástřiku Gfunk2 PT a Gfunk1 se prakticky neliší – odchylky jsou v rozsahu -2,5 % až +3,0 % (T1: -2 mm², T2: +2 mm², T4: -1 mm²), což odpovídá nepřesnosti optického vyhodnocení plochy stopy. Větev LT (levá tryska, solenoid zapnut) vykazuje systematicky nižší plochu nástřiku, přičemž nejvýraznější rozdíl je patrný u trysky T1, kde LT dosahuje 72 mm² oproti 80 mm² u Gfunk1, tedy o 10 % méně. U T2 a T4 je rozdíl menší (T2: -1 mm², T4: -3 mm²). Pravděpodobnou příčinou je tlaková ztráta vznikající průchodem maziva solenoidovým děličem proudu při sepnutém stavu.

Dynamika přepínání a opakovatelnost

Z hlediska rychlosti reakce prokázal solenoid děliče schopnost okamžitého přesměrování toku maziva jedné trysky do druhé. Tvar a velikost nástřiku vykazovaly při střídavém přepínání mezi LT a PT shodné výsledky, bez vizuálně rozlišitelného přechodového jevu. Ověřilo se, že přepínání mezi tryskami je okamžité i při zkráceném intervalu (0,15 s)

Opakovatelnost dávky byla ověřena pro oba intervaly aplikace (1 s a 0,15 s) v krajních bodech regulačního rozsahu (V1 a V5) stejným postupem jako u Gfunk1. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Porovnání objemu dávky ve zkráceném intervalu

Tryska	Válec	Interval	Objem dávky (mm ³)	Odchylka (%)
Pravá (PT)	V1	1 s	5,2	–
	V1	0,15 s	5,2	0 %
	V5	1 s	50,3	–
	V5	0,15 s	49,0	-2,6 %
Levá (LT)	V1	1 s	4,9	–
	V1	0,15 s	4,9	0 %
	V5	1 s	49,8	–
	V5	0,15 s	50,7	+1,8 %

Z Tab. 10 vyplývá, že zkrácení intervalu aplikace z 1 s na 0,15 s nemá měřitelný vliv na objem dávky ani u jedné větve. U nejmenšího zdvihu V1 jsou hodnoty při obou intervalech shodné. Při V5 jsou odchylky do 3 %, přičemž u větve PT jsou mírně záporné (2,6 %) a u větve LT mírně kladné (1,8 %). Část tohoto rozdílu může být způsobena odrazem maziva ze sběrné nádoby při vysokém počtu nástřiků, kdy se kalíšek plní a malé množství maziva se odráží ven. Opakovatelnost dávkování při zkráceném intervalu je u Gfunk2 zachována pro obě větve, a to i při střídavém přepínání solenoidu děliče.

Provozní spolehlivost

Zkoušky potvrdily, že při aktivaci jedné větve nedochází k průsaku maziva z trysky druhé větve. Tento stav je zajištěn kombinací vnitřního utěsnění solenoidu děliče a zpětného ventilu integrovaného v trysce. Solenoid děliče je dle výrobce dimenzován pro trvalé sepnutí až 5 minut bez rizika přehřátí. V reálném drážním provozu by byla typická doba sepnutí v řádu sekund, takže k tepelnému namáhání nedochází.

V průběhu testování nebyly zaznamenány žádné úniky maziva ve spojích ani snižování tlaku mimo standardní rozsah. Hydraulická trasa Gfunk2 se z hlediska provozní spolehlivosti chovala srovnatelně s Gfunk1.

5.6 Zpětná vazba a diagnostika

Testování zpětné vazby probíhalo ve dvou fázích: ověření schopnosti senzoru detekovat provedení pracovního zdvihu a detekce ucpané trysky. Pro obě fáze byly zkoumány dva přístupy: měření rázového tlaku v okruhu a měření polohy dávkovacího pístu indukčním snímačem.

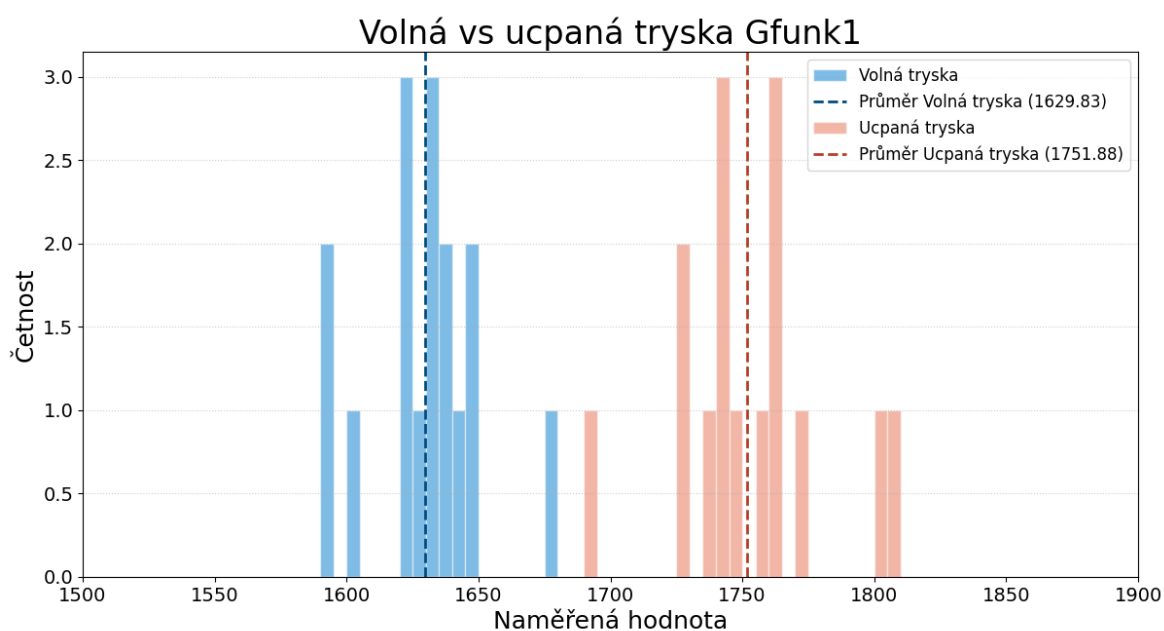
5.6.1 Zpětná vazba pomocí indukčního snímače

Indukční snímač IE5457 je umístěn kolmo k ose regulačního válce. Měří míru zákrytu citlivé plochy hranou válce, výstupní hodnoty proto neodpovídají lineárnímu posuvu v mm, ale odrážejí relativní polohu pístu vůči snímači. Princip detekce ucpané trysky vychází z toho, že při ucpaní hydraulický odpor v komoře skokově vzroste, omezená síla elektromagnetu nedokáže překonat zvýšený protitlak a píst nedosáhne stejné koncové polohy jako při průchozí trysce. Tento rozdíl se projeví jako měřitelný posun výstupní hodnoty snímače. Samotný snímač pracuje s frekvencí 600 Hz, při testování byl však k dispozici pouze diagnostický IO-Link převodník s propustností 10 Hz, který neumožňoval sledovat rychlý milisekundový mazací impuls. Z tohoto důvodu byla pro sběr dat doba sepnutí pístu prodloužena na 1 s, čímž se hodnota přenášaná do PC bezpečně ustálila. Měření probíhalo po dobu 1 minuty.

Výstupní hodnoty snímače se mění v závislosti na použité trysce a nastavené dávce, neboť každý regulační válec má jinou délku a tím i odlišnou počáteční polohu pístu vůči snímači. Pro každou kombinaci trysky a válce je proto nutné spínací bod nastavit zvlášť. V rámci testování bylo ověřeno, že detekce je proveditelná a výsledky jsou vyhodnotitelné; systematické nastavení spínacích bodů pro všechny konfigurace nebylo předmětem tohoto testování.

Zpětná vazba u Gfunk1

Pro Gfunk1 bylo provedeno měření série nástriků ve dvou stavech: volná tryska (průchozí, bez překážky) a ucpaná tryska (simulováno mechanickým ucpáním výstupu trysky cizím tělesem). Naměřené hodnoty indukčního snímače byly vyhodnoceny v podobě histogramu na Obr. 5-23.



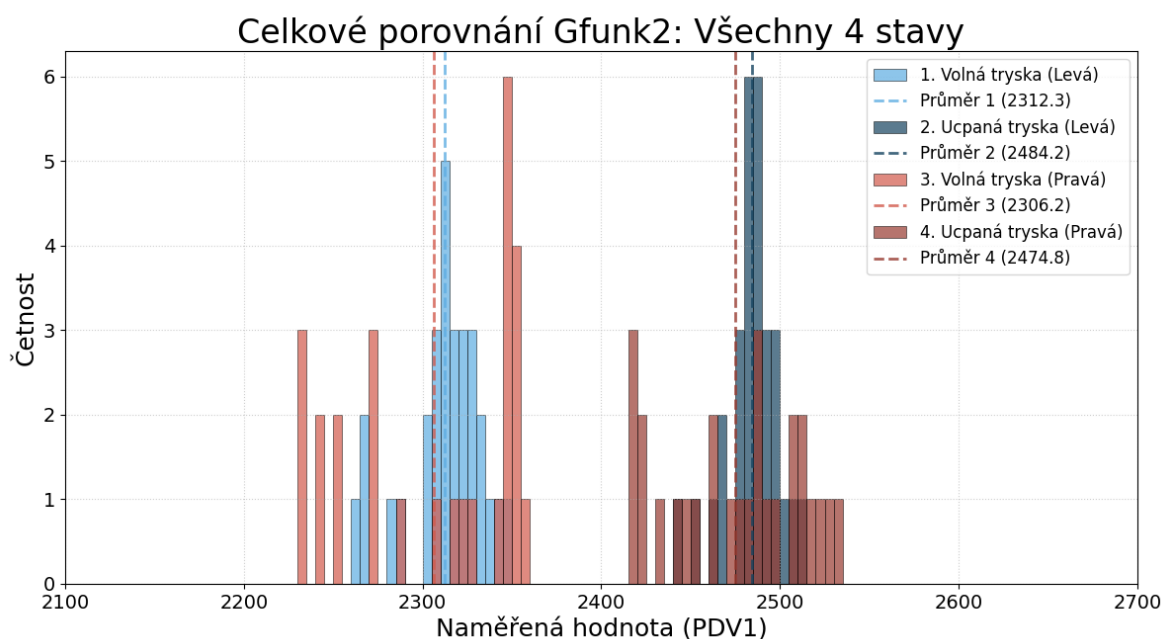
Obr. 5-23 Histogramy hodnot indukčního snímače pro volnou a ucpanou trysku

Mezi oběma stavy je rozdíl středních hodnot přibližně 123 jednotek a distribuce se prakticky neprolínají. Princip detekce ucpané trysky tak je pro Gfunk1 jednoznačně prokázán a pro reálné nasazení postačuje prahové vyhodnocení ve výstupní elektronice snímače.

Zpětná vazba u Gfunk2

U varianty Gfunk2 byla provedena rozšířená měření pokrývající všechny čtyři kombinace stavu obou výstupních trysek: volná levá, ucpaná levá, volná pravá, ucpaná pravá. Tím bylo ověřeno jednak ucpání pro každou větev samostatně, jednak symetrie chování děliče proudu mezi oběma výstupními větvemi. Výsledky jsou prezentovány v podobě jednoho souhrnného histogramu na Obr. 5-24

Z histogramu vyplývají dva klíčové poznatky. Za prvé, distribuce odpovídající volnému stavu obou trysek (modrá a červená světlá) jsou v zásadě překryté a střední hodnoty se liší pouze o 4,2 jednotky. Tento výsledek prokazuje, že implementace solenoidového děliče proudu nezavádí systematickou nesymetrii do chování dávkovacího pístu a obě větve aplikují mazivo se shodnou dynamikou. Za druhé, rozdíl mezi volným a ucpaným stavem je pro obě větve obdobný (172 jednotek pro levou, 168,4 jednotky pro pravou). Detekce ucpaní tak funguje s prakticky stejnou citlivostí nezávisle na poloze solenoidu děliče a řídicí jednotka může používat jednotný prahový bod pro obě větve.



Obr. 5-24 Histogramy hodnot indukčního snímače pro Gfunk2 ve všech provozních stavech

5.6.2 Zpětná vazba pomocí tlakových snímačů

Druhým testovaným principem detekce ucpané trysky bylo měření tlaku přímo v hydraulickém okruhu kompresní komory. Princip vychází z toho, že při ucpané trysce nemá stlačované mazivo z uzavřeného objemu kam uniknout a tlak v komoře skokově vzroste oproti běžnému provozu s průchozí tryskou.

Pro toto měření bylo postupně testováno celkem pět typů tlakových snímačů. Všechny testované snímače byly membránového typu s různými připojovacími rozměry. U většiny z nich se ukázal zásadní problém: instalace snímače do hydraulického okruhu zaváděla hluché objemy v připojovacím kanálu a poddajná měřicí membrána absorbovala kinetickou energii tlakového rázu. Oba tyto vlivy negativně ovlivňovaly kvalitu vlastního nástřiku, případně jej zcela znemožňovaly.

Jako poslední dostupná možnost byl zvolen snímač SMC ZSE20A, který jako jediný z testovaných disponoval nejmenšími připojovacími rozměry, a tedy nejmenší plochou v kontaktu s mazivem. U tohoto snímače bylo možné okruh dostatečně odvzdušnit a vliv na dynamiku tlakového rázu byl ve srovnání s ostatními typy zanedbatelný. Snímač bohužel nedisponuje analogovým výstupem a poskytuje pouze hodnotu maximálního dosaženého tlaku v cyklu, přičemž jeho měřicí rozsah dle datasheetu činí 10 bar. Naměřené výsledky jednoznačně rozlišovaly oba provozní stavy: při průchozí trysce se tlak v závislosti na trysce a dávce pohyboval přibližně mezi 7 a 9,5 bar, zatímco při ucpané trysce snímač vždy indikoval překročení svého maximálního rozsahu. Z tohoto chování vyplývá, že tlakový rozdíl mezi stavem průchozí a ucpané trysky je znatelný a pro účely detekce jednoznačně dostatečný.

Toto testování bylo provedeno výhradně na Gfunk1, neboť snímač SMC ZSE20A není konstrukčně dimenzován pro reálné nasazení v podvozku drážního vozidla a byl použit pouze pro ověření fyzikálního principu v laboratorních podmínkách.

Princip tlakové detekce ucpané trysky je tedy fyzikálně i technicky funkční. Dosažený výsledek však zachycuje pouze maximální hodnotu tlaku, nikoliv průběh v čase, a vyžaduje snímač s velmi specifickou geometrií připojení, který zároveň nesmí negativně ovlivňovat dynamiku nástřiku a musí být konstrukčně vhodný pro provoz v prostředí podvozku drážního vozidla. Nalezení takového snímače je předmětem dalšího vývoje popsaného v kapitole 6.

6 FINÁLNÍ NÁVRH

Předchozí kapitoly popsaly návrh, výrobu a experimentální ověření dvou funkčních vzorků mazací jednotky (Gfunk1 a Gfunk2). Provedené testy potvrdily fyzikální princip bezvzduché aplikace, ověřily možnost regulace velikosti dávky v rozsahu 5 až 50 mm³, stanovily provozní pracovní okno v rozsahu teplot 25 až 35 °C s doporučenou cílovou hodnotou 30 °C a prokázaly funkčnost diagnostiky pro detekci ucpané trysky pomocí indukčního snímače. Současně byl ověřen princip dělení proudu maziva mezi dvě nezávislé výstupní trysky.

Na základě těchto poznatků byl zpracován finální návrh mazací jednotky, dále označovaný jako Gfunk3. Návrh zachovává všechny ověřené vnitřní funkční rozměry a parametry převzaté z funkčních vzorků a přináší konstrukční optimalizace v oblasti zástavbových rozměrů, hmotnosti a představitelnosti pro různé typy aplikace. Gfunk3 je zpracován ve formě detailního 3D CAD modelu připraveného k výrobě po finální specifikaci konkrétního zákazníka.

Volba zpracování Gfunk3 ve formě modelu místo fyzické výroby vychází ze specifik trhu drážní techniky. Každá řada tramvaje, vlakové soupravy nebo metra má odlišné požadavky na uchycení mazací jednotky v podvozku, prostorovou orientaci mazací hlavy a integraci do palubní sítě vozidla. Zástavbový prostor v podvozku tramvaje je obzvláště omezený, neboť je sdílen s dalšími systémy vozidla, jako jsou brzdové prvky, odpružení nebo pohonné komponenty. Konkrétní geometrie konzole, délka a tuhost montážního ramene i vzájemná poloha vůči pojezdovému ústrojí se proto liší případ od případu. Vibrační a klimatické zkoušky podle norem ČSN EN 61373 a ČSN EN 50155 vyžadují finální podobu uchycení v konkrétním vozidle, proto budou provedeny až po finální adaptaci pro prvního koncového zákazníka.

Detailní CAD model Gfunk3 představuje vývojový výstup připravený k výrobě. Vnitřní funkční řešení zahrnující dávkování, dělení proudu maziva a diagnostiku je převzato beze změn z ověřených funkčních vzorků. Další vývoj se tak omezí na úpravu vnějších rozměrů a montážního rozhraní dle požadavků konkrétního zákazníka.

6.1 Zhodnocení výsledků Gfunk1 a Gfunk2

Z provedených testů na funkčních vzorcích Gfunk1 a Gfunk2 vyplývají pro finální návrh Gfunk3 následující konstrukční zjištění.

6.1.1 Trysky

Testování čtyř typů trysek (tři ze stavebnicového systému UniJet a jedna od alternativního výrobce) ukázalo, že geometrie koncovky není pro bezvzduchovou aplikaci primárním kritériem výběru. Rozdíly mezi koncovkami typu Flat a Full Cone jsou ve výsledném tvaru nástřiku méně výrazné než u pneumatických systémů, neboť při bezvzduchové aplikaci se neuplatní stlačený vzduch k rozprašování. Klíčovým parametrem trysky je naopak otevírací tlak integrovaného zpětného ventilu. Z testovaných variant se jako optimální ukázala hodnota 1,4 bar; vyšší hodnoty (5 bar u trysky T4) omezují použitelný rozsah dávek. Trysky stavebnicového systému UniJet byly pro fázi testování velmi vhodné díky možnosti snadné záměny jednotlivých komponent. Pro reálné nasazení výrobce na základě specifikovaných parametrů vyrábí rozměrově menší trysky s pevnými parametry, přičemž jejich funkční vlastnosti odpovídají otestovaným variantám.

V konstrukci Gfunk3 je použit závit G 1/8, který umožňuje instalaci různých typů trysek dle požadavku zákazníka. Volba konkrétní koncovky a otevíracího tlaku zpětného ventilu závisí na předpokládaném provozním režimu: trysky s nízkým otevíracím tlakem (1,4 bar) pokrývají široké pracovní okno a jsou vhodné jak pro režim rychlých mikrodávek, tak pro větší dávky; trysky s vyšším otevíracím tlakem poskytují koncentrovanější paprsek a nižší rozstřík. Výsledná volba trysky bude součástí konfigurace jednotky dle konkrétních požadavků zákazníka.

6.1.2 Provozní podmínky

Komplexní mapy využitelnosti v kapitole 5.5.1 ukázaly, že systém pracuje stabilně v širokém pásmu kombinací teploty, velikosti dávky a typu trysky. Konkrétní volba provozního pracovního bodu je ponechána na zákazníkovi a vychází z profilu trati a z požadované intenzity mazání. Pro běžné nasazení je doporučen pracovní bod V3 (střední dávka cca 25 mm³) při teplotě 30 °C; pro tratě, kde je požadované množství aplikovaného maziva velmi proměnné, je preferován režim mikrodávek (V1 nebo V2 ve zkráceném intervalu) dále popsány v kapitole 6.1.3.

6.1.3 Strategická výhoda režimu rychlých mikrodávek

Schopnost mazací jednotky aplikovat opakovatelnou dávku již při prodlevě 0,15 sekundy mezi cykly umožňuje volbu provozní strategie podle požadavku konkrétní aplikace. Celkové množství maziva potřebné pro ošetření daného úseku trati lze do kontaktu okolku s kolejnicí dopravit buď jako několik větších dávek aplikovaných v delších intervalech, nebo jako sérii malých dávek aplikovaných rychle za sebou. Krátká reakční doba systému zároveň vytváří předpoklady pro integraci s inteligentními řídicími systémy, které množství aplikovaného maziva přizpůsobují dynamicky na základě predikčních modelů. Takový systém může

zohledňovat například profil trati, aktuální rychlost vozidla nebo povětrnostní podmínky a aplikovat mazivo přesně v místě a množství, kde je to v daném okamžiku potřeba.

Z výsledků uvedených v kapitole 5.5 vyplývá, že rozdělení požadovaného objemu mezi více menších dávek přináší dvě provozně významné výhody. Za první, malé dávky odpovídající regulačním válcům V1 a V2 (5 až 15 mm³) vykazují čistý nástřik bez lokálního přetečení v místě dopadu. Za druhé, rychlá série mikrodávek rozprostře mazivo více rovnoměrně po obvodu kola, čímž se sníží lokální nadbytek maziva a minimalizuje se ztráta, kdy se přebytečné mazivo vytlačí z kontaktu.

Konkrétně lze stejné celkové množství maziva, například 35 mm³, dopravit buď jako jednu dávku odpovídající válci V4 (přibližně 35 mm³) za 1 s, nebo jako 7 dávek o objemu 5 mm³ aplikovaných v intervalu 0,15 s. Druhý režim je z hlediska kvality nástřiku i z hlediska využitelnosti maziva preferovanou variantou. Konečná volba provozního režimu je předmětem konfigurace řídicí jednotky a vychází z profilu trati a požadavku konkrétního zákazníka.

6.1.4 Čerpadlo s nádrží

Pro přívod maziva do mazací hlavy se využívá více okruhový mazací přístroj řady PMP od společnosti Tribotec. Čerpadlo umožňuje flexibilní konfiguraci počtu pracovních jednotek: vývody více jednotek se slučují do jedné výstupní hadice, čímž se průtok přizpůsobuje požadavkům aplikace. Pro standardní provoz s intervalem aplikace 1 s a maximální dávkou 50 mm³ postačuje průtok 3 cm³·min⁻¹; pro provoz v režimu rychlých mikrodávek s intervalem 0,15 s je požadovaný průtok 20 cm³·min⁻¹, který zajistí tři pracovní jednotky o průtoku $3 \cdot 7,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1} = 22,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Jedna náprava drážního vozidla je typicky osazena dvěma mazacími hlavami (levé a pravé kolo). Pro tuto konfiguraci je nutné zvolit buď výkonnější variantu čerpadla s dostatečným průtokem pro obě hlavy, nebo dvě nezávislé čerpací jednotky. Průtok čerpadla by měl být vždy o 10 až 20 % vyšší, než je maximální požadovaný průtok mazacích hlav, aby si hlava nenasávala mazivo zpět z výstupní hadice, což by narušovalo opakovatelnost dávkování a mohlo způsobit zavzdušnění okruhu.

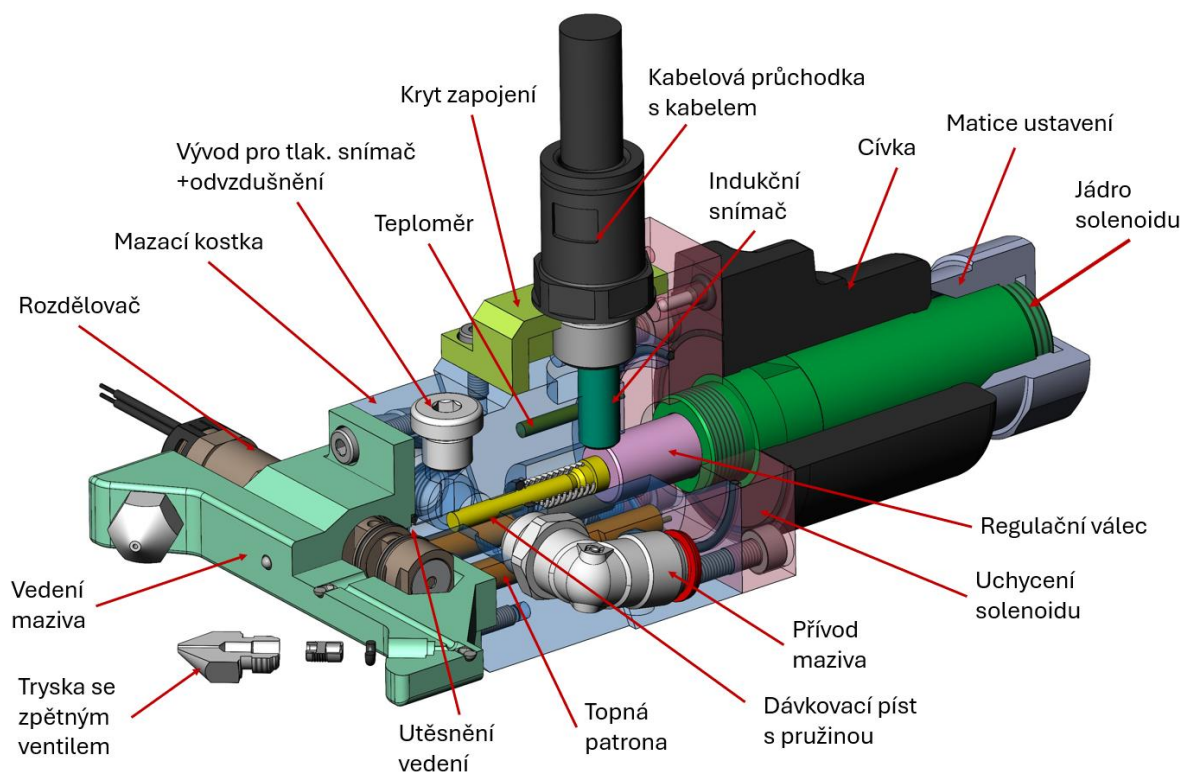
Velikost nádrže s mazivem se dimenzuje na základě požadovaného denního objemu aplikovaného maziva a délky servisního okna, tj. intervalu mezi doplňováními. Pro provoz, kde je doplňování maziva začleněno do běžné servisní prohlídky vozidla, je nutné objem nádrže dimenzovat tak, aby nebylo nutné doplňovat v kratších intervalech. Zástavbové prostory v podvozku konkrétního vozidla jsou dalším omezujícím parametrem. Volba čerpadla i nádrže je proto součástí konfigurace jednotky pro konkrétního zákazníka.

6.1.5 Zpětná vazba

Z porovnání obou testovaných principů vyplývá, že pro nasazení v reálném drážním provozu je v současné fázi vývoje vhodnější indukční zpětná vazba. Tlaková detekce je fyzikálně funkční, avšak dosud nebyl nalezen snímač konstrukčně vhodný pro provoz v podvozku drážního vozidla. V konstrukci Gfunk3 je proto připraven montážní otvor ve víku kompresní komory pro případnou budoucí instalaci tlakového snímače.

6.2 Konstrukční popis mazací hlavy Gfunk3

Konstrukční řešení finální mazací hlavy přímo navazuje na principy ověřené u funkčních vzorků Gfunk1 a Gfunk2. Celá sestava je navržena s důrazem na vysokou integraci funkcí, minimální zástavbové rozměry a odolnost v náročných podmínkách podvozku vozidla. Mazací hlava je znázorněna na Obr. 6-1. Výkres sestavy je uveden v příloze 2.



Obr. 6-1 3D model Gfunk3

6.2.1 Hlavní komponenty

Mazací hlava se skládá z kombinace zakázkově navržených dílů a standardizovaných průmyslových komponent. Mezi unikátní části patří: mazací kostka (nosné těleso), držák a matice solenoidu, dávkovací píst a regulační válec, vedení maziva (distribuční blok) a kryt

kontaktů. Tyto díly jsou doplněny nakupovanými komponenty: solenoid, indukční snímač polohy, dvě topné patrony (každá 50 W), termočlánek PT100, trysky se zpětnými ventily, těsnicí prvky a expandéry pro zátkování kanálů. Přívod maziva je realizován přes úhlovou přípojku se závitem G 1/4 pro trubku průměru 8 mm, která umožňuje libovolné natočení přívodní větve při zachování těsnosti.

6.2.2 Popis funkce

Pracovní cyklus probíhá v následujících krocích:

1. *Aktivace pohonu:* Při sepnutí cívky solenoidu dojde k vysunutí pístu v jádru solenoidu, který působí na regulační válec.
2. *Regulace dávky:* Regulační válec vymezuje vzdálenost mezi jádrem solenoidu a dávkovacím pístem, čímž určuje objem aplikované dávky. Válec lze vyměnit pouze při servisu. Pohyb tohoto válce je monitorován indukčním snímačem pro zpětnou vazbu.
3. *Kompresa:* Dávkovací píst se posouvá ve svém vedení, čímž nejprve hydraulicky odizoluje mazivo v kompresní komoře od zbytku systému. Následným pohybem začne mazivo stlačovat.
4. *Distribuce a nástřik:* Pod tlakem putuje mazivo do komponenty vedení maziva, která je ke kostce připevněna čtyřmi šrouby. Těsnění je zde řešeno lapovanými plochami a těsnicím kroužkem (systém převzatý z progresivních rozdělovačů, certifikovaný pro tlaky až 300 bar). Zde se nachází dříve popsany solenoidový ventil MAC®, který na základě signálu distribuuje dávku do levé nebo pravé větve.
5. *Výstřik:* Jakmile tlak v trysce překoná odpor integrovaného zpětného ventilu (nastaven na 1,4 bar), dojde k rázovému otevření a aplikaci maziva na okolek. Celý proces trvá řádově desetiny sekundy.

Systém je koncipován jako částečně uzavřený: mazivo, které neprojde kompresní komorou, cirkuluje zpět do nádrže, čímž se minimalizuje riziko zavzdušnění. Nad kompresní komorou je umístěna odvzdušňovací zátka, kterou lze alternativně nahradit tlakovým snímačem.

6.2.3 Elektroinstalace

Pro zajištění konstantní viskozity maziva i v zimních měsících je mazací hlava vyhřívána na provozní teplotu 25–35 °C. Teplo generují dvě topné patrony, jejichž výkon je regulován na základě dat z termočlánu PT100.

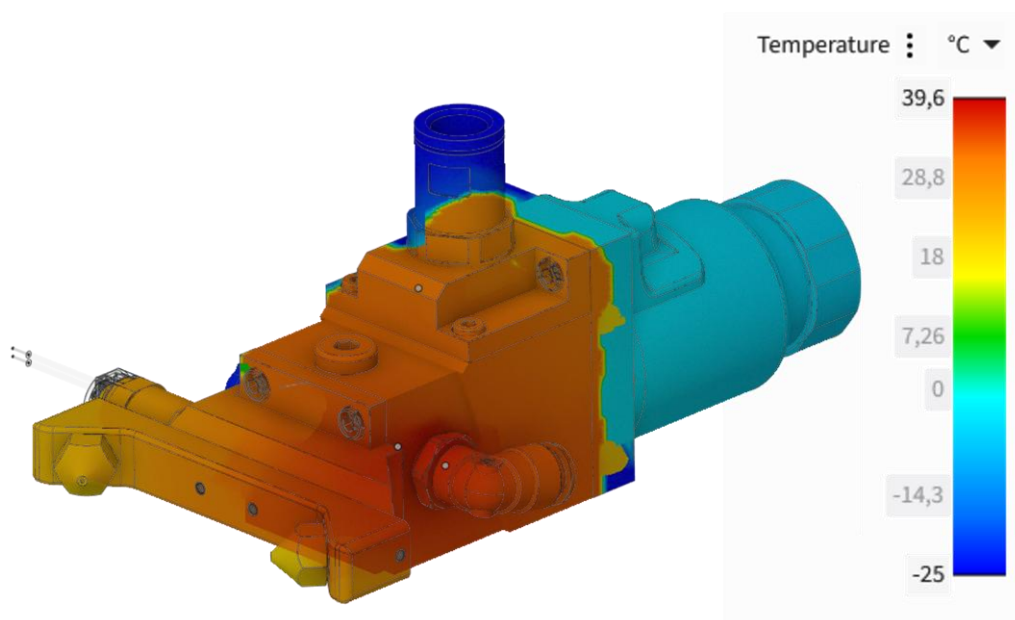
Veškerá kabeláž (snímače, topení, termočlánek) je svedena do krytu zapojení s průchodkou v krytí IP67. Konstrukce krytu umožňuje jeho zalití epoxidovou pryskyřicí, čímž lze dosáhnout absolutní odolnosti elektrických spojů proti vibracím. Vyvedení všech signálů do jednoho vícežilového kabelu umožňuje umístit řídicí jednotku do odpružené části vozidla,

čímž se zvyšuje její životnost. Výjimkou je pouze kabel 3/2 solenoidu, který v této fázi návrhu využívá svého původního konektoru, který by měl být v budoucnu nahrazený konektorem certifikovaným pro použití v kolejové dopravě v podvozku.

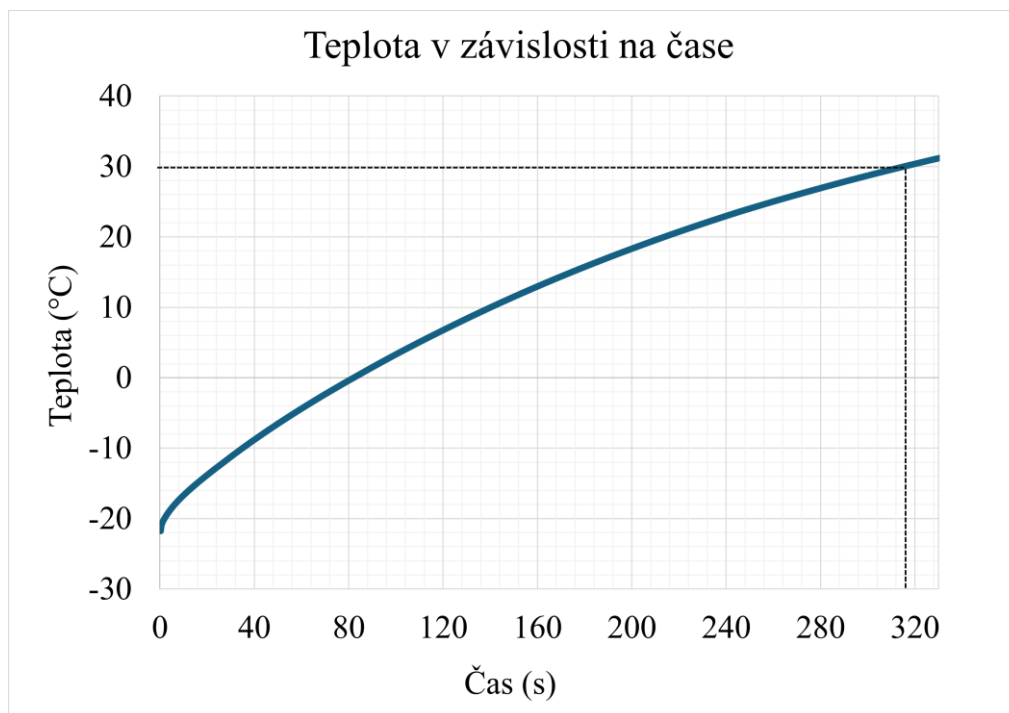
6.3 Tepelný management

Pro zajištění stabilních fyzikálních vlastností maziva v zimním provozu je mazací hlava vybavena aktivním vyhříváním. Provedené testy na funkčních vzorcích stanovily cílovou pracovní teplotu 30 °C s tolerancí ± 5 °C. Pro ověření, že navržené řešení vyhřívání dokáže tuto teplotu spolehlivě dosáhnout a udržovat i v reálných zimních podmínkách, byla provedena termální analýza modelu mazací hlavy.

V rámci analýzy byly modelovány kritické zimní podmínky: počáteční teplota tělesa hlavy -25 °C, proudění vzduchu (-25 °C) odpovídající rychlosti tramvaje 30 km/h. Cílem bylo stanovit dobu, za kterou hlava dosáhne cílové teploty 30 °C, a ověřit, zda zvolený topný výkon je pro toto dosažení dostatečný. Z analýzy vyplynulo, že původně uvažovaný výkon 2×20 W (použitý na funkčních vzorcích) není pro spolehlivé udržení cílové teploty v extrémních podmínkách dostatečný. Pro Gfunk3 byly proto zvoleny dvě topné patry o výkonu 50 W. S tímto výkonem dosáhne mazací hlava cílové teploty 30 °C za přibližně 316 sekund i při kritických zimních podmínkách (-25 °C, proudící vzduch). Simulace zanedbává odvod tepla do držáku mazací hlavy, je tedy předpoklad, že reálný čas vyhřívání při stejných okolních podmínkách by byl větší. Výsledek termální analýzy je znázorněn na Obr. 6-2, na Obr. 6-3 je znázorněn graf průběhu teploty v čase.



Obr. 6-2 Výsledek termální analýzy mazací hlavy Gfunk3.

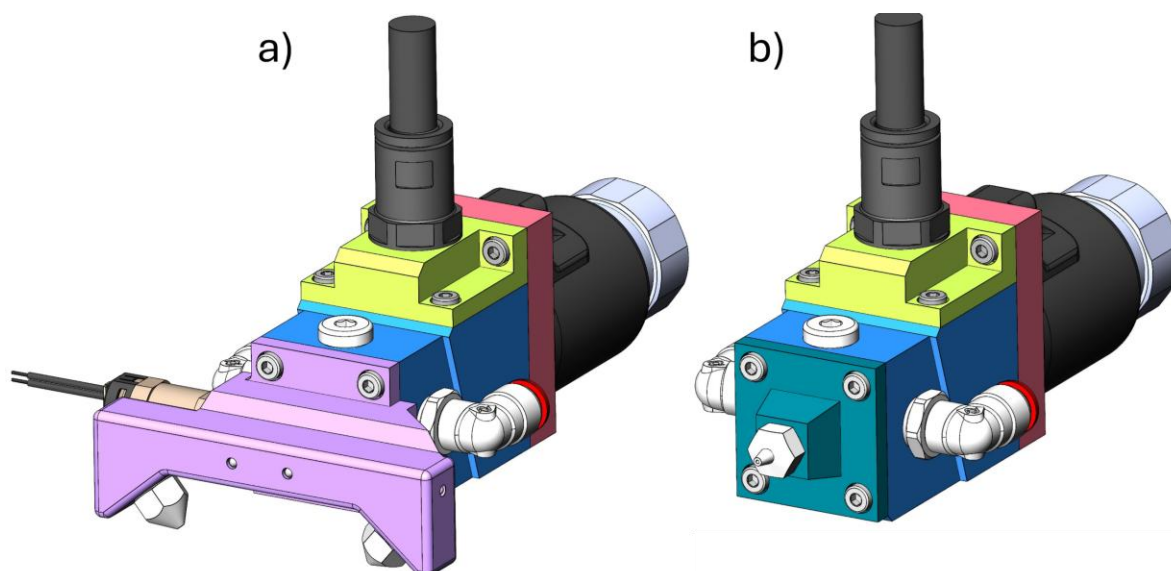


Obr. 6-3 Průběh teploty v čase při vyhřívání mazací hlavy

6.4 Modularita a přestavitelnost

Konstrukční oddělení hlavní pracovní části (mazací kostka s integrovaným pístem, solenoidem a senzorikou) od distribučního modulu (bloku vedení maziva s tryskami) umožňuje rychlou adaptaci zařízení bez zásahu do vnitřní hydrauliky. Tato koncepce přináší dva typy přestavitelnosti.

- **Variabilita natočení vývodů:** Výměnou bloku vedení maziva za variantu s odlišným natočením výstupních kanálů lze trysky orientovat podle prostorových dispozic konkrétního podvozku. Toto je klíčové zejména u tramvají, kde omezený zástavbový prostor vyžaduje vyhnutí kolizi s rámem vozidla, pískovačem nebo brzdovými komponenty. Vnitřní hydraulická trasa, dávkovací mechanismus i senzorika zůstávají bez změny; mění se pouze vnější geometrie výstupních kanálů v distribučním modulu. Příklad alternativního provedení vedení maziva s odlišným natočením trysek je znázorněn na Obr. 6-4; a)
- **Funkční přestavitelnost:** Záměnou celého vedení maziva lze mazací hlavu Gfunk3 modifikovat z dvoutryskového provedení (pro mazání levého i pravého okolku) na jednotryskovou variantu (Obr. 6-4, b)), případně na verzi pro ošetření temene kolejnice (TOR).



Obr. 6-4 Modulárně přestavěna mazací hlava Gfunk3; a) natočení vývodů; b) jednotrysková mazací hlava

6.5 Tabulka technických parametrů

Tab. 11 znázorňuje technické parametry mazací hlavy Gfunk3 pro konfiguraci s dělením maziva bez natočených vývodů.

Tab. 11 Tabulka technických parametrů mazací hlavy Gfunk3

Parametr	Hodnota
Princip aplikace	Bezvzduchý (airless) nástřik
Počet výstupních trysek	2 (levá a pravá tryska)
Rozsah aplikované dávky	5 až 50 mm ³ na cyklus (regulace válci V1 až V5)
Minimální interval mezi aplikacemi	0,15 s (omezeno spínací elektronikou)
Provozní teplota maziva	25 až 35 °C (cílová hodnota 30 °C)
Topný výkon	2 × 50 W (topné patrony)
Napájení	24 V DC
Závit pro připojení trysky	G 1/8
Použité mazivo	Plastické NLGI 00/000 (např. BECHEM EcoRail 2009)
Diagnostika	Indukční snímač polohy regulačního válce, volitelný tlakový snímač
Hmotnost mazací hlavy	1,35 kg
Zástavbové rozměry mazací hlavy (D × Š × V)	197 × 110 × 90 mm

6.6 Odhad výrobních nákladů

Tab. 12 uvádí přehled komponent mazací hlavy Gfunk3 s odhadem výrobních a nákupních nákladů. Odhad je sestaven pro kusovou výrobu, kde ceny zakázkových dílů zahrnují jednorázové náklady na nastavení stroje a programování. Uvedené ceny jsou orientační a mohou se lišit v závislosti na konkrétním dodavateli a aktuálních cenách materiálu.

Tab. 12 Odhad výrobních nákladů Gfunk3 pro kusovou výrobu

Komponenta	Mn.	Jedn. Cena (Kč)	Celkem (Kč)
Zakázkově vyráběné komponenty			
Mazací kostka	1 ks	4 200	4 200
Vedení maziva	1 ks	2 600	2 600
Dávkovací píst	1 ks	1 000	1 000
Regulační válec (sada V1–V5)	1 sada	1 000	1 000
Držák a matice solenoidu	1 ks	1 200	1 200
Kryt zapojení	1 ks	800	800
Mezisoučet zakázkové díly			10 800 Kč
Nakupované komponenty			
Solenoid (cívka + jádro)	1 ks	2 600	2 600
Solenoidový dělič proudu MAC Bullet Valve® 3/2	1 ks	3 600	3 600
Pracovní jednotka PMP	1 ks	450	450
Indukční snímač IE5457	1 ks	1 900	1 900
Topná patrona 50 W	2 ks	400	800
Teploměr PT100	1 ks	500	500
Kabelová průchodka s kabelem	1 ks	300	300
Tryska se zpětným ventilem	2 ks	600	1 200
Přípojka přívodu maziva G 1/4	2 ks	80	160
Spojovací materiál a drobné díly	sada	–	200
Mezisoučet nakupované díly			11 730 Kč
Sdílené komponenty mazací soustavy*			5 000
Celkem			27 510 Kč

*Sdílené komponenty jsou společné pro všechny mazací hlavy v sestavě. Cena 5000 Kč představuje příspěvek na jednu mazací hlavu při konfiguraci 4 mazacích hlav; podrobnosti viz Tab. 13.

Tab. 13 Sdílené komponenty mazací soustavy; přepočtená cena při konfiguraci 4 mazacích hlav

Komponenta	Množství	Jedn. Cena (Kč)	Celkem (Kč)	Cena přepočtena na mazací hlavu (Kč)
Řídicí jednotka	1	8 000	8 000	2 000
Čerpadlo PMP	1	12 000	12 000	3 000
Celkem sdílené komponenty			20 000 Kč	5 000 Kč

6.7 Doporučení pro budoucí vývoj

6.7.1 Vibrační zkoušky

Před nasazením mazací jednotky do reálného drážního provozu je nutné provést vibrační zkoušky podle normy ČSN EN 61373 (zařízení drážních vozidel – zkoušky rázy a vibracemi). Tyto zkoušky vyžadují finální podobu uchycení mazací hlavy v podvozku konkrétního vozidla, proto budou provedeny až po dokončení konstrukčních úprav pro prvního koncového zákazníka.

6.7.2 Vývoj v oblasti zpětné vazby

Indukční zpětná vazba je v současné podobě připravena k nasazení do reálné jednotky. Pro každou konkrétní aplikovanou dávku (velikost regulačního válce) je nutné experimentálně stanovit prahové hodnoty indukčního snímače, které rozlišují stav průchozí a ucpané trysky. Tato kalibrace se provede při uvedení jednotky do provozu u prvního koncového zákazníka a hodnoty se uloží do řídicí jednotky jako konfigurační parametry.

Tlaková zpětná vazba byla v rámci této práce ověřena principiálně, ale závisí na nalezení vhodného tlakového snímače, který má minimální hluchý objem a neovlivňuje dynamiku tlakového rázu při aplikaci. Většina běžně dostupných snímačů s analogovým výstupem využívá poddajnou měřicí membránu, která absorbuje energii rázu a snižuje kvalitu vlastního nástřiku. V dalším vývoji je doporučeno vyhledat nebo navrhnout snímač optimalizovaný pro tuto aplikaci, který by umožnil kontinuální záznam průběhu tlaku v čase. To by otevřelo možnost detekovat nejen úplné ucpání trysky, ale pravděpodobně i částečné ucpání, kdy mazivo systémem prochází, avšak vlivem zúženého výstupu se paprsek odklání od cílového směru a aplikace se stává nepřesnou. Ideálním stavem pro maximální diagnostickou spolehlivost by bylo nasazení obou detekčních metod současně.

6.7.3 Solenoidový dělič proudu

Solenoidový dělič proudu MAC Bullet Valve® použitý v Gfunk2 i v návrhu Gfunk3 byl v rámci vývoje pořízen v katalogové variantě s běžnou koncovkou kabelu. Pro reálné nasazení v podvozku drážního vozidla je nutné, aby tento ventil disponoval konektorem spolehlivě odolávajícím prostředí podvozku. Výrobce ventilu nabízí provedení se zakázkovým konektorem pro drážní aplikace.

6.7.4 Tepelný management celé mazací jednotky

Vyhřívání samotné mazací hlavy je vyřešeno termální analýzou v kapitole 6.3. Pro spolehlivý provoz v extrémních zimních podmínkách je v dalším vývoji nutné doplnit tepelnou ochranu i pro ostatní části mazací jednotky, konkrétně nádrž s mazivem a rozvodné hadice vedoucí z nádrže do mazacích hlav. Bez této ochrany by mazivo při extrémních mrazech nadměrně ztuhlo a topný výkon mazací hlavy by nemusel stačit pro rychlé prohřátí přiváděného maziva. Konkrétní řešení (topné elementy v nádrži, izolace nebo elektricky vyhřívané hadice) závisí na reálném trasování hadic a umístění nádrže s čerpadlem.

6.7.5 Programování řídicí jednotky

Řídicí jednotka pro mazací jednotku musí splňovat následující funkce: aktivace dávkování v okamžicích vyžadovaných profilem trati, typicky před vstupem do oblouku kolejí; volba aktivované větve podle směru oblouku; regulace teploty mazací hlavy s topnými patronami a teplotním snímačem; vyhodnocení diagnostiky pomocí prahového vyhodnocení indukčního snímače; ovládání podávacího čerpadla mazací jednotky.

Z hlediska architektury řídicího systému se nabízejí dva přístupy. První variantou je jednoduchá řídicí jednotka přijímající příkazy od nadřazeného palubního systému vozidla, který zajišťuje veškerou inteligenci včetně rozhodování o místě a množství aplikace. Druhým přístupem je autonomní inteligentní řídicí systém vybavený vlastní sensorikou, například čidlem průjezdu zatáčkou, který samostatně rozhoduje o aktivaci mazání bez závislosti na nadřazeném systému. Oba přístupy lze kombinovat; mazací hlava Gfunk3 je z hlediska elektrického rozhraní připravena pro obě architektury. Konkrétní program vyžaduje individuální naprogramování pro každého zákazníka.

7 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývala vývojem a konstrukčním návrhem nové bezvzduché mazací jednotky. Ačkoliv byla pozornost věnována celému systému včetně nádrže s čerpadlem, hlavním konstrukčním uzlem a těžištěm práce byl vývoj samotné mazací hlavy. Lze konstatovat, že všechny stanovené cíle práce byly splněny.

Experimentální část probíhala ve dvou fázích odpovídajících dvěma funkčním vzorkům. Na Gfunk1 byl ověřen základní princip bezvzduché aplikace, stanoveno pracovní okno v závislosti na teplotě a velikosti dávky a otestována vhodnost čtyř typů trysek z hlediska otevíracího tlaku zpětného ventilu a tvaru nástřiku. Gfunk2 rozšířil funkčnost o solenoidový dělič proudu maziva umožňující nezávislé přepínání mezi levou a pravou tryskou. Testy prokázaly symetrii dávkování obou větví na úrovni pod 3,5 % a potvrdily, že dělič do systému nezavádí měřitelnou nesymetrii. Celkově bylo experimentálně ověřeno opakovatelné dávkování v rozsahu 5 až 50 mm³ při minimálním intervalu mezi nástřiky 0,15 s, což vytváří předpoklady pro integraci s inteligentními řídicími systémy schopnými dynamicky přizpůsobovat intenzitu mazání podmínkám na trati.

Významným výsledkem v oblasti diagnostiky je ověření dvou nezávislých metod zpětné vazby. Laboratorní testy prokázaly, že jak sledování zdvihu pístu pomocí indukčního snímače, tak monitoring tlaku v kompresní komoře, umožňují detekovat ucpání trysky. Indukční zpětná vazba je v současné podobě připravena k nasazení; u tlakové metody je podmínkou nalezení snímače s minimálním hluchým objemem, který nebude negativně ovlivňovat dynamiku nástřiku.

Výsledkem konstrukční fáze je virtuální návrh Gfunk3, který integruje všechny poznatky z experimentálního vývoje. Oproti funkčním vzorkům přináší optimalizaci zástavbových rozměrů a hmotnosti, posílení vyhřívání (2×50 W) a sdruženou kabeláž vyvedenou do jednoho systémového bodu. Pro úspěšné uvedení do provozu je nutné realizovat následující kroky:

- **Adaptace a certifikace:** Upravit konstrukci Gfunk3 dle zástavbových prostor a požadavků konkrétního zákazníka a podrobit jednotku kompletní sadě zkoušek na specializovaném zkušebním ústavu, zejména vibračním a rázovým.
- **Řídicí systém:** Navrhnout řídicí jednotku umožňující dávkování dle profilu trati a volbu aktivované větve. Systém může být navržen buď jako samostatný inteligentní celek vybavený vlastní senzorikou průjezdu zatáčkou, nebo jako výkonný prvek připojený k nadřazenému palubnímu systému vozidla.

Vedle výše uvedených kroků umožňuje modulární konstrukce mazací hlavy budoucí přestavbu na jednotryskovou variantu určenou k aplikaci na temeno kolejnice. Tento režim by si vyžádal samostatné testování, neboť maziva pro temeno kolejnice obsahují pevné částice, jejichž vliv na opakovatelnost nástřiku a životnost zpětných ventilů nebyl v rámci

této práce ověřen. Nezbytným krokem před sériovým nasazením je rovněž provozní testování jednotky přímo na vozidle v reálných podmínkách drážního provozu, které laboratorní měření ze své podstaty nemohou plně nahradit.

Navržená mazací jednotka představuje technologicky vyspělé řešení vhodné zejména pro tramvajové aplikace a kolejová vozidla bez centrálního rozvodu stlačeného vzduchu, kde bezvzduchá koncepce přináší konstrukční zjednodušení a zvyšuje spolehlivost celého mazacího systému.

8 VÝSLEDKY DLE RIV

Výsledkem je funkční vzorek mazací jednotky kolejových vozidel, která nevyužívá principu stlačeného vzduchu. Tento výsledek slouží jako základ pro vývoj prototypu konkrétní mazací jednotky.

Druh výsledku

G – Funkční vzorek

Název výsledku

Mazací hlava pro bezvzduchou palubní jednotku

Autoři

Bc. Jakub Kolínek, Ing. Martin Valena, Ph.D..

Technický popis

Bezvzduché mazací zařízení je aktivní aplikační systém určený pro přesné dávkování maziva na okolky kol kolejových vozidel. Systém zajišťuje řízené dávkování kapalného maziva bez využití stlačeného vzduchu, přičemž objem jednotlivé dávky je nastavitelný v rozsahu 5 až 50 mm³ v závislosti na provozních požadavcích. Součástí řešení je mazací hlava s elektromagnetickým aktuátorem, regulační mechanismus objemu dávky, senzorický systém umožňující detekci provedení pracovního zdvihu a detekci ucpané trysky, a solenoidový dělič proudu maziva pro obsluhu dvou nezávislých výstupních trysek. Systém umožňuje provoz v režimu jednotlivých dávek i v režimu rychlých mikrodávek s minimálním intervalem 0,15 s mezi cykly. Funkčnost byla ověřena laboratorně na dvou funkčních vzorcích a výsledky jsou podkladem pro zpracovaný finální konstrukční návrh připravený k výrobě.

Místo uložení výsledku

Zkušeni laboratoř společnosti Tribotec, spol. s r.o., Košuličova 656/4, 619 00 Brno-jih – Horní Heršpice.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KNORR-BREMSE. *Light rail vehicles: System solutions for the modern tram* [online]. Dostupné z: <https://rail.knorr-bremse.com/en/de/portfolio/vehicle-types/light-rail-vehicles/?accordion-1100=Air%20Supply%20%2F%20Treatment> [cit. 2026-02-15]
- [2] MÁLEK, J. *Stacionární jednotky pro mazání hlavy kolejnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Radovan Galas, Ph.D.
- [3] REBS ZENTRALSCHMIERTECHNIK GMBH. *Railway technology: REBS Zentralschmiertechnik GmbH – Our target: No friction* [online]. Dostupné z: <https://www.rebs.de/en/solutions/railway-technology/> [cit. 2026-02-15]
- [4] LEWIS, Roger a Rob DWYER-JOYCE. *The Wheel-Rail Condition Monitoring Handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.
- [5] L.B. FOSTER. *Wheel Flange Lubrication Experts* [online]. Dostupné z: <https://lbfoster.com/rail/friction-management/friction-management-products/gauge-face-and-wheel-flange-lubrication/wheel-flange-lubrication#benefits-of-solid-wheel-flange-lubrication> [cit. 2026-02-15]
- [6] *Rail-wheel Lubrication* [online]. Dostupné z: <https://railsystem.net/rail-wheel-lubrication/> [cit. 2026-02-15]
- [7] Railway greases stay on track. *Lubes'N'Greases* [online]. Dostupné z: https://www.lubesngreases.com/magazine/27_6/railway-greases-stay-on-track/ [cit. 2026-02-16]
- [8] SKF. *Managing friction successfully*. PUB LS/S2 14824 EN [online]. 2014-07. Dostupné z: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d19680338519/pdf_preview_medium/0901d19680338519_pdf_preview_medium.pdf [cit. 2024-04-19]
- [9] WHITE, B., Z. S. LEE a R. LEWIS. Towards a standard approach for the twin disc testing of top-of rail friction management products. *Lubricants* [online]. 2022, 10(6), 124. DOI 10.3390/lubricants10060124 [cit. 2025-09-18]
- [10] STOCK, Richard, Louisa STANLAKE, Chris HARDWICK, Marcia YU, Donald EADIE a Roger LEWIS. Material concepts for top of rail friction management – classification, characterisation and application. *Wear* [online]. 2016, 366–367, 225–232. ISSN 0043-1648. DOI 10.1016/j.wear.2016.05.028 [cit. 2025-09-18]

- [11] KVARDA, Daniel, Simon SKURKA, Radovan GALAS, Milan OMASTA, Lubing SHI, Haohao DING, Wen-jian WANG, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. The effect of top of rail lubricant composition on adhesion and rheological behaviour. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2022, 35, 101100. ISSN 2215-0986. DOI 10.1016/j.jestch.2022.101100 [cit. 2025-10-20]
- [12] LUBRICANT CONSULT GMBH. *SINTONO TERRA HLK I TI EN* [online]. 2016-01-27. Dostupné z: <http://www.lubcon.com> [cit. 2026-02-18]
- [13] BECHEM. *BECHEM Ecorail 8200* [online]. Dostupné z: <https://www.bechem.com/en/products/lubricating-greases/bechem-ecorail-8200.html> [cit. 2026-02-18]
- [14] SKF. *Electrically operated pump unit KFG* [online]. Dostupné z: <https://www.skf.com/uk/products/lubrication-management/system-components/pumps-and-pump-units/kfg>
- [15] SKF. *EasyRail Airless: Ring-line lubrication systems for tram and metro vehicles* [online]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/industries/railways/solutions/easyrail-airless>
- [16] SKF. *SKF EasyRail Airless: Single-line wheel flange lubrication systems without compressed air* [online]. Dostupné z: https://www.messestand-online.de/innotrans18/skf/pdfs/SKF-EasyRail-Airless_1-8097-EN.pdf
- [17] IGRALUB. *Mobile Rail Spraying Systems* [online]. Dostupné z: <https://igralub.com/en/spray-systems-mobile/> [cit. 2026-02-22]
- [18] IGRALUB. *Train Sys-AL: Airless spraying system* [online]. Dostupné z: <https://www.igralub.com> [cit. 2026-02-22]
- [19] SKF. *SKF EasyRail Compact* [online]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/industries/railways/solutions/easyrail-compact> [cit. 2026-02-28]
- [20] REBS ZENTRALSCHMIERTECHNIK GMBH. *REBS Central Lubrication* [online]. Dostupné z: <https://www.rebs.de> [cit. 2026-02-28]
- [21] MANDERA, Markus a Zdravko PALUNCIC. Lubrication device. US Patent Application No. 14/124,987. DE102011077396A1. 2014.
- [22] AMILIEN, Guillaume a Dominique DALAINE. Lubricating device and its use for lubricating a wheel flange of a railway vehicle. US Patent No. 8,776,951. 2014.
- [23] YANG, Xingkuan, YU Shuibao, MOU Yujia a WU Xiaopeng. Fluid lubrication nozzle for wheel flange of locomotive. CN102431573A. 2011-05-02.

- [24] STOJANOVIC, Vladimir. Wheel flange lubrication for railway vehicles. EP 2 868 546 A1. 2014.
- [25] BOEHNI, Kurt A. a Andre KOFMEHL. System and method for fleet wheel-rail lubrication and noise management. US20140142791A1. EP2841841B1. 2013.
- [26] ČSN EN 15427-1-1. *Železniční aplikace – Řízení tření mezi kolem a kolejnicí – Část 1-1: Mazací zařízení a nanášení – Mazání okolků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [27] ČSN EN 50155 ed. 5. *Drážní zařízení – Elektronická zařízení drážních vozidel*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [28] ČSN EN 61373 ed. 2. *Drážní zařízení – Zařízení drážních vozidel – Zkoušky rázy a vibracemi*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [29] MAC VALVES. *MAC Valves: Industrial Automation Leaders in Pneumatic Valves – Valves That Don't Stick* [online]. Dostupné z: <https://www.macvalves.com/> [cit. 2026-05-21]
- [30] TRIBOTEC. *Mazací přístroj PMP* [online]. Dostupné z: <https://centralnimazani.tribotec.cz/progresivni-a-vicepotrubni-system/mazaci-pristroj-pmp/> [cit. 2026-05-21]
- [31] SPRAYING SYSTEMS CO. *UNIJET NOZZLES* [online]. Dostupné z: <https://www.spray.com> [cit. 2026-03-10]

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10.1 Seznam použitých fyzikálních veličin

D	průměr přívodního kanálu maziva
d_p	průměr dávkovacího pístu
h	zdvih jádra solenoidu
h_{eff}	efektivní zdvih pístu
L_a	vzdálenost osy přívodního kanálu od nulové polohy jádra
l_p	délka dávkovacího pístu
L	délka regulačního válce
L_{seal}	poloha těsnicí hrany od nulové polohy jádra
m	hmotnost dávky maziva
N	počet nástřiků v měřené sérii
p	tlak v hydraulickém okruhu
P	výkon topné patrony
Q_1, Q_2	průtok maziva
S_p	plocha průřezu dávkovacího pístu
$T1, T2, T3, T4$	označení testovaných trysek; plocha nástřiku
t	čas, interval mezi nástřiky
$V1, V2, V3, V4, V5$	označení regulačních válců dle objemu dávky
V, V_{min}, V_{max}	objem dávky maziva
μ	součinitel tření
ν	kinematická viskozita maziva
ρ	hustota maziva

10.2 Seznam použitých zkratk

CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované projektování
ČSN	Česká technická norma
DC	Direct Current – stejnosměrný proud
EN	Evropská norma
Gfunk1	Funkční vzorek 1 – jednovětvová mazací hlava
Gfunk2	Funkční vzorek 2 – mazací hlava se solenoidovým děličem proudu
Gfunk3	Funkční vzorek 3 – finální virtuální konstrukční návrh mazací hlavy
GPS	Global Positioning System – globální polohový systém
IO-Link	Průmyslový komunikační protokol pro senzory a aktuátory
IP67	Ingress Protection 67 – stupeň krytí (prachotěsné, dočasné ponoření)
KFG	Označení řady pístových čerpadel SKF
LRV	Light Rail Vehicle – lehké kolejové vozidlo (tramvaj, metro)
LT	Levá tryska (větev Gfunk2 aktivovaná sepnutím solenoidu děliče)
MAC	Označení výrobce solenoidového ventilu (MAC Valves)
NC	Normally Closed – normálně uzavřený (stav ventilu v klidové poloze)
NLGI	National Lubricating Grease Institute – třída konzistence maziva
PMP	Označení řady víceokruhových mazacích čerpadel Tribotec
PT	Pravá tryska
PT100	Odporový teplotní snímač s nominálním odporem 100 při 0 °C Ω
RIV	Rejstřík informací o výsledcích výzkumu a vývoje
TOR	Top of Rail – temeno kolejnice
TOR-FM	Top of Rail Friction Modifier – modifikátor tření na temeno kolejnice
WFL	Wheel Flange Lubrication – mazání okolků kol kolejových vozidel

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Prisma diagram RD1	15
Obr. 2-2 Prisma diagram RD2	15
Obr. 2-3 Prisma diagram RD3	16
Obr. 2-4 Znázornění stacionární jednotky [2]	18
Obr. 2-5 Znázornění umístění palubní jednotky [3]	18
Obr. 2-6 Tuhé modifikátory tření [6]	20
Obr. 2-7 Polohy pro aplikaci maziva [7]	21
Obr. 2-8 Oblasti použití dle SKF [9].....	22
Obr. 2-9 Vliv maziv na koeficient tření [8].....	22
Obr. 2-10 SKF EasyRail Airless; Poz. 1: KFG Čerpadlo, Poz. 2: Mazací hlava, Poz. 3: Řídicí jednotka [15]	25
Obr. 2-11 Igralub TrainSys-AL: Umístění jednotky na podvozku [18]	27
Obr. 2-12 Mazací hlava stacionární jednotky [21].....	30
Obr. 2-13 Mazací hlava [22].....	30
Obr. 2-14 Přísuvná tryska [23].....	31
Obr. 4-1: Strom cílů	38
Obr. 4-2: Glass box	39
Obr. 4-3 Koncept 1.....	41
Obr. 4-4 Koncept 2.....	42
Obr. 4-5 Koncept 3.....	43
Obr. 5-1 Umístění mazací hlavy vůči vodorovné ose kola [26].....	45
Obr. 5-2 Požadovaná poloha nástřiku [26]	46
Obr. 5-3: Kategorie vůči umístění [28]	46
Obr. 5-4 Porovnání optimálního a nevhodného nástřiku	50
Obr. 5-5 Konstrukce mazací hlavy funkčního vzorku 1	51
Obr. 5-6 Konstrukce mazací hlavy funkčního vzorku 2	52
Obr. 5-7 Znázornění uspořádání mechanismu.....	54
Obr. 5-8 Konfigurace výstupních trysek	55

Obr. 5-9 3/2 Solenoidový ventil Bullet Valve® [29]	56
Obr. 5-10 PMP Čerpadlo s nádrží [30]	57
Obr. 5-11 Testovací stojan s maketou okolku při montáži Gfunk1	59
Obr. 5-12 UniJet tryska stavebnicového typu [31]	60
Obr. 5-13 Vliv trysky při 30 °C a dávce 3	62
Obr. 5-14 Vliv trysky na aplikovaný objem maziva při 30 °C	63
Obr. 5-15 Vliv dávky na nástřik při trysce 1 a teplotě 30 °C	63
Obr. 5-16 Vliv teploty na obsah plochy nástřiku (pro dávku V3).....	64
Obr. 5-17 Vliv teploty na nástřik pro Trysku 1 s dávkou V3	65
Obr. 5-18 Série nástřiků ve zkráceném intervalu (Tryska 1, V1, 30 °C)	67
Obr. 5-19 Mapy využitelnosti trysek	68
Obr. 5-20 Příklad méně kvalitního nástřiku, kde dochází k odražení maziva (Tryska 4, 40 °C, dávka 5).....	68
Obr. 5-21 Funkční vzorek 2 při testování.....	69
Obr. 5-22 Porovnání L/P trysky (30 °C, dávka 3)	70
Obr. 5-23 Histogramy hodnot indukčního snímače pro volnou a ucpanou trysku	74
Obr. 5-24 Histogramy hodnot indukčního snímače pro Gfunk2 ve všech provozních stavech	75
Obr. 6-1 3D model Gfunk3	80
Obr. 6-2 Výsledek termální analýzy mazací hlavy Gfunk3.	82
Obr. 6-3 Průběh teploty v čase při vyhřívání mazací hlavy	83
Obr. 6-4 Modulárně přestavěna mazací hlava Gfunk3; a) natočení vývodů; b) jednotrysková mazací hlava	84

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry maziva Sintono Terra HLK [12].....	23
Tab. 2 Parametry maziva BECHEM Ecorail 2009 [13].....	24
Tab. 3 Tabulka atributů.....	36
Tab. 4 Porovnání konceptů.....	44
Tab. 5 Testované trysky.....	59
Tab. 6 Objem dávky v krajních bodech rozsahu při referenčním a zkráceném intervalu (T=30 °C).....	66
Tab. 7 Porovnání objemů dávek pro pravou a levou trysku u Gfunk2.....	70
Tab. 8 Srovnání objemu dávky Gfunk1 a Gfunk2 pro trysky T1, T2, T4 a regulační válce V1, V3, V5.....	71
Tab. 9 Srovnání plochy nástřiku Gfunk1 a Gfunk2 při 30 °C a dávce 3	72
Tab. 10 Porovnání objemu dávky ve zkráceném intervalu	72
Tab. 11 Tabulka technických parametrů mazací hlavy Gfunk3	84
Tab. 12 Odhad výrobních nákladů Gfunk3 pro kusovou výrobu	85
Tab. 13 Sdílené komponenty mazací soustavy; přepočtená cena při konfiguraci 4 mazacích hlav	86

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulky hodnocení nástřiků

Příloha 2 Výkres sestavy Gfunk3

Příloha 1 – Tabulky hodnocení nástřiků

Tryska T1

Dávka \ T (°C)	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
V1	6	7	8	8	8
V2	7	8	10	10	8
V3	6	8	9	9	7
V4	6	7	7	7	6
V5	5	6	7	7	6

Tryska T2

Dávka \ T (°C)	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
V1	4	6	8	8	7
V2	5	7	9	9	8
V3	5	7	8	9	7
V4	6	6	7	8	7
V5	4	7	7	7	6

Tryska T4

Dávka \ T (°C)	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
V1	–	–	–	–	–
V2	7	9	10	8	3
V3	7	9	10	8	5
V4	6	7	8	6	5
V5	4	5	5	3	2

Legenda hodnocení: 0 – nefunkční 1–3 – nevyhovující 4–5 – přijatelné 6–7 – dobré 8–9 – velmi dobré 10 – výborné